НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МОДЕЛЮВАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ
ІМ. Г.Є. ПУХОВА

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ГУРЄЄВ ВІКТОР ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 004.942:519.876.5; 621.31

ДИСЕРТАЦІЯ

МЕТОДИ І КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПОБУДОВИ ВЕБ-ОРІЄНТОВАНИХ ТРЕНАЖЕРНИХ СИСТЕМ ОПЕРАТИВНО-ДИСПЕТЧЕРСЬКОГО ПЕРСОНАЛУ МАГІСТРАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖ

Спеціальність 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи
Галузь знань - інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

В.О. Гурєєв

Науковий консультант - Самойлов Віктор Дмитрович,
доктор технічних наук, професор

Київ - 2020

Анотація

Гурєєв В.О. Методи і комп'ютерні технології побудови веб-орієнтованих тренажерних систем оперативно-диспетчерського персоналу магістральних електромереж. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 - математичне моделювання та обчислювальні методи. - Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова Національної академії наук України.- Київ, 2020.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної проблеми розроблення теорії побудови веб-орієнтованих тренажерних систем оперативно-диспетчерського персоналу магістральних електромереж з врахуванням особливостей їх впровадження, масштабування та підтримки функціонування в умовах об'єднаної електроенергетичної системи (ОЕС) України.

Ефективне розв'язання вказаної проблеми створює належні умови для побудови і функціонування веб-орієнтованої сучасної безперервної електронної професійної системи навчання, ефективної тренажерної підготовки, контролю знань і формування компетентностей оперативно-диспетчерського персоналу МЕМ шляхом аналізу та вивчення результатів моделювання різноманітних прогнозованих аварій або тих, що сталися, та методів їх ліквідації.

МЕМ – магістральна електрична мережа, призначена для передачі електричної енергії від виробників до пунктів підключення місцевих (локальних) електричних мереж.

Нині в МЕМ ОЕС України існує величезна потреба у великій кількості тренажерних систем для організації сучасної професійної тренажерної системи підготовки оперативно-диспетчерського персоналу для трьох рівнів ієрархії управління на постійній основі. До них відносяться рівні: системного оператора (НЕК "Укренерго"), регіональні диспетчерські центри (електроенергетичні системи Центральної, Південно-Західної, Західної, Південної, Дніпровської і Північною ЕЕС), включаючи їх високовольтні підстанції напругою 220 - 750кВ, і

енергопостачальні компанії (обленерго) з підстанціями в місцях їх підключення до МЕМ.

Основними напрямами діяльності НЕК «УКРЕНЕРГО» [1] є виконання функцій оператора системи передачі та виконання функцій з управління та експлуатації основних ліній передачі електроенергії

Відповідно до галузевих рекомендацій, які є обов'язковими для застосування на робочих місцях, робота з персоналом МЕМ за тематикою тренажерної підготовки дозволена без використання комп'ютерних технологій, хоча при цьому і рекомендується застосовувати різні технічні засоби навчання (ТСО). Практично, в робочих умовах МЕМ, для проведення тренажерної підготовки, як правило, використовуються лише роздруковані електричні схеми і дисплейні форми (відеограми) SCADA, а також результати розрахунків деяких режимів за темами тренувальних занять (ТрЗ), що проводяться. Такі тренувальні заняття мають низьку ефективність і якість, а також призводять до збільшення часу проведення ТрЗ.

У зв'язку з цим, спостерігається стійка тенденція зростання вірогідності виникнення великих системних аварій в МЕМ ОЕС України, яка посилюється критичним фізичним зносом і деградацією практично усього енергетичного устаткування ОЕС України.

У МЕМ відчувається гострий дефіцит сучасних тренажерних засобів для формування і підтримки ключових компетентностей оперативно-диспетчерського персоналу, а саме, готовності швидко розпізнавати умови виникнення різних системних аварій, попереджати і швидко усувати їх наслідки.

Сучасна розподілена комп'ютерна тренажерна система підготовки оперативно-диспетчерського персоналу МЕМ є складною людино-машинною системою. Ця система може бути представлена у вигляді наступних взаємозв'язаних підсистем:

1. Моделюючий в розподіленому середовищі комплекс режимів роботи МЕМ ОЕС України;

2. Узагальнена розподілена база даних інформаційної частини моделі МЕМ ОЕС України;

3. Графічний людино-машинний інтерфейс ТрЗ;

4. Конструктор-редактор ТрЗ;

5. Підсистема моделювання ТрЗ і ПТ (організація проведення тренажерної підготовки);

6. Система оцінки компетентності персоналу за результатами контролю знань, ТрЗ і ПТ.

В якості моделі об'єкту управління (ОУ) МЕМ тренажерної системи використовується система нелінійних рівнянь алгебри, що описує усталені режими МЕМ у складі ЕЕС та ОЕС. Такі системи можуть бути вирішені тільки ітераційними методами (простої ітерації, Зейделя, Ньютона і їх модифікаціями). До недоліків цих методів відноситься нестійкість збіжності і критична залежність від початкових наближень. Також, існуючі методи і алгоритми рішення нелінійних систем рівнянь алгебри не дозволяють контролювати поточні струми гілок і напруги вузлів в процесі розрахунку (on-line).

Залежно від цілей і завдань дослідження та застосування, моделі генеруючих блоків електричної станції у складі моделі ЕЕС або ОЕС, як правило, складається із моделей парового котла, турбіни, турбогенератора, трансформатора та їх регулюючих систем.

В роботі наявні генеруючі агрегати різних типів електростанцій у складі ОЕС України представляються структурою з п'яти елементів: генератора, джерела енергії збудження з системою управління (системи збудження), автоматичного регулятора збудження (АРВ), первинного двигуна (турбіни) і автоматичного регулятора швидкості (АРС), за винятком повної моделі котлоагрегату.

Окремі сценарії тренувальних занять (ТрЗ), які пов’язані із дослідженням і аналізом можливих непередбачених змін частоти та її регулюванням в ЕЕС, у разі великих або критичних збурень, потребують моделювання тривалих електромеханічних процесів на предмет перевірки статичної і динамічної стійкості.

Перехідні процеси в загальному випадку описуються за допомогою алгебро-диференціальної системи рівнянь.

Найбільш часто в режимних тренажерах використовуються два методи рішення алгебро-диференціальної системи рівнянь.

Класичним вважається метод спільного (одночасного) рішення. Цей метод характеризується високою надійністю, але вимагає великих обчислювальних витрат та більш складний алгоритмічно і сучасні стандартні вирішувачі таких систем рівнянь великої розмірності не задовольняють вимогам до потрібної їх продуктивності у випадку застосування в режимних тренажерах.

Другий метод пов'язаний з почерговим рішенням алгебраїчних і диференціальних систем рівнянь. Він більш простий алгоритмічно, характеризується прийнятною надійністю при відносно невеликих обчислювальних витратах з окремим розрахунком режиму електричної мережі між кроками інтегрування.

Тому, розробка моделі ЕЕС для розрахунку перехідних режимів у режимних тренажерах з роздільним (послідовним) розрахунком алгебраїчних рівнянь мережі і диференціальних рівнянь електро- і теплосилового обладнання є більш доцільною і перспективною. Саме тому цей підхід був запропонований і реалізований в роботі. Основною відмінністю від класичної форми запису системи диференційних рівнянь Парка-Горєва для генераторів СМ та їх САУЗ є використання результатів розрахунку струму статору СМ як в доаварійному усталеному режимів в якості початкових даних, так і на кожному кроці вибраного інтервалу інтегрування.

Сьогодні, на жаль, не існує загальної уніфікованої моделі генеруючих блоків електростанцій різних типів. Модель генеруючого блока електричної станції у складі моделі ЕЕС або ОЕС, як правило, складається із моделей парового котла, турбіни, турбогенератора і, іноді, трансформатора.

В роботі представлено модель електромагнітних та механічних процесів в ідеалізованих синхронних машинах у вигляді рівнянь змішаної системи диференціальних і алгебраїчних рівнянь (Парка-Горєва), які записуються відносно відомих струмів статорів СМ.

Основні етапи процесу тренажерної підготовки можуть бути описані у вигляді етапів циклічного спостереження і аналізу оперативно-диспетчерським

персоналом поточних режимних параметрів МЕМ з урахуванням топології мережі. Спостереження здійснюється за допомогою інформації, представленої на диспетчерському щиті, SCADA і отриманою по телефону від оперативно-диспетчерського персоналу паралельно працюючих ЕЕС і підстанцій, а також від керівництва. У разі відхилення деяких параметрів режиму від номінальних, диспетчер повинен прийняти правильне і оптимальне рішення (із спектру можливих). Наприклад, він може змінити конфігурацію електричної мережі шляхом включення або відключення ліній електропередач, генерацію або навантаження для цього моменту часу з подальшим аналізом наслідків цієї дії - адекватній реакції ОУ у вигляді наборів параметрів режиму при рішенні систем нелінійних рівнянь алгебри.

В процесі тренажерного заняття на ОУ можуть впливати також засоби системної і локальної автоматик і релейного захисту (РЗ і А), основна функція яких полягає в забезпеченні безпеки електроенергетичного устаткування МЕМ. В цьому випадку персонал також повинен уміти аналізувати усі наслідки роботи засобів автоматики, які можуть зробити певний вплив на вибір його рішення.

Складність проблеми моделювання режимів роботи МЕМ визначається великою вірогідністю не збіжності ітераційного процесу вибраного методу розрахунку з невідомих в конкретному випадку причин або через відсутність існування (фізичної реалізації) режиму рішення системи нелінійних рівнянь алгебри не може бути отримане. В цьому випадку така тренажерна система також не може бути використана за призначенням.

Тому, в роботі сформульована і вирішена науково-технічна задача визначення умов і параметрів, що забезпечують збіжність ітераційних методів рішення систем нелінійних рівнянь алгебри, які моделюють простір існуючих (що фізично реалізовуються) режимів роботи МЕМ великих ЕЕС і ОЕС, для забезпечення створення, організації і підвищення ефективності функціонування розподілених тренажерних систем підготовки персоналу МЕМ. Визначення простору існуючих (що фізично реалізовуються) режимів роботи МЕМ великих ЕЕС і ОЕС здійснюється до або в процесі розв’язку системи нелінійних

алгебраїчних рівнянь, шляхом перевірки системи логічних правил з обмежень на допустимі (номінальні) значення параметрів режиму МЕМ: напруги вузлів, струмів гілок і балансу потужності ЕЕС для певного розрахункового моменту часу.

Розробка надійніших методів моделювання, засобів організації, побудови і забезпечення функціонування комп'ютерних розподілених тренажерних систем в аспекті формування у оперативно-диспетчерського персоналу МЕМ ОЕС України стійких навичок розпізнавання умов виникнення і ліквідації великих аварій (ключових компетентностей) є актуальними науково-технічними задачами. Вирішення цих задач дозволяє створити належні умови для поетапної побудови і функціонування сучасної професійної електронної системи підготовки персоналу у вигляді мережі науково-навчальних центрів. Така електронна система навчання повинна мати модельне супроводження у вигляді інструментальних програмних можливостей для її розвитку, модернізації і вдосконалення.

У роботі запропонований новий евристичний метод рішення систем нелінійних рівнянь алгебри, що описують режими роботи великих енергосистем, в околі простору існуючих рішень (фізично здійсненних), значно віддалених від аварійних режимів за рахунок моделювання роботи системної автоматики і перевірки параметрів режиму до і під час розрахунку на відповідність допустимим значенням.

Суть запропонованого багатоопорного методу розрахунку режимів великих ЕЕС та ОЕС полягає в розділенні початкової схеми на дерева і хорди таким чином, щоб усі дерева мали в якості балансуючого тільки один опорний вузол - джерело енергії, а усі інші вузли в кожному дереві – навантаження або фіксовану генерацію. Тому цей метод названий багатоопорним методом (БОМ) розрахунку контурних струмів (РКС).

Усі вузли виділених дерев можуть мати прилеглі хорди, які утворюють незалежні та вироджені контури, або об’єднують паралельно працюючі енергосистеми.

В цьому випадку власні числа матриці Якобі стають значно менше 1, що і підвищує гарантію збіжності запропонованого методу.

Розрахунок контурних струмів здійснюється шляхом урівноваження потужності незалежних та вироджених контурів і окремих підсистем сполучаючими хордами, що у більшості практичних випадків реальних мереж ОЕС України гарантує швидшу збіжність ітераційних процесів методів рішення систем нелінійних рівнянь алгебри, ніж метод Ньютона та його модифікації.

Запропонований метод відноситься до класу завдань реального часу і рекомендується для використання в режимних тренажерах диспетчерів енергосистем всіх рівнів керування МЕМ ОЕС України.

В роботі сформульована і вирішена науково-прикладна проблема розроблення теорії побудови веб-орієнтованих тренажерних систем оперативно-диспетчерського персоналу магістральних електромереж з врахуванням особливостей їх впровадження, масштабування та підтримки функціонування в умовах ОЕС України.

Удосконалено методи математичного і комп'ютерного моделювання процесів і засобів забезпечення модельного конструювання комп'ютерних тренажерів оперативно-диспетчерського персоналу МЕМ України у напрямі підвищення їх продуктивності на основі нових ефективних методів автоматизованого конструювання систем ТрЗ і ПТ, включаючи структурну і алгоритмічну організацію взаємозв'язаних математичних і комп'ютерних моделей функціонування розподіленої системи комп’ютерних тренажерів.

Вирішена також науково-технічна задача визначення параметрів, що забезпечують збіжність ітераційних методів рішення великих систем нелінійних рівнянь алгебри в околі простору фізично існуючих режимів роботи МЕМ великих енергосистем.

Розроблено комплекси взаємопов'язаних математичних моделей процесів розвитку, функціонування і вдосконалення комп’ютерних тренажерів оперативно-диспетчерського персоналу МЕМ та засоби їх об’єктно-орієнтованого інформаційно-технологічного забезпечення.

Отримані результати представляють наукову основу розробки інформаційно-методичного середовища для автоматизованого проектування сценаріїв тренувальних занять та побудови комп'ютерних тренажерів з використанням широкого спектру технологій тренажерного будування.

Ключові слова: модельне конструювання, комп’ютерні тренажери, магістральні електромережі електроенергетичних систем, віртуальні технології, усталені режими і перехідні процеси, тренувальні заняття, тренажерна підготовка персоналу, посадові інструкції, моделі діяльності оперативно-диспетчерського персоналу.

ANNOTATION

Gurieiev V.O. **Methods and computer technologies for the construction of web-based simulating systems for operational and dispatching personnel of the trunk power grids. – As the manuscript.**

Dissertation for obtaining a scientific degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 01.05.02 - mathematical modeling and calculation methods. – G.E. Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering National Academy of Sciences of Ukraine. - Kyiv, 2020.

The thesis focuses on the solution of the latest applied scientific problem of the development of the theory of the construction of web-oriented training systems of operating and dispatching personnel of the trunk power grids taking into account the features of their implementation, scaling, and maintenance in the context of the United Energy System of Ukraine.

The practical solution of this problem creates appropriate conditions for the construction and operation of a web-oriented modern continuous electronic professional development system, functional training, knowledge control, and formation of competencies of operational and control personnel of the trunk power grid (TPG) by analyzing and studying the results of modeling various predicted or occurred accidents and methods of their elimination.

TPG is the trunk power grid developed to transmit electric energy from producers to connection points of local electric networks.

Today in TPG of the UES of Ukraine, there is a tremendous need for a large number of training systems for the organization of modern training of operational and control personnel for all three levels of the management hierarchy regularly. These include the levels of system operator (NEC "Ukrenergo"), regional control centers (power systems of Central, South-Western, Western, Southern, Dnieper and Northern power plants), including their 220 - 750 kV high-voltage substations, and energy supply companies) with substations at the points of their connection to TPG.

The main activities of NPC UKRENERGO [1] are to perform the transmission system operator functions as well as the management and operation functions of the main power transmission lines.

Following the industry recommendations, which are mandatory for the working area, the TPG staff training is allowed without the use of computer technology. However, it is recommended to use various technical training tools (TTT). Basically, under the TPG normal operation, as a rule, the instructors use only printed SCADA electrical diagrams and display forms (videograms) for training and the results of calculations of some modes within the context of training sessions topics (TST). Such training sessions have low efficiency and quality and lead to an increase in carrying out TST.

In this regard, there is a steady trend of increasing the probability of major systemic accidents in the TPG of the UES of Ukraine, deepened by critical physical wear and degradation of almost all power equipment of the UES of Ukraine.

The TPG has an acute shortage of modern simulators for the formation and maintenance of key competencies of operational and dispatching personnel, namely, the willingness to quickly recognize the conditions of various system accidents to prevent and promptly eliminate their consequences.

The modern distributed computer training system for the training of operational and dispatching personnel of TPG is a complex human-machine system. This system can be represented as the following interconnected subsystems:

1. A facility simulating a set of operating modes in a distributed environment of TPG of Ukrainian UES;

2. Generalized distributed database of the TPG data model of the UES of Ukraine;

3. Graphical human-machine interface of TST;

4. TST designer editor;

5. Subsystem for TST modeling and OT (organization of training);

6. The system of staff competence assessment based on knowledge control, TST, and OT.

The system of nonlinear equations of algebra, which describes the established modes of TPG as a part of PG and UES, is used as a model of the control object (CO) of

the simulator system. Such systems can be solved only by iterative methods (simple, Seidel, Newton iterations and their modifications). The disadvantages of these methods include the instability of convergence and critical dependence on the initial approximations. Moreover, the existing techniques and algorithms for solving nonlinear systems of algebra equations do not allow controlling the existing branch currents and voltages of nodes in the calculation process (on-line).

Depending on the goals and objectives of research and application, generating units of a power plant in the PG and UES model usually consists of models of steam boiler, turbine, turbine generator, transformer, and control systems.

The available generating units of different types of power plants in the UES of Ukraine are represented as a structure with five elements: generator, excitation energy source with a control system (excitation system), automatic excitation controller (AEC), primary engine (turbine) and automatic speed controller (ASC), except for the full model of the boiler.

Specific training scenarios (TST) related to the study and analysis of possible unforeseen changes in frequency and its regulation in the UES, in case of large or critical disturbances, require modeling of long-term electromechanical processes to check static and dynamic stability.

Transients in the general case are described using a differential-algebraic system of equations.

Two methods of solving a differential-algebraic system of equations are most often used in mode simulators.

The method of general (homogeneous) solution is considered classic. This method is characterized by high reliability but requires high computational costs and is more complex algorithmically, and modern standard solvers of such systems of large equations do not meet the requirements for their required performance when applying mode simulators.

The second method is associated with the alternate solution of algebraic and differential systems of equations. It is simpler algorithmically, characterized by

acceptable reliability at relatively low computational costs with a separate calculation of the electrical network between the steps of integration.

Therefore, the development of the UES model for the calculation of transient modes in mode simulators with the separate (sequential) calculation of algebraic equations of the network and differential equations of electric and thermal power equipment is more appropriate and promising. That is why this approach was proposed and implemented at work. The main difference from the classical form of recording the system of Park-Gorev differential equations for SM generators and their ACS is applying the stator current results calculation of the SM both in the pre-emergency steady state as the initial data and at each step of the selected integration interval.

Unfortunately, there is no standard unified model of generating units of power plants of different types. The model of the generating unit of a power plant as a part of the model of PG or UES, as a rule, consists of models of a steam boiler, the turbine, the turbine generator, and, sometimes, the transformer.

The work presents a model of electromagnetic and mechanical processes in the synchronous machine model in the form of equations of a mixed system of differential and algebraic equations (Park-Gorev), which are written relative to the known currents of the stators of the SM.

The training process's main stages can be described as cyclic observation stages and analysis of the TPG current mode parameters, taking into account the operational and control personnel's network topology. Supervision is carried out with the help of information presented on the control panel, SCADA, and received by phone from the operational and managing staff of parallel operating power plants and substations and management. In case of deviation of some mode parameters from nominal, the dispatcher has to make the correct and optimum decision (from a range of possible ones). For example, he can change the configuration of the electrical network by turning on or off power lines, generation or load for this point in time with subsequent analysis of the consequences of this action - adequate response of the CO in the form of sets of mode parameters in solving systems of nonlinear equations of algebra.

In the training process, the CO can also be affected through the system and local automation and relay protection (RP and A), ensuring the TPG electrical equipment safety. In this case, staff must also be able to analyze all the consequences of automation, which may have some influence on the choice of his decision.

The complexity of the problem of modeling the TPG operation modes is determined by the high probability of inconsistency of the iterative process of the selected calculation method for unknown reasons or due to the lack of existence (physical implementation) of the solution of the system of nonlinear equations of algebra can not be obtained. In this case, such a training system also can not be used for its intended purpose.

Therefore, the paper formulates and solves the scientific and technical problem of determining the conditions and parameters ensuring the convergence of iterative methods of nonlinear equations of algebra solving systems, which simulate the space of existing (physically realized) large PG and UES operating modes, to ensure the creation, organization and improving the distributed training systems for the TPG personnel training efficiency. Determining the space of existing (physically realized) large ES and UES TPG operating modes is carried out before or in the process of solving a system of nonlinear algebraic equations by checking the method of logical rules from restrictions on allowable (nominal) values of TPG mode parameters: node voltages, branch currents and the power balance of the power system for a particular estimated time.

The development of more reliable modeling methods, the means of organization, construction, and operation of computer distributed simulation systems in terms of forming stable skills of recognizing the conditions of occurrence and elimination of major accidents (key competencies) of the operational and dispatching staff of TPG UES of Ukraine are urgent scientific and technical tasks. The solution of these problems allows creating appropriate conditions for the gradual construction and operation of a modern professional electronic system of personnel training in a network of research and training centers. Such an e-learning system should have model support in instrumental software capabilities for its development, modernization, and improvement.

The paper suggests a new heuristic method for solving systems of nonlinear equations of algebra, describing the modes of operation of large power systems in the space of existing solutions (physically feasible), far removed from emergency modes by modeling system automation and checking mode parameters before and during compliance with acceptable values.

The essence of the proposed multi-support method of calculating the large PG and UES modes is to divide the initial scheme into trees and chords so that all trees have only one balancing reference node – an energy source, and all other nodes in each tree - load or fixed generation. Therefore, this method is called the multi-reference method (MRM) for the mesh current calculation (MCC).

All selected trees nodes can have adjacent chords that form independent and degenerate circuits or combine parallel power systems.

In this case, the Jacobi matrix's eigenvalues become much less than 1, which increases the guarantee of convergence of the proposed method.

The calculation of contour currents is carried out by balancing the power of independent and degenerate contours and individual subsystems by connecting chords, which in most practical cases of entire networks of UES of Ukraine guarantees faster convergence of iterative processes of solving systems of nonlinear algebra equations than Newton's method and its modification.

The proposed method belongs to the class of real-time tasks and is recommended for use in mode simulators of power system managers of all control levels of TPG UES of Ukraine.

The paper formulates and solves the scientific and applied problem of developing the theory of the construction of web-oriented training systems for operational and dispatching personnel of trunk power grids taking into account the peculiarities of their implementation, scaling, and maintenance in the UES of Ukraine.

The mathematical and computer modeling of processes and means of providing model designing of computer simulators of operative-dispatching personnel of TPG of Ukraine are improved. This helps increase their productivity based on new effective methods of automated designing of TST and OT systems, including structural and

algorithmic organization of interconnected mathematical and computer models of functioning of the distributed network of computer simulators.

The scientific and technical problem of determining the parameters that ensure the convergence of iterative methods for solving large systems of nonlinear equations of algebra near the space of physically existing operating modes of TPG of large power systems is also solved.

The complexes of interconnected mathematical models of development, functioning, and improvement of computer simulators of operative-dispatching personnel of TPG and means of their object-oriented information-technological support are developed.

The obtained results represent the scientific basis for developing information and methodological environment for automated design of training scenarios and construction of computer simulators using a wide range of simulation technologies.

Keywords: model design, computer simulators, trunk power grids of electric power systems, virtual technologies, steady modes and transients, training sessions, personnel training, job descriptions, operational and dispatching personnel activity model.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії:

1. Гурєєв В.О. Методи моделювання та засоби побудови і функціонування віртуальних науково-навчальних центрів в енергетиці : монографія / В.О. Гурєєв, О.В. Сангінова, О.В. Аветісян. – К. : ВП «Едельвейс», 2019. – 172 с. – ISBN 978-617-7619-17-7.

2. Комп'ютерне моделювання електроенергетичних об'єднань як нелінійних динамічних систем : монографія / [В. М. Авраменко, О. В. Мартинюк, Н. Т. Юнєєва та ін.]. – К. : ВП «Едельвейс», 2019. – 128 с. – ISBN 978-617-7619-18-4.

3. Systems, Decision and Control in Energy I. Studies in Systems, Decision and Control. / [Babak, V., Isaienko, V., & Zaporozhets, A. (Eds.)]. Springer Nature Switzerland AG, 2020. – 279 с. – ISBN 978-3-030-48582-5. (https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2).

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації у фахових виданнях:

4. Сулейманов В. Н. Оптимизация режимов работы электроэнергетических систем методом экстремального планирования эксперимента / В. Н. Сулейманов, В. А. Гуреев, У. О. Саидов. // Вестн. Киевск. политехн. ин-та. Сер. электроэнергетики. – 1982. – С. 61–64.

5. Цифровые имитационные тренажеры / [В. А. Гуреев, С. В. Колесников, И. В. Пашкова та ін.]. // Известия вузов, Энергетика. – 1989. – №4. – С. 3–9.

6. Колесников С. В. Система противоаварийной диагностики персонала на основе микро ЭВМ / С. В. Колесников, В. А. Гуреев, А. И. Ришкевич. // Моделирование в тренажерных системах: Сб. науч. тр. АН УССР. – 1990. – С. 50–56.

7. Гуреев В. А. Метод решения систем уравнений для определения режимов работы электрических сетей / В. А. Гуреев, Н. Н. Редковский. // Кибернетика и системный анализ. – 1993. – №2. – С. 3–12 (*фахове видання включене до міжнародної наукометричної бази SCOPUS*).

8. Гуреев В. А. О решении нелинейных уравнений в задачах управления режимами электрических сетей / В. А. Гуреев, Н. Н. Редковский. // Кибернетика и системный анализ. – 1993. – №4. – С. 122–130 (*фахове видання включене до міжнародної наукометричної бази SCOPUS*).

9. Гуреев В. А. О параметрическом методе вычисления характеристик установившегося режима работы электрических сетей / В. А. Гуреев, Н. Н. Редковский. // Кибернетика и системный анализ. – 1994. – №4. – С. 140–146 (*фахове видання включене до міжнародної наукометричної бази SCOPUS*).

10. Гуреев В. А. Метод одновременного вычисления установившихся режимов и минимальных потерь в электрических сетях / В. А. Гуреев, Н. Н. Редковский. // Кибернетика и системный анализ. – 1994. – №6. – С. 145–152 (*фахове видання включене до міжнародної наукометричної бази SCOPUS*).

11. Гуреев В. А. О численном определении установившихся режимов работы электрических сетей / В. А. Гуреев, Н. Н. Редковский. // Электронное моделирование. – 1994. – №4. – С. 59–62.

12. Gureev V.A. On Some Special Features of Numerical Calculation of Steady State Conditions for / V.A. Gureev, N. N. Redkovsii // Electric Power Systems. – 1995. – С. 165–172 (*фахове видання включене до міжнародної наукометричної бази SCOPUS*).

13. Гуреев В. А. О некоторых особенностях численного расчета напряжений при моделировании установившихся режимов электроэнергетических систем / В. А. Гуреев, Н. Н. Редковский. // Электронное моделирование. – 1995. – №1. – С. 92–96.

14. Гуреев В. А. О стратегиях поведения итерационных методов при вырождении якобиана / В. А. Гуреев, Н. Н. Редковский. // Кибернетика и системный анализ. – 1996. – №2. – С. 90–102 (*фахове видання включене до міжнародної наукометричної бази SCOPUS*).

15. Редковский Н. Н. О численном решении нелинейных уравнений / Н. Н. Редковский, В. А. Гурєєв. // Доклады Академии Наук России. – 1995. – №5. – С. 590–592.

16. Redkovsky N. N. Optimization problems and calculation of electrical networks work regimes / N. N. Redkovsky, V. A. Goureev. // Gordon and Breach Science Publishers. – 1997. – С. 139–155 (*фахове видання включене до міжнародної наукометричної бази SCOPUS*).

17. Гуреев В. А. Классификация ошибок диспетчерского персонала и методологические аспекты проектирования сценариев компьютерных противоаварийных тренировок / В. А. Гуреев, В. Н. Сулейманов, Р. Надеран. // Электроника и связь. – 2001. – №12. – С. 57–59.

18. Гуреев В. А. Методы и средства разработки полнофункциональных систем управления электрическими подстанциями / В. А. Гуреев, В. Н. Сулейманов, Р. Надеран. // Технічна електродинаміка, тем. випуск. Проблеми сучасної електротехніки, Част.1 – 2002. – С. 83–89 (*фахове видання включене до міжнародної наукометричної бази SCOPUS*).

19. Аветісян О. В. Розробка та застосування віртуальних ієрархічних структур для моделювання режимів, навчання і тренажу персоналу ОЕС України / О. В. Аветісян, В.О. Гурєєв, О. В. Сангінова. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – №1. – С. 101 – 107.

20. Гуреев В. А. Распределенная среда моделирования режимов в полнофункциональном режимном тренажере (ПОРТ) для энергосистем Украины / В. А. Гуреев, О. В. Сангинова. // Технічна електродинаміка. – 2016. – №5. – С. 67–69 (*фахове видання включене до міжнародної наукометричної бази SCOPUS*).

21. Gurieiev V. Simulation and study of modes for full-scale mode simulator for Ukrainian energy systems // Intelligent Energy and Power Systems (IEPS) IEEE Xplore Digital Library. – 2016. – С. 1–4 (*фахове видання включене до міжнародної наукометричної бази SCOPUS*).

22. Гуреев В. А. Методы и средства компьютерной системы обучения и тренажа (КСОТ) персонала объединенной электроэнергетической системы Украины / В. А. Гуреев, О. В. Сангинова. // Моделювання та інформаційні технології. Збірник наукових праць ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова. – 2016. Вип. 76. – С. 95–99.

23. Гуреев В. А. Принципы организации национальной системы обучения и тренажа персонала объединенной электроэнергетической системы Украины / В. А. Гуреев, В. Д. Самойлов, О. В. Сангинова. // Электронное моделирование. – 2016. – №4. – С. 109–121.

24. Авраменко В. М. Комп'ютерний протиаварійний тренажер диспетчерів об'єднаної енергосистеми України / В. М. Авраменко, Н. Т. Юнєєва, Т. М. Гурєєва, В. О. Гурєєв. // Електроніка та зв'язок. – Т. 22, №4, 2017. – С. 69–74.

25. Гуреев В. А. Построение обучающего дистанционного тренажера для подготовки персонала энергетической отрасли / В. А. Гуреев, О. В. Сангинова. // Праці Інституту електродинаміки НАНУ. – 2017. – С. 52–58.

26. Гурєєв В. О. Концепція освітньої професіональної мережі центрів системи підготовки персоналу департаменту електрифікації та електропостачання ПАТ "Українська залізниця" / В. О. Гурєєв, Ю. Г. Куцан, Л.П. Заікіна. // Моделювання та інформаційні технології. Збірник наукових праць ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова. – 2017. Вип. 81.– С. 52–61.

27. Гурєєв В.О. Розробка алгоритмів і програм швидкодіючих методів розрахунку режимів роботи великих електроенергетичних систем (ЕЕС) і енергооб'єднань (ЕО) для тренажерів // Наукові праці ВНТУ, - 2018, № 1, С. 1-5.

28. Куцан Ю.Г. Моделювання і розробка адаптивної автоматизованої системи конструювання сценаріїв протиаварійних тренувань / Ю.Г. Куцан, В.О. Гурєєв, Є.М. Лисенко // Електронне моделювання. – 2018. – №4. – С. 55–64.

29. Гурєєв В.О. Моделювання великих енергосистем для побудови комп'ютерних розподілених тренажерних систем в енергетиці // Моделювання та інформаційні технології. Збірник наукових праць ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова. – 2018. Вип. 83.– С. 94–105.

30. Куцан Ю.Г. Моделирование и визуализация кибератак в энергетике с использованием компьютерных распределенных тренажерных систем/ Ю.Г. Куцан, В.А. Гуреев, Е.Н. Лысенко, Е.В. Аветисян // Електронне моделювання. – 2019. – №1. – С. 81–92.

31. Куцан Ю.Г. Кіберзагрози в електроенергетичних системах України/ Ю.Г. Куцан, В.О. Гурєєв, Є.М. Лисенко, О.В. Аветісян // Електронне моделювання. – 2019. – №2. – С. 63–80.

32. Гурєєв В.О. Дослідження впливу параметрів прискорення збіжності ітераційних процесів моделювання режимів роботи великих енергосистем/ О.В. Сангінова, Є.М. Лисенко // Збірник наукових праць ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова. – 2019. Вип. 87.– С. 84–94.

Свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір:

33. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 66010 від 13.06.2016р. Комп’ютерна програма "Повнофункціональний режимний веб-тренажер "ПОРТ" (ПОРТ) зареєстрована у у Державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір / Гурєєв В.О.

34 Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №86526 від 04.03.2019р. База даних "Інформаційно-режимна модель об’єднаної енергосистеми України" зареєстрована у Державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір / Гурєєв В.О., Лисенко Є.М., Аветісян О.В.

Праці апробаційного характеру:

35. Гуреев В.А., Редковский Н.Н., Суманенков В.Г. Информационная технология управления сложными распределенными техническими системами. тези доповідей І Українська конференція з автоматичного керування. "Автоматика-94". Київ, 18-23 травня 1994, С. 230-231.

36. Гуреев В. А. Применение распределенных архитектур для систем и средств автоматизации процессов сбора данных и управления в энергетических системах Украины // Труды 3-й Международной научно-технической конференции "Нетрадиционные электромеханические и электрические системы". –Т.3. – Крым, Алушта. – 1997. – С. 903-908.

37. Аветисян Е.В., Гуреев В.А., Сангинова О.В. Разработка и применение виртуальных иерархических структур для моделирования режимов, обучения и тренажа персонала ОЕС Украины // Матеріали ІІІ міжнародної науково-технічної

конференції "Оптимальне керування електроустановками". Вінниця, 14-15 жовтня 2015. - С. 4-5.

38. Гурєєв В.О. Розробка алгоритмів і програм швидкодійних методів розрахунку режимів роботи великих електроенергетичних систем (ЕЕС) і енергооб'єднань (ЕО) // Матеріали IVI міжнародної науково-технічної конференції "Оптимальне керування електроустановками" - Наукові праці ВНТУ, 2018, № 1 с. 1-5.

39. Gurieiev V., Sanginova O. Simulation and study of modes for full-scale mode simulator for Ukrainian energy systems // 2nd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems IEPS'2016 (June 7-11, 2016), Kyiv, Ukraine, pp. 97-100.

40. Kutsan Y., Gurieiev V. Creating an international virtual energy cluster for radical increase of staff training and skills level // The third Chinese – Ukraine Science and Technology Forum "Theoretical Basis of Simulation Technology in Energy Sector". Harbin, China, 2017, pp. 166-168.

41. Kutsan Y., Gurieiev V. Technology of using of corporate cloudy infrastructure for development of universal simulators for operatively-controller's personnel of nuclear power plants Ukraine // The Fourth China – Ukraine Forum on Science and Technology. Harbin, China, 2018, pp. 56-57.

42. Гурєєв В.О., Лисенко Є.М. Дослідження збіжності ітераційних методів розрахунку режимів роботи безконтурних електричних мереж // Збірник тез XXXVII науково-технічна конференція молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. – 15 травня 2019 року. – м. Київ. – С. 40-43.

43. Гурєєв В.О. Моделі кібербезпекової компетентності оперативно-диспетчерського персоналу магістральних електромереж України // Збірка праць науково-практичної конференції "Кібербезпека енергетики". – 29 травня – 01 червня 2019 року. – м. Одеса. – С. 15-16.

44. Гурєєв В.О. Веб-орієнтовані технології побудови і організації функціонування тренажерних систем підготовки персоналу енергосистем України // Матеріали науково-практичної конференції «Побудова інформаційного

суспільства: ресурси і технології». – 19-20 вересня 2019 року. – м. Київ. – С. 217-220.

45. Гурєєв В.О., Лисенко Є.М. Модельне конструювання електронних ресурсів для навчання та тренажерної підготовки оперативно-диспетчерського персоналу енергосистем України // Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформація, аналіз, прогноз – стратегічні важелі ефективного державного управління». – 7 листопада 2019року. - м. Київ, С. 86-92.

46. Гурєєв В.О. Контурна модель розрахунку режимів роботи електроенергетичних систем в комп'ютерних тренажерах. // Тези науково-практичної конференції Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України «Безпека енергетики в епоху цифрової трансформації». - 20 грудня 2019 р., Київ. - С. 31-32.

47. Гурєєв В.О., Лисенко Є.М. Система автоматизації розрахунків в комп'ютерних тренажерах персоналу магістральних електричних мереж ОЕС України. // Тези науково-практичної конференції Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України «Безпека енергетики в епоху цифрової трансформації». - 20 грудня 2019 р., Київ. - С. 32-33.

48. Гурєєв В.О., Лисенко Є.М. Автоматизація конструювання та принципи організації тренувальних занять в комп'ютерних тренажерах оперативно-диспетчерського персоналу. // Тези науково-практичної конференції Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України «Безпека енергетики в епоху цифрової трансформації». - 20 грудня 2019 р., Київ. - С. 33-34.

Праці, що додатково відображають наукові результати дисертації:

49. Сулейманов В. Н. Многоцелевая оптимизация режимов работы энергетических систем методом экстремального планирования эксперимента. / В. Н. Сулейманов, В. А. Гуреев, У. О. Саидов. // Энергетика и электрификация. – 1981. – №1. – С. 37-39.

50. Сулейманов В. Н. Оптимизация режимов электроэнергетических систем модифицированным методом наискорейшего спуска и экстремального планирования эксперимента / В. Н. Сулейманов, В. А. Гуреев, У. О. Саидов. //

Электрические сети и системы. Респ. межвед. научн.-техн. сб. – 1981. – №17. – С. 96–100.

51. Сулейманов В. Н. Оптимизация режимов работы электроэнергетических систем методом экстремального планирования эксперимента / В. Н. Сулейманов, В. А. Гуреев, У. О. Саидов. // Вестн. Киевск. политехн. ин-та. Сер. электроэнергетики, 1982. – № 19. – С.61-64.

52. Гуреев В. А. Программное обеспечение диагностирования персонала//Совершенствование технической диагностики энергетического оборудования / В. А. Гуреев, А. И. Ришкевич. – 1984. – С. 101–103.

53. Гуреев В. А. Синтез моделей предметной области противоаварийных тренировок / В. А. Гуреев, О. В. Сулейманова. // Энергетика и электрификация. – 1986. – №4. – С. 16–17.

54. Гуреев В. А. Разработка архитектуры мини базы знаний противоаварийных тренировок / В. А. Гуреев, О. В. Сулейманова. // Энергетика и электрификация. – 1987. - №1. – с.44-46.

55. Гуреев В.А. Автоматизация противоаварийных тренировок оперативного персонала Минэнерго УССР на базе сети микро ЭВМ / В.А. Гуреев, С.В. Колесников, Н.А. Сябер // Энергетика и электрификация. -1989.-№4. – с.55 – 56.

56. Васильев А. В. Система автоматизированного проектирования технологических схем для задач тренажа оперативного персонала с использованием ПЭВМ / А. В. Васильев, В. А. Гуреев, В. Д. Заикин. // Энергетика и электрификация. – 1994. – №1. – С. 25–28.

57. Гуреев В. А. Современные методы и средства построения компьютерных тренажерных и обучающих систем / В. А. Гуреев, В. Н. Сулейманов, Р. Надеран. // Новини енергетики. – 2003. – №5. – С. 39–43.

58. Сябер Н. А. Применение современных тренажерных технологий для обучения персонала в энергетике Украины / Н. А. Сябер, В. А. Гуреев. // Энергетика и электрификация. – 2005. – №6. – С. 45–50.

59. Принципы построения информационной части модели электроэнергетики Украины / В. А. Гуреев, В. Н. Сулейманов, О. В. Сулейманова, Н. Реза. // Электропанорама. – 2011. – №12. – С. 42–44.

60. Сущности и связи информационной части модели энергетики Украины/ В. А. Гуреев, В. Н. Сулейманов, О. В. Сулейманова, Н. Реза. // Электропанорама. – 2012. - № 2. – С. 36-38.

61. Аветисян Е. В. Моделирование режимов, обучение и тренаж персонала с использованием виртуальной объединенной энергосистемы (ВОЄС) Украины / Е. В. Аветисян, В. А. Гуреев, О. В. Сангинова. // Энергетика и электрификация. – 2014. – №9. – С. 28–35.

62. Авраменко В. Н. Методика и программные средства для противоаварийного обучения диспетчерского персонала ОЕС Украины / В. Н. Авраменко, Т. М. Гуреева, В. А. Гуреев. // Электрические сети и системы. – 2016. – №2. – С. 14–20.

Зміст

Вступ 31

Розділ 1 Принципи організації існуючої системи підготовки оперативного персоналу та шляхи її удосконалення 43

1.1 Огляд розвитку та аналіз стану досліджень з технічних і наукових проблем побудови комп'ютерних тренажерів в Україні, ближньому і дальньому зарубіжжі 43

1.2 Технічні і наукові проблеми побудови та функціонування комп'ютерних тренажерів оперативно-диспетчерського персоналу 60

1.3 Аналіз організації роботи з персоналом на об'єктах МЕМ України та вимоги до КТ 63

1.4 Методологічні принципи розробки навчальної бази тренажерних систем підготовки оперативно- диспетчерського персоналу МЕМ 80

1.5 Висновки до першого розділу 86

РОЗДІЛ 2 Онтологічний аналіз предметної області досліджень МЕМ ОЕС України 88

2.1 Дослідження проблеми побудови інформаційної частини моделі МЕМ ОЕС України 88

2.2 Теоретичні основи конструювання інформаційної частини моделі МЕМ 90

2.3 Розробка концептуальної, зовнішніх та внутрішніх схем розподілених кластерних баз даних МЕМ великих енергосистем 94

2.4 Сутності і зв'язки інформаційної частини моделі МЕМ ОЕС України в комп'ютерних тренажерах 98

2.5 Розробка системи автоматизації розрахунків режимів роботи великих енергосистем для комп'ютерних тренажерів 108

2.6 Висновки до другого розділу 138

РОЗДІЛ 3 Теоретико-методологічні основи методів моделювання веб-орієнтованих протиаварійних тренажерів 139

3.1 Теоретичні основи моделювання режимів роботи МЕМ 139

3.2 Дослідження методів прискорення моделювання режимів роботи великих ЕЕС 209

3.3 Багатоопорний метод розрахунку контурних струмів для веб-орієнтованих тренажерних систем 218

3.4 Дослідження результатів моделювання перехідних процесів великих ЕЕС 229

3.5 Висновки до третього розділу 243

РОЗДІЛ 4 Методи розподіленого моделювання комп'ютерних тренажерів оперативного персоналу 245

4.1 Особливості застосування хмарних технологій до конструювання комп'ютерних тренажерів 245

4.2 Теоретичні основи створення та функціонування розподіленої системи підготовки персоналу в енергетиці 251

4.3 Побудова моделі і структури розподіленого середовища для організації комплексної тренажерної підготовки персоналу МЕМ 257

4.4 Веб-орієнтована електронна система навчання та тренажерної підготовки оперативно-диспетчерського персоналу, методологічна підтримка. 265

4.5 Висновки до четвертого розділу 282

РОЗДІЛ 5 Модельна організація функціонування комп'ютерних тренажерів підготовки персоналу МЕМ 284

5.1. Принципи конструювання сучасної електронної системи дистанційного навчання та тренажу персоналу МЕМ 284

5.2 Імітаційний метод конструювання тренувальних занять, сценаріїв штатних і протиаварійних тренувань в МЕМ 302

5.3 Сценарно-педагогічний метод конструювання тренажерних занять. 313

5.4 Принципи та методичні рекомендації конструювання дистанційних курсів за тематикою тренажерної підготовки персоналу 317

5.5 Методи оцінювання компетентності оперативно-диспетчерського персоналу МЕМ ОЕС України 323

5.6 Висновки до п’ятого розділу 327

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 331

Додаток А. Інформація про впровадження результатів дисертаційного дослідження 358

Додаток Б. Реєстрація та робота у системі дистанційного навчання і тренажу персоналу НЕК «Укренерго» 411

Додаток В. Список публікацій здобувача за темою дисертації 421

Перелік умовних позначень

CMS	-	Content Management Systems
LCMS	-	Learning Content Management Systems
LMS	-	Learning Management Systems
SCADA	-	Supervisory Control and Data Acquisition
АВР	-	автоматичне введення резерву
АЕС		атомна електростанція
АПВ	-	автоматичне повторне включення
БД	-	база даних
БОМ	-	багатоопорний метод
ВННЦ	-	віртуальний науково-навчальний центр
ГДС	-	граф дискретних станів
ГІОЦ	-	головний інформаційно-обчислювальний центр
ДЗТ	-	диференційний захист трансформатора
ДЗШ	-	диференційний захист шин
ДК	-	дистанційний курс
ДФЗ	-	диференційно-фазовий захист
ЕЕС	-	електроенергетична система
ЕК	-	електропостачальна компанія
ЕМ	-	електрична мережа
ЕО	-	енергооб'єднання
ІПМЕ	-	інститут проблем моделювання в енергетиці
ІМ	-	імітаційно-режимний метод
КТ	-	комп'ютерний тренажер
КТС	-	комп’ютерна тренажерна система
МСЗ	-	максимальний струмовий захист
МЕМ		магістральні електричні мережі
НТП	-	навчально-тренувальний пункт
НТЦ	-	навчально-тренажерний/тренувальний центр
ОЕС	-	об'єднана електроенергетична система

ОС - оцінка стану

ПЕМ і РЕМ - Підприємства і райони електричних мереж

ПІ - посадова інструкція

ПК - персональний комп'ютер

ПМТ - повномасштабний тренажер

ПНЗ - причинно-наслідковий зв'язок

ПОРТ - повнофункціональний режимний веб-тренажер

ПР - перехідний режим

ПРВВ - пристрій резервування при відмові вимикачів

ПТ - протиаварійне тренування

РВН - рівняння вузлових напруг

РЗА - релейний захист і автоматика

РКС - розрахунок контурних струмів

РСНТ - регіональна система навчання і тренажу

РЩУ - резервний щит управління

СМС - сценарно-моделююча структура

СПМ - сценарно-педагогічний метод

СУБД - система управління базою даних

ТЕС - теплова електростанція

ТОЕ - теоретичні основи електротехніки

ТП - тренажерна підготовка

ТрЗ - тренажерне заняття

ТрТЕС - Трипільська ТЕС

УР - усталений режим

УТЦ - учбово-тренувальний центр

ЦПКРП - центр підготовки кадрів та реабілітації персоналу

ЧЕМ МЕМ - черговий електромонтер магістральних електромереж

ЧІС АЕС/ТЕС - черговий інженер АЕС або ТЕС

ВСТУП

Актуальність теми. Темп розвитку світової цивілізації безпосередньо залежить від можливостей технічно розвинутих держав забезпечувати населення і промисловість якісною електроенергією у потрібних обсягах за умови надійності роботи електроенергетичного сектору.

Сьогодні в Україні помітна тенденція збільшення частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у складі наявних потужностей на тлі швидкого старіння і деградації енергетичного генерувального і розподільного устаткування. Це призводить до ускладнення структур генерації/споживання енергії і систем управління ними.

Нині в МЕМ ОЕС України існує величезна потреба у великій кількості тренажерних систем для організації сучасної професійної тренажерної системи підготовки оперативно-диспетчерського персоналу для трьох рівнів ієрархії управління на постійній основі. До них відносяться рівні: системного оператора (НЕК "Укренерго"), регіональні диспетчерські центри (електроенергетичні системи Центральної, Південно-західної, Західної, Південної, Дніпровської і Північною ЕЕС), включаючи їх високовольтні підстанції напругою 220 - 750кВ, і електропостачальні компанії (обленерго) з підстанціями в місцях їх підключення до МЕМ.

Незважаючи на велику кількість нормативних документів (наказів, положень про роботу з персоналом [2 - 7]) і посадових інструкцій, що регламентують процеси тренажерної підготовки оперативно-диспетчерського персоналу в магістральних електромережах ОЕС України, ефективних програмних інструментальних засобів конструювання тренажерних систем і сценаріїв тренувальних занять (ТрЗ), особливо для безпосередньої участі галузевих фахівців, все ще недостатньо. Відповідно до галузевих рекомендацій, які є обов'язковими для застосування на робочих місцях, робота з персоналом МЕМ з тематики тренажерної підготовки дозволена без використання комп'ютерних засобів та технологій, хоча при цьому і рекомендується застосовувати різні технічні засоби навчання (ТЗН). У МЕМ для проведення тренажерної підготовки, як правило, використовуються роздруковані

на папері схеми і дисплейні форми (відеограми) SCADA, а також результати розрахунку деяких режимів за темами ТрЗ, що проводяться. Це значно збільшує час проведення ТрЗ і не дозволяє підвищити їх якість.

У зв'язку з цим, спостерігається стійка тенденція зростання вірогідності виникнення великих системних аварій в ОЕС України, яка пов'язана з критичним фізичним зносом і деградацією практично усього енергетичного устаткування ОЕС.

У МЕМ відчувається гострий недолік сучасних тренажерних засобів для формування і підтримки ключових компетентностей оперативно-диспетчерського персоналу, а саме, готовності швидко розпізнавати умови виникнення різних системних аварій, попереджати і швидко усувати їх наслідки.

Пропонована автором розподілена електронна веб-орієнтована тренажерна система підготовки оперативно-диспетчерського персоналу МЕМ є складною людино-машинною системою. Ця система структурно може бути представлена у вигляді наступних взаємозв'язаних підсистем, що забезпечують функції підготовки тренувальних занять (ТрЗ) і контролю навичок персоналу виявляти умови виникнення, попереджати і ліквідовувати наслідки аварій: моделюючого комплексу МЕМ, бази даних МЕМ, графічного людино-машинного інтерфейсу, конструктора ТрЗ і бази знань оцінки рівня навичок і готовності персоналу ліквідовувати різні аварії.

Як модель об'єкту управління (ОУ) МЕМ тренажерної системи використовується система нелінійних рівнянь алгебри, що описує усталені режими у складі ЕЕС. Такі системи можуть бути вирішені тільки ітераційними методами (простої ітерації, Зейделя, Ньютона і їх модифікаціями). До недоліків цих методів відноситься нестійкість збіжності і критична залежність від початкових наближень.

У загальному вигляді процес тренажерної підготовки може бути описаний у вигляді послідовного циклічного аналізу оперативно-диспетчерським персоналом поточних режимних параметрів ОУ – ЕЕС або ОЕС, за допомогою інформації, представленої на диспетчерському щиті, SCADA і отриманою по телефону від оперативно-диспетчерського персоналу паралельно працюючих ЕЕС і підстанцій,

подальшому виборі і ухваленні рішення про необхідність дії, що управляє, на ОУ (наприклад, зміна конфігурації електричної мережі, генерації або навантаження) для цього моменту часу і подальший аналіз результатів цієї дії - адекватну реакцію ОУ у вигляді результатів рішення систем нелінійних рівнянь, які описують режим великих енергосистем, - наборів параметрів режимів.

В процесі тренажерної підготовки на ОУ можуть впливати також результати роботи засобів автоматики і релейного захисту (РЗ і А), основна функція яких полягає в забезпеченні безпеки електроенергетичного устаткування МЕМ. В цьому випадку персонал також повинен уміти аналізувати усі наслідки роботи засобів автоматики, які можуть зробити певний вплив на вибір рішення.

У разі неможливості отримання достатньо адекватних результатів реакції ОУ в прийнятний для ухвалення оперативного рішення диспетчером інтервал часу із-за не збіжності ітераційного методу з невідомих причин або відсутності існування (фізичній реалізації) режиму, який повинен виникнути після виконання таких дій, відповідна тренажерна система не може бути використана за призначенням.

Тому, в роботі сформульована і вирішена науково-технічна проблема розроблення теорії побудови веб-орієнтованих тренажерних систем оперативно-диспетчерського персоналу магістральних електромереж з врахуванням особливостей їх впровадження, масштабування та підтримки функціонування в умовах ОЕС України.

Важливою є також завдання визначення параметрів, що забезпечують збіжність ітераційних методів рішення нелінійних рівнянь алгебри, які моделюють простір існуючих (що фізично реалізовуються) режимів роботи МЕМ великих ЕЕС, для забезпечення створення, організації і підвищення ефективності функціонування розподілених електронних тренажерних систем підготовки персоналу МЕМ. Визначення простору існуючих (що фізично реалізовуються) режимів роботи МЕМ великих ЕЕС здійснюється до рішення системи нелінійних рівнянь, шляхом перевірки обмежень на допустимі (номінальні) значення параметрів режиму МЕМ: напруги вузлів, струмів гілок і балансу потужностей ЕЕС для розрахункового моменту часу.

Розробка надійніших методів моделювання, засобів організації, побудови і забезпечення функціонування комп'ютерних розподілених тренажерних систем в аспекті формування у оперативно-диспетчерського персоналу МЕМ стійких навичок розпізнавання умов виникнення і ліквідації великих аварій (ключових компетентностей) є важливими науково-технічними завданнями. Така електронна система навчання і тренажерної підготовки оперативно-диспетчерського персоналу повинна мати вбудовані інструментальні засоби і можливості, які в роботі називаються системою модельного конструювання та призначені для її розвитку, модернізації і вдосконалення.

Подібні дослідження і розробки, спрямовані на вирішення даної проблеми, виконуються науковими колективами і компаніям як в ближньому зарубіжжі, наприклад, в Росії, Польщі, Литві, так і в дальньому, наприклад, в США, Канаді, Японії, Китаї та інших країнах.

Значний внесок у розвиток теорії систем управління великими ЕЕС і ОЕС, побудови комп’ютерних тренажерів, тренажерних систем і технологій, створення математичних моделей їх функціонування та вдосконалення, автоматизації процесів конструювання сценаріїв протиаварійних тренувань внесли відомі вітчизняні та зарубіжні вчені: В.М. Авраменко, О.Ф. Буткевич, В.А. Веніков, А.Ф. Верлань, С.Д. Винничук, О.В. Кириленко, П.Д. Лижнюк, В.В. Павловський, В.С. Перхач, М.А. Рабинович, В.Д. Самойлов, О.В. Скрипник, В.М. Сулейманов, О.Г. Чачко, В.Г. Холмский, Г. Крон, S. Gissinger, P. Chaumes, J.-P. Antoine, A. Bihain, C. Bernard та ін.

Метою дисертаційної роботи є розробка і застосування веб-орієнтованих тренажерних систем оперативно-диспетчерського персоналу МЕМ шляхом побудови відповідних математичних моделей, обчислювальних методів, принципів і алгоритмів для формування і контролю ключових компетентностей персоналу з розпізнавання та попередження умов виникнення аварійних ситуацій і ліквідації їх наслідків.

Для досягнення мети роботи вирішувалися наступні основні задачі:

1. Проаналізувати актуальні технічні і наукові проблеми створення веб-орієнтованих тренажерних систем підготовки персоналу магістральних електромереж ОЕС України;

2. Виконати онтологічний аналіз предметної області досліджень та створити розподілену систему автоматизації розрахунків;

3. Виконати теоретичні і експериментальні дослідження методів розрахунку режимів роботи великих енергосистем, моделі яких є важливою складовою веб-орієнтованих тренажерних систем;

4. Розробити набір моделей і процедур комп’ютерних технологій конструювання сценаріїв тренувальних занять;

5. Розробити метод модельного конструювання комп'ютерних тренажерів, включаючи підсистеми формування структур початкових даних, зберігання і відображення результатів моделювання, із застосуванням веб-орієнтованих технологій;

6. Розробити алгоритми і промислові програмні комплекси для моделювання усталених режимів і перехідних процесів великих енергосистем - об'єктів управління (ОУ) у складі веб-орієнтованих тренажерних систем та протиаварійних тренажерів;

7. Розробити набір інструментальних засобів модельної підтримки процесів побудови і моделювання тренувальних занять для стійкого формування і підтримки компетентностей оперативно-диспетчерського персоналу магістральних електромереж.

Об’єкт дослідження - процеси функціонування веб-орієнтованої системи підготовки персоналу на підприємствах і в організаціях магістральних електромереж ОЕС України.

Предмет дослідження - методи моделювання режимів роботи енергосистем, математичні і комп'ютерні моделі організації, побудови і забезпечення функціонування веб-орієнтованих протиаварійних тренажерів оперативно-диспетчерського персоналу магістральних електромереж.

Методи дослідження.

Прикладна теорія систем, обчислювальні методи алгебри, графів та теорія функцій комплексних змінних – для дослідження режимів роботи ЕЕС та ОЕС. Дослідження та оптимізація коефіцієнтів прискорення ітераційних процесів методів розв'язку нелінійних систем алгебри, які моделюють режими роботи електроенергетичних систем, виконувалися за допомогою методів теорії факторного експерименту.

Комп'ютерне моделювання та експериментальні дослідження розроблених моделей, методів конструювання і засобів автоматизації створення веб-орієнтованих тренажерних систем підготовки персоналу в енергетиці виконано за допомогою розробленого автором комплексу програм у вигляді веб-орієнтованого повнофункціонального режимного тренажеру ПОРТ.

Наукова новизна одержаних автором результатів.

Наукова новизна, отриманих в роботі результатів, визначається системним підходом до формулювання і узагальнення завдань важливої науково-прикладної проблеми розроблення теорії побудови веб-орієнтованих тренажерних систем оперативно-диспетчерського персоналу магістральних електромереж з врахуванням особливостей їх впровадження, масштабування та підтримки функціонування в умовах об'єднаної електроенергетичної системи (ОЕС) України. **Новизну** роботи складають наступні положення.

Вперше запропоновано:

- метод організації процесів моделювання КТ, зокрема: визначення складу та структури концептуальної схеми предметної області досліджень, підготовка первинної інформації для моделюючого комплексу веб-орієнтованих тренажерних систем;

- система автоматизації розрахунків на базі багатоопорної топологічної моделі мережі ЕЕС та ОЕС, яка на відміну від наявних дає змогу враховувати у розрахункових моделях вироджені контури, що можуть утворюватися окремим опорними (балансуючими) вузлами.

Удосконалено:

- підхід до створення тренувальних занять на основі використання заздалегідь підготовленої повномасштабної моделі електричної мережі, представляючи моделі управління для тренувальних занять, що розробляються, у вигляді наборів даних (зрізів) або у вигляді функціональних залежностей;

- технологію конструювання функціональних груп моделей стану об’єкта управління веб-орієнтованих тренажерних систем на основі аналізу протиаварійної робочої діяльності оперативно-диспетчерського персоналу у вигляді наборів певних параметрів. Використання таких моделей різко зменшує вимоги до продуктивності персональних комп’ютерів (ПК), задіяних в процесі навчання і тренажерної підготовки персоналу тренувальних занять.

Набули подальшого розвитку:

- метод побудови моделі управління об'єктами електричної мережі, що відповідає моделі робочої діяльності персоналу підчас виконання тренувальних завдань в процесі їх створення, яка, на відміну від моделі об'єкту, дає змогу представляти набори сценаріїв тренувальних занять у вигляді семантичної мережі, вузлами якої є відповідні стани об’єктів управління після чергового збурення, а зв’язки відображають процеси моделювання реакції моделі об’єктів управління на відповідні збурення у вигляді зміни станів режимів;

- метод розрахунку комплексних параметрів усталених режимів і перехідних процесів роботи енергосистем підвищеної продуктивності, орієнтований на ітераційне урівноваження струмів і потужності контурів;

- метод формування і підтримки ключових компетентностей оперативно-диспетчерського персоналу МЕМ ОЕС України.

Практичне значення одержаних результатів. Результати досліджень використовувались при виконанні 5 господарських договорів під керівництвом автора, що підтверджено відповідними актами. Розроблені тренажерні системи були впроваджені в ПрАТ НЕК "Укренерго" і використовуються на 137-и високовольтних підстанціях напругою 220 …750 кВ. У 2004 році програмні

комплекси тренажерних систем оперативних перемикань в електричних мережах були впроваджені в учбовий процес двох кафедр факультету електроенерготехніки та автоматики Київського політехнічного інституту ім. Ігоря Сікорського. Починаючи з 2007 року у Центрі підвищення кваліфікації керівників і спеціалістів Мінекоенерго КПІ ім. Ігоря Сікорського проводяться заняття з підвищення кваліфікації диспетчерів районів електромереж, центральних диспетчерських служб енергосистем та енергопостачальних компаній з використанням розробленого автором повнофункціонального режимного тренажера ПОРТ.

Особистий внесок здобувача. Наукові положення і результати, що увійшли до дисертації, отримані здобувачем особисто. Роботи [8 - 15] написано самостійно. В друкованих працях, опублікованих у співавторстві, дисертанту належить: в [16] – постановка задачі, основні ідеї, визначення системи допущень та умов реалізації, розробка алгоритмів і створення комп'ютерної програми оптимізації ЕЕС, розробка її структури та складу підсистем; в [17] – побудова інформаційної моделі великих енергосистем, розробка дидактичної моделі та моделюючих алгоритмів, дослідження і реалізація алгоритмів і програм; в [18] – постановка задачі, розробка і адаптація дидактичної моделі оцінки результатів тренажерної підготовки у вигляді енергетичного рейтингу, розробка алгоритмів і програм; в [19] – постановка задачі, розробка і реалізація програм, дослідження властивостей Якобіану, розробка алгоритмів розрахунку елементів матриці Якобі, проведення розрахункових експериментів; в [20] – постановка задачі, основні ідеї, розробка програм, розробка алгоритму розрахунку режимів роботи електричних мереж, проведення розрахункових експериментів.; в [21] – постановка задачі розрахункових експериментів, розробка і реалізація алгоритмів розрахунку усталених режимів роботи великих енергосистем; в [22] – постановка задачі об’єднання алгоритмів одночасного розрахунку усталених режимів і оптимізації активних втрат потужності, розробка і реалізація алгоритмів і програм; в [23] – постановка задачі, основні ідеї, розробка і реалізація алгоритмів і програм розрахунку усталених режимів великих енергосистем, розрахункові дослідження граничних режимів; в [24] – постановка задачі, розробка і реалізація алгоритмів і

програм моделюючих комплексів усталених режимів великих енергосистем; в [25] – постановка задачі, основні ідеї, розробка моделей елементів енергосистем, розробка і реалізація алгоритмів і програм, дослідження поведінки Якобіану, розрахункове дослідження усталених режимів роботи великих енергосистем; в [26] – основні ідеї, розробка і реалізація алгоритмів і програм, підготовка вихідних даних, дослідження умов виродження якобіану, розрахункові дослідження; в [27] – постановка задачі побудови інформаційної моделі, розробка і реалізація алгоритмів і програм, узагальнення принципів побудови швидкісних алгоритмів розрахунку усталених режимів великих енергосистем; в [28]– постановка задачі побудови інформаційної моделі, розробка алгоритмів оптимізації ітераційних процесів, розрахункові дослідження, розробка .алгоритмів; в [29] – постановка задачі побудови системи класифікації помилок оперативно-диспетчерського персоналу, алгоритми побудови сценаріїв протиаварійних тренувань, реалізація алгоритмів і програм; в [30] – постановка задачі побудови алгоритмів управління складними технічними об’єктами, числові дослідження, узагальнення принципів побудови систем управління високовольтними підстанціями; в [31] –основні ідеї, постановка задачі побудови інформаційної моделі об’єднаної електроенергетичної системи України, розробка моделей віртуальних ієрархічних структур для моделювання режимів і тренажерної підготовки оперативно-диспетчерського персоналу ОЕС України; в [32] – постановка задач побудови розподіленої інформаційної системи моделювання режимів великих електроенергетичних систем, вибір засобів моделювання, проведення розрахункових досліджень; в [33] – постановка задачі побудови повнофункціональних комп’ютерних тренажерів, розробка інформаційних моделей, програмна реалізація комплексів розрахунку усталених режимів, розрахункові дослідження; в [34] – основні ідеї, розробка алгоритмів і програм; в [35] – постановка задачі побудови сучасної професійної системи навчання та тренажерної підготовки персоналу у вигляді мережі науково-навчальних пунктів; в [36] – постановка задачі, основні ідеї, розробка алгоритмів і програмна реалізація графічного інтерфейсу, розробка системи відображення результатів моделювання режимів роботи енергосистем, побудова розподіленого

моделюючого середовища, ретроспективний аналіз проблеми; в [37]– основні ідеї, постановка задачі побудови алгоритмів функціонування дистанційних тренажерів, програмна реалізація комп'ютерного тренажера, розробка топологічних моделей великих енергосистем; в [8] – постановка задачі побудови інформаційної моделі, реалізація програм, числові дослідження, формування принципів організації професійної системи підвищення кваліфікації; в [9] – постановка задачі, основні ідеї, розробка алгоритмів побудови адаптивних методів конструювання сценаріїв протиаварійних тренувань, розробка програм; в [38] – постановка задачі, розробка інформаційних моделей об'єктів критичної інфраструктури, алгоритми візуалізації умов виникнення кіберзагроз, ретроспективний аналіз задач; в [39] – постановка задачі, основні ідеї, розробка принципів побудови моделей чутливості, розробка алгоритмів розпізнавання кібрзагроз, які виникають і пов'язані із технологічними режимами роботи енергосистем.

Апробація результатів дисертації.

Основні положення і результати роботи доповідались та обговорювались на: семінарах Наукової ради ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України (2016-2019); І-й Українській конференції з автоматичного керування "Автоматика-94" (Київ, 1994), ІІІ-й міжнародній науково-технічній конференції "Нетрадиционные электромеханические и электрические системы" (Крим, Алушта, 1997); ІІІ-й міжнародній науково-технічній конференції "Оптимальне керування електроустановками" (Вінниця, 2015), XIV-й міжнародній науково-технічній конференції „Проблеми сучасної електротехніки - 2016" (Київ, 2016), The second International Conference on Intelligent Energy and Power Systems, IEEE, видання включене до наукометричної бази SCOPUS (Kyiv, 2016),, ІІІ-й міжнародній науково-технічній конференції "Оптимальне керування електроустановками" (Вінниця, 2017), V-й науково-практичній конференції "Сучасні методи аналізу усталених режимів електричних мереж та стійкості електроенергетичних систем. Новітні досягнення у проведенні тренажерної підготовки оперативно-диспетчерського персоналу" (с. Славське, 2017), ІІ міжнародній науково-технічній конференції "SMART-ТЕХНОЛОГІЇ В ЕНЕРГЕТИЦІ ТА ЕЛЕКТРОНІЦІ - 2017"

(смт. Лазурне Скадовського району Херсонської області, Україна, 2017), The third Chinese – Ukraine Science and Technology Forum "Theoretical Basis of Simulation Technology in Energy Sector" (Harbin, China, 2017), Qingdao International Technology Transfer Conference & Aoshan Forum for Eurasia on Science and Technology (Qingdao, China, 2017), VI міжнародна наукова конференція "Моделювання-2018" (Київ, 2018), The Fourth China – Ukraine Forum on Science and Technology "Technology of using of corporate cloudy infrastructure for development of universal simulators for operatively-controller's personnel of nuclear power plants Ukraine" (Harbin, China, 2018), V-й всеукраїнському семінарі інженерів енергетиків в рамках XVI-го міжнародного форуму паливно енергетичний комплекс України: сьогодення та майбутнє (Київ, 2018), науково-практичній конференції "Про впровадження закону України "Про ринок електричної енергії" (с. Славське, 2019), XXXVII-й науково-технічній конференції молодих вчених та спеціалістів інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України (Київ, 2019), науково-практичній конференції "Кібербезпека енергетики" інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України (Одеса, 2019), V всеукраїнській науково-практичній конференції «Перспективі напрямі захисту інформації» Одеської національної академії зв'язку ім. О.С. Попова (Одеса, 2019), XVIII міжнародній науково-практичній конференції «Побудова інформаційного суспільства: ресурси і технології» (Київ, 2019), XII міжнародній науково-практичній конференції «Інформація, аналіз, прогноз – стратегічні важелі ефективного державного управління» у рамках IV Міжнародного форуму «INNOVATION MARKET» (Київ, 2019), науково-практичній конференції «Безпека енергетики в епоху цифрової трансформації» (Київ, 2019), XVI-й міжнародній науково-технічній конференції „Проблеми сучасної електротехніки - 2020" (Київ, 2020).

Публікації результатів наукових досліджень.

Основний зміст дисертаційної роботи відображено у трьох монографіях [40 - 42], 57 публікаціях (29 статей у фахових наукових виданнях [16 - 39, 43], 11 із них у міжнародних наукометричних базах (SCOPUS та ін.), двох авторських свідоцтвах

[10, 44], 14 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій [11- 15, 45 - 52] та 14 публікаціях в галузевих виданнях [53 - 65]).

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана в Інституті проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України в рамках науково-дослідних робіт: "Дослідження та розробка віртуального середовища Національної системи електронного навчання та тренажу персоналу об'єднаної електроенергетичної системи України", шифр "ПЕРСОНАЛ", державний реєстраційний № 0117U004348 і "Розробка методів оцінювання чутливості Об’єднаної енергосистеми України до кібернетичних впливів", шифр "Вплив", державний реєстраційний № 0118U005320.

Структура та обсяг дисертаційної роботи.

Дисертація складається із анотації, вступу, п’яти розділів основної частини роботи, висновків, списку використаних джерел (333 бібліографічних найменувань) та 3 додатків. Загальний обсяг сягає 432 сторінок, в тому числі 298 сторінок основного тексту, 99 рисунків, 12 таблиць.

РОЗДІЛ 1
ПРИНЦИПИ ОРГАНІЗАЦІЇ ІСНУЮЧОЇ СИСТЕМИ ПІДГОТОВКИ ОПЕРАТИВНОГО ПЕРСОНАЛУ ТА ШЛЯХИ ЇЇ УДОСКОНАЛЕННЯ

1.1 Огляд розвитку та аналіз стану досліджень з технічних і наукових проблем побудови комп'ютерних тренажерів в Україні, ближньому і дальньому зарубіжжі

Вперше в історії розвитку енергетики України необхідність комплексного підходу до розробки ефективної системи роботи з персоналом та створення сучасної системи навчання та тренажу сформулював, обґрунтував і запропонував для швидкої реалізації Міністр енергетики та електрифікації України Скляров В.Ф. у 1983 році. Ця ініціатива була підтримана директором Інституту проблем моделювання в енергетиці (ІПМЕ) НАН України академіком НАН України Пуховим Г.Є. Коротко шляхи вирішення цієї проблеми були сформульовані в [66].

Під керівництвом академіка Пухова Г.Є. провідні фахівці ІПМЕ забезпечили наукове керівництво робіт зі створення Регіональної системи навчання і тренажу (РСНТ) України. З ініціативи Склярова В.Ф. в 1983 році був створений відділ РСНТ Головного інформаційно-обчислювального центру (ГІОЦ) Міненерго України, основним напрямком діяльності якого було в найкоротші терміни забезпечити функціонування РСНТ. Фахівці відділу РСНТ брали активну участь в розробці програмного забезпечення тренажерів і впровадження наукових розробок ІПМЕ. Ці роботи проводилися з використанням найсучасніших на той час засобів обчислювальної техніки: М4030, СМ-1420 тощо. З метою спільного з ІПМЕ виконання науково-технічних досліджень режимів роботи енергосистем України, розробки автоматизованих навчальних систем і різноманітних тренажерів був створений спеціалізований навчально-тренувальний полігон (Київ, Фрунзе, 85).

Перераховані вище роботи почалися після створення першого в СРСР навчально-тренажерного центру (НТЦ) Трипільської теплової електростанції ТЕС (ТрТЕС) в 1980 році. У створенні цього НТЦ взяли участь ГІОЦ Міненерго УРСР, Інститут автоматики, ІЕД АНУ, Южтехенерго і багато інших. Також вперше в

історії розвитку енергетики України в НТЦ ТрГРЕС був створений повномасштабний тренажер для блоків потужністю 300 МВт теплових електростанцій (ТЕС), дільничні тренажери найбільш важливих підсистем силового обладнання ТЕС і психофізіологічна лабораторія для тестування і реабілітації персоналу. Для моделювання режимів роботи енергоблоків ТЕС була використана найсучасніша на той час обчислювальна техніка - ЦЕВМ типу М4030.

НТЦ ТрГРЕС став не тільки тренажерної базою для операторів всіх ТЕС колишнього СРСР, а й брав на навчання персонал з багатьох країн, включаючи Індію, Пакистан, Алжир і ін. На базі НТЦ ТрГРЕС регулярно проводилися державні і міжнародні змагання професійної майстерності операторів енергоблоків.

Досвід експлуатації НТЦ ТрГРЕС дозволив сформулювати основні напрямки розвитку РСНТ України. Серед першочергових була поставлена задача розробки тренажерів для оперативно-диспетчерського персоналу підстанцій різних класів напруги, енергосистем, теплових і атомних електростанцій у мережі відповідних НТЦ і навчально-тренувальних пунктів (НТП). Важливим напрямком роботи стало створення навчально-методичної бази для організації процесів навчання і тренажу для РСНТ України. Було прийнято рішення призначити НТЦ ТрГРЕС головною організацією по створенню НТЦ і НТП для РСНТ України і покласти на нього завдання координації всіх робіт в Україні за тренажеробудування на період до 2000 року. Колективу розробників і організаторів створення НТЦ ТрГРЕС, до складу якого увійшли Пухов Г.Є., Скляров В.Ф., Ципцюра Р.Д., Чачко А.Г., у 1982 році присуджено Державну Премію УРСР в області науки і техніки.

Одночасно в Україні продовжували працювати нечисленні навчальні комбінати, які в майбутньому планувалося об'єднати в загальну мережеву систему РСНТ і проводити єдину технічну політику в області навчання і тренажу персоналу.

З ініціативи Склярова В.Ф. були розроблені і видані накази Міненерго СРСР від 31.08.1982 р. №353 та Міненерго УРСР від 12.10.1982 р. № 189. У цих наказах йшла мова про етапи, терміни та фінансування робіт з виконання "Координаційного плану розробки, створення і забезпечення функціонування

регіональної системи підготовки і тренажу оперативного персоналу енергопідприємств Міненерго УРСР на 1982-85 р.р. і до 1990 р.".

Відповідно до Координаційного плану в 1987 році при ВЕО «Донбасенерго» на базі навчального комбінату був створений Центр підготовки кадрів та реабілітації персоналу (ЦПКРП).

Проект ЦПКРП був виконаний Львівським відділенням "Южтехенерго". У результаті були створені перші комп'ютерні класи із застосуванням найсучасніших персональних комп'ютерів, створений макет диспетчерського щита з 12 телевізорів "Електрон" (3х4) у вигляді загального поля для відображення однолінійних схем підстанцій і електричних мереж, а також відеограм SCADA-системи (Supervisory Control and Data Acquisition). Дисплейний щит SCADA-системи керувався спеціальним контролером на базі мікропроцесора "Електроніка-60". Сталі режими Донбаської енергосистеми моделювалися на міні-ЕОМ СМ-1420 і відображалися на дисплейний щит. Сценарії для диспетчерів підприємств районів електричних мереж (ПЕМ і РЕМ) було створено силами ІПМЕ і відділу РСНТ ГІОЦ Міненерго УРСР. Додатково була створена система психофізіологічного тестування і реабілітації на базі профілакторію ЦПКРП. Середня чисельність персоналу, який навчався і проходив тренування в ЦПКРП, становила понад 1000 чоловік в рік. Тренажери і навчальні системи, поставлені в комп'ютерних класах, повністю забезпечували сучасною системою навчання і тренажу весь персонал Донбаської енергосистеми. Планувалося розгорнути аналогічний центр на базі Ладижинської ГРЕС.

Велику роботу з розробки сучасних систем навчання і тренажерів провело ПАТ "ЛьвівОРГРЕС". На підприємстві виконано розробку комплексних комп'ютерних тренажерів для енергоблоків 200 і 300 МВт ТЕС, створений і введений в експлуатацію комплексний комп'ютерний тренажер (КТ) енергоблоку 200 МВт для навчання, тренування та інструктажу персоналу ТЕС ТОВ «Східенерго». Серед основних напрямків роботи можна виділити розробку і постачання комплексних і спеціалізованих КТ, у тому числі організацію навчального процесу, розробку і постачання комплексних багаторівневих Web-

орієнтованих систем навчання персоналу підприємств енергетики, створення навчально-тренувальних центрів підготовки оперативного персоналу. На жаль, в 90-х роках всі роботи з розвитку РСНТ України практично були припинені.

В атомній енергетиці усвідомлення необхідності вдосконалення методів і засобів системи підготовки оперативного персоналу для всіх атомних станцій колишнього СРСР прийшло до керівників галузі після Чорнобильської катастрофи [67 - 70].

Вивчивши досвід підготовки оперативного персоналу провідних країн світу в атомній індустрії, Міністерство енергетики СРСР ухвалило рішення про будівництво повномасштабного тренажера (ПМТ) для реакторів ВВР-1000 серії 320. Був підписаний контракт з американською компанією S3 Technology на будівництво першого ПМТ для 5 блоку Запорізької атомної електростанції (АЕС) і на початку 90-х цей тренажер був встановлений в НТЦ Запорізької АЕС.

Після відмови України від ядерної зброї країни-гаранти відкрили фінансування програми допомоги, яка полягала в підготовці персоналу і вдосконаленні навчально-методичної бази НТЦ АЕС. Ця програма також включала в себе постачання обчислювальної техніки і забезпечення фінансування будівництва нових ПМТ в складі НТЦ на українських АЕС. Практично всі перераховані нижче роботи фінансувалися урядом США.

У 1995 році було розпочато будівництво ПМТ 1 блоку Хмельницької АЕС. Для передачі технології створення ПМТ і підготовки фахівців з обслуговування та модернізації майбутніх ПМТ при Міністерстві енергетики України був створений "Науково-технічний центр з підготовки персоналу для АЕС". В даний підрозділ увійшли фахівці Інституту кібернетики НАН України та фахівці галузі.

На початку 2013 року за кошти ДП "НАЕК "Енергоатом" була проведена подібна модернізація ПМТ для 3 блоку Південноукраїнської АЕС. Наприкінці 2015 року ПМТ 3 блоку Південноукраїнської АЕС переданий в промислову експлуатацію.

На початку 2015 року за кошти ДП "НАЕК "Енергоатом" розпочато роботи з модернізації ПМТ для 1 блоку Південноукраїнської АЕС, включаючи роботи з

впровадження нового середовища розробки і створення нових динамічних моделей. Був встановлений потужний багатопроцесорний моделюючий комп'ютер з операційною системою типу Linux.

У всіх перерахованих вище роботах активну участь брали фахівці "Науково-технічного центру з підготовки персоналу для АЕС ДП «НАЕК «Енергоатом». Важливим принципом державної політики в електроенергетиці, зокрема, пов'язаної з використанням ядерної енергії, є забезпечення енергооб'єктів персоналом найвищої кваліфікації [4, 5, 71 - 76]. Реалізацію цих принципів покладено на Міненерго України шляхом створення, планування і координації функціонування системи підготовки персоналу. Міністерство зобов'язане визначати перспективи і напрямки розвитку системи підготовки персоналу, прогнозувати обсяги підготовки, перепідготовки та підвищення кваліфікації персоналу, розробляти кваліфікаційні характеристики, галузеві стандарти, компетентності та багато іншого.

Нині в енергетиці України нагромадилася величезна кількість проблем і головною з них, безсумнівно, є повна відсутність єдиної технічної політики в галузі навчання і тренажу персоналу.

У структурі системи управління енергетикою України не передбачена така організація, на яку можна було б покласти розробку типових навчальних планів і програм професійного навчання персоналу, науково-методичного та інформаційного забезпечення системи підготовки персоналу, впровадження нових технологій і передового досвіду, досягнень науки і техніки. Жодна з організацій не вирішує в цілому завдань забезпечення необхідного рівня кваліфікації персоналу галузі, підвищення його ефективності і якості, здійснення контролю якості організації загальної та спеціальної підготовки персоналу, перевірки його знань. У той же час робота з персоналом є однією з основних задач всіх керівників підприємств електроенергетики. Належне вирішення цього завдання дозволить підвищити продуктивність праці і забезпечити надійну, безпечну і безаварійну експлуатацію обладнання.

Одим з пріоритетних завдань, затверджених на державному рівні Стратегії сталого розвитку «Україна-2020» [77], є реформування енергетики. У розробленій Енергетичної стратегії України до 2020-2035 р.р. однією з найважливіших цілей вказана інтеграція в енергетичний простір ЄС і посилення глобальних зв'язків [75].

Водночас у стратегії реформування ПрАТ «НЕК «Укренерго» [74] розвиток персоналу є одним з 11 елементів стратегії. У рамках впровадження довгострокової системи розвитку персоналу заплановано створити корпоративну автоматизовану базу знань та тестування, розробити програми начання на базі навчальних центрів, впровадити ігрові методи навчання та оцінювання протягом 2019-2020 р.р., а до 2026 року переорієнтувати навчання на розвиток компетенцій, впровадження інновацій, практичне вдосконалення технічних навичок. Система навчання і підвищення кваліфікації персоналу має бути максимально автоматизованою та проходити у дистанційній формі, містити новітні інструменти, завдяки яким навчання стане цікавим і ефективним з точки зору впливу на знання і навчички і використання бюджету. Згідно з [74], у основі системи розвитку і навчання персоналу має бути системне вивчення потреб, планування і оцінка результатів.

Технічну політику в області навчання і тренажу персоналу важливо планувати на тривалий період, визначити джерела фінансування, відповідальних за забезпечення всіх підготовчих робіт, включаючи питання координації та контролю виконання.

Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАН України, використовуючи значні напрацювання і досягнення в цій області, накопичений досвід наукових і освітніх установ України і ЄС, пропонує в якості провідної організації, створити сучасну систему підготовки персоналу в енергетиці шляхом об'єднання у новий науково-освітній кластер всіх установ країни, які виконують наукові дослідження у сфері енергетики та роблять освітні послуги за енергетичною тематикою з метою створення якісної сучасної системи роботи з персоналом [30, 34, 36].

Головною метою є побудова сучасної професійної системи підготовки персоналу в енергетиці на базі новітніх інформаційних електронних технологій

навчання і тренажерних технологій з метою обов'язкового стійкого формування, перевірки та контролю наявних ключових компетентностей оперативно-диспетчерського персоналу енергетики України.

На сьогодні найбільш важливим напрямом соціального розвитку усіх країн світу є розвиток і ефективне використання інноваційних технологій електронного навчання і дистанційних тренажерів в усіх областях виробничої діяльності, особливо в енергетичному секторі. Такі технології широко використовуються для дослідження і розробки нових підходів до навчання персоналу і перевірки ефективності їх застосування на практиці.

2015 року [78] Україна зробила перші кроки до інтеграції з мережею системних операторів передачі електроенергії в Європі – ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity), яка об'єднує 43 організації (серед яких ATSOI, BALTSO, ETSO, NORDEL, UCTE и UKTSOA) із 36 країн світу, таких як Швейцарія, Великобританія, Данія, Німеччина та інші, з метою забезпечення стабільної експлуатації, оптимального управління і безпеки європейської системи постачань електрики для задоволення потреб внутрішнього енергетичного ринку. Декларованими цілями організації є забезпечення взаємодії системних операторів загальноєвропейського і регіонального рівня; сприяння інтересам системних операторів; нормо творчість відповідно до законодавства Європейського союзу. Місією ENTSO-E є забезпечення надійної експлуатації, оптимального управління і розвитку європейської системи передачі електроенергії з метою забезпечення енергетичної безпеки і задоволення потреб внутрішнього ринку енергії. Інтеграція ОЕС України з ENTSO-E передбачена Угодою про Асоціацію між Україною і ЄЕС і є важливою частиною забезпечення енергетичної незалежності України. Сьогодні синхронно з ENTSO-E працює частина ОЕС України – «Острів Бурштинської ТЕС».

У енергетичному секторі деяких країн ENTSO-E вже створено і успішно використовується велика кількість електронних навчальних систем і тренажерів. Проте, основними недоліками цих систем є, як правило, їх вузька сфера застосування, відсутність уніфікації і замкненості. Причинами зазначених

недоліків є те, що освітня та навчально-методична база експлуатованих тренажерів і автоматизованих систем навчання створювалась різними розробниками на різних етапах розвитку енергосистем з використанням різних проектних технологій, програмних засобів, методів і стандартів [79 - 84].

До недоліків розглянутих вище систем можна віднести той факт, що різні моделі, які використовуються на практиці для дослідження і розрахунку режимів роботи великих енергосистем, зазвичай представлені з різною мірою деталізації. Як правило, можливості додавати інформацію і коригувати зміст в цих системах і програмних середовищах, украй обмежені.

Таким чином, в найближчому майбутньому усі інноваційні технології, що з'являються, потребують використання обов'язкового електронного навчання, нових навчальних курсів для персоналу, у тому числі з використанням різних дистанційних тренажерів на базі повних моделей енергетики країн.

Реалізація запропонованої концепції побудови сучасної професійної системи підготовки персоналу в енергетиці складається з наступних етапів (Рис. 1.1):

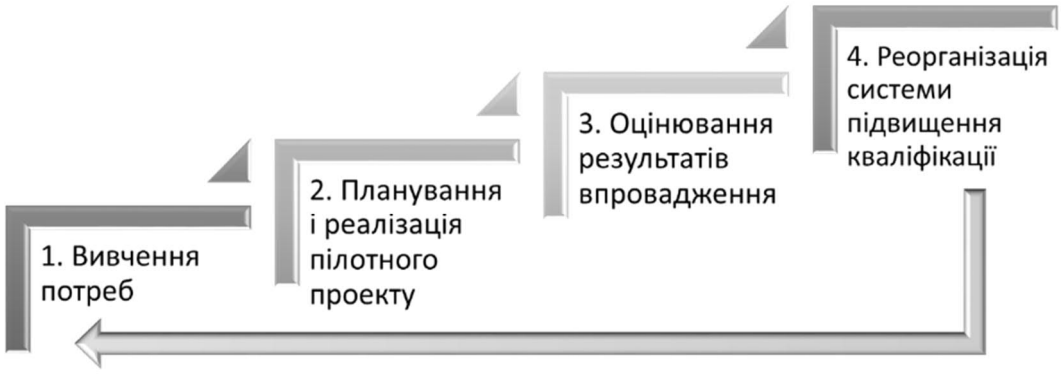


Рис. 1.1. Етапи побудови сучасної професійної системи підготовки персоналу в енергетиці

Наведені етапи побудови включають дослідження і аналіз поточного стану існуючої системи підвищення кваліфікації оперативно-диспетчерського персоналу в енергетиці та суміжних галузях промисловості України, технічного і інформаційного забезпечення навчального процесу.

У наступних розділах наведені методологічні та прикладні аспекти теорії розробляння теорії побудови сучасної професійної системи підготовки персоналу МЕМ ОЕС України.

Розглянемо режимні диспетчерські тренажери МЕМ Америки і Європи. У роботі [85] наведена коротка інформація стосовно режимних комп'ютерних тренажерів МЕМ Америки і Європи. Відмічається, що специфіка оперативно-диспетчерського управління у багатьох країнах Європи і в Північній Америці полягає в тому, що роль диспетчерів в управлінні електроенергетичною системою і в ліквідації наслідків не така висока, як в Росії. Міра інтегрованості системних операторів істотно нижче, їх повноваження локальні і обмежені. Слідством цього являється частіший перехід локальних аварій в масштабні системні відключення з розділенням системи на незалежні синхронні зони.

У США, як правило, оперативно-диспетчерський персонал не має вищої енергетичної освіти. Енергетичні компанії вимушені робити акцент на навчання азам, основам. Дуже часто робота ведеться на типовій учбовій схемі, далеко не завжди адаптованій до конкретних місцевих умовам.

Зважаючи на це, для режимних тренажерів можна виділити дві ніші: первинне навчання персоналу на оператора електроенергетичних систем (із видачою відповідної ліцензії) і використання тренажера як деякого механізму-симулятора для попереднього відробітку певних дій операторів на режим енергосистеми і для створення інструкцій.

Пріоритетні вимоги до тренажера для сертифікації персоналу:

1. Наявність власної системи відображення і підготовки даних.

2. Наявність учбової енергосистеми з великою номенклатурою устаткування.

3. Зважаючи на специфіку застосування РТД понижені вимоги до "тяжкості" модельованих схемно-режимних ситуацій.

Характерним представником цього типу тренажерів є ПК EPRI OTS Науково-дослідного інституту електроенергії (Electric Power Research Institute, EPRI), США.

Вимоги до тренажера, що імітує оперативну обстановку в диспетчерському центрі:

1. Робота з моделлю реальної енергосистеми.

2. Глибока інтеграція в SCADA -систему компанії-оператора.

3. Достовірність моделювання поведінки енергосистеми, що дозволяє вірно відтворювати наслідки дій диспетчерів або операторів в реальній оперативній обстановці.

Майже будь-яка західна компанія, що займається розробкою EMS/DMS додатків для електроенергетичного ринку, пропонує власний, глибоко інтегрований режимний тренажер.

У роботі [85] стисло наведено основні характеристики представників вказаних тренажерів.

Тренажер EPRI OTS використовується для підготовки операторів і інженерів диспетчерських центрів в наступних напрямах: отримання основних відомостей о поведінці енергосистеми; основні функції оператора в штатних і аварійних ситуаціях; ліквідація аварій різної міри складності; робота в команді при ліквідації серйозних аварій і відновленні енергосистеми.

ПК EPRI OTS моделює лише тривалі і над тривалі перехідні процеси [86].

Головною особливістю є припущення про тотожність швидкостей усіх синхронних машин. Це не дозволяє відтворити, наприклад, асинхронний хід [86].

Диференціальні і алгебраїчні рівняння вирішуються по черзі.

Диференціальні рівняння вирішуються неявним методом трапецій 2-го порядку точності. Мінімальний крок інтеграції дорівнює 1 сек [86].

Основою розрахунку потокорозподілу в ПК EPRI OTS є ньютонівська процедура рішення системи рівнянь. У останній версії комплексу реалізовані три методи, побудовані на лінеаризації рівнянь режиму [86].

Основа математичного опису моделі середнього руху EEC була розроблена General Electric EPRI у кінці 1970-х років. Програмно вона була реалізована на початку 1980-х років в університеті штату Арізона. Продукт поставлявся багатьма компаніями: ABB, DSI, Incremental Systems, NSR, Siemens, Telegyr, Transdyn Controls. База даних тренажера і розрахункове ядро розроблялася на Фортрані-77. З тренажером поставляється невелика (67 розрахункових вузлів) учбова

енергосистема. Існує можливість імпорту даних за стандартом CIM (IEC61970 - IEC61968). Є можливість інтеграції із сторонніми системами по протоколу ICCP [86, 87].

Тренажер EPRI OTS є найпоширенішим тренажерним комплексом в США, використовуваним переважно для ліцензування операторів енергосистем.

Тренажер Fast DTS, створений компаніями ABB і Tractebel Engineering [88], позиціонується як тренажер з високою точністю моделювання. Вкладом з боку ABB послужила платформа Network Manager™, що володіє потужною базою даних, засобами навчання і інфраструктурою. У основу розрахункової моделі був покладений режимний імітатор Eurostag [89].

Спектр модельованих перехідних процесів моделі електроенергетичної системи ПК Fast DTS не відрізняється від інших режимних тренажерів диспетчера, за винятком ПК EPRI OTS [89].

Алгебро-диференціальні рівняння динаміки розв’язуються не по черзі, а спільно, з використанням А-стійкого неявного методу.

Для вирішення зазвичай використовується квазіньютонівська процедура (матриця Якобі формується і факторизується не на кожній ітерації і не на кожному кроці інтеграції). Передбачена альтернативна можливість вирішувати лінеаризовану систему рівнянь ітеративним методом GMRES (generalized minimal residual method) [90], заснованим на розкладанні вектору відхилів по базису Крилова [88].

Використаний метод розв’язку алгебро-диференціальних рівнянь страхує від можливої нестійкості рішення, але це досягається за рахунок різкого росту обчислювальної складності алгоритму. Крок інтеграції фіксований (10-40 мс). Можливий розрахунок несиметричних режимів [88].

Учбова енергосистема з тренажером не поставляється. Технологічна межа розрахункового модуля складає 200 генераторів і 2000 електричних шин, що складає приблизно 1000 розрахункових вузлів [89].

З огляду на те, що тренажер поставляється на платформі Network Manager™ компанії ABB, інтеграція із SCADA-системами надзвичайно висока. Втім, в окремих випадках тренажер може поставлятися і окремо [87].

В [85] наведено порівняння методів побудови моделей електроенергетичних систем і розрахунку потокорозподілу у РТД. Показано, що кожен з розглянутих вище КТ має ряд істотних недоліків.

Тренажер EPRI OTS майже не моделює електромеханічні перехідні процеси - величина кроку інтеграції більше 1 секунди. Це обмежує сферу застосування цього ПК тренуванням і навчанням персоналу диспетчерського центру тільки в нормальних режимах. Моделювання перехідних процесів у важких режимах при такій величині кроку інтеграції, дає тільки якісний і не завжди вірний результат.

Тренажер ABB і Tractebel Engineering, незважаючи на надійніший спосіб розрахунку системи алгебро-диференційних рівнянь, має дуже маленький список модельованого устаткування і серйозні обмеження на розмірність схеми. При цьому є присутнім те ж саме спрощення і зневага до швидких перехідних процесів, характерна для інших тренажерів, - величина кроку інтеграції більше 10 мс.

Основними відмінностями російських тренажерів є класична "послідовна" схема розв’язку алгебро-диференційної системи рівнянь, відсутність можливості розрахунку несиметричних режимів, а також відсутність вимог глибокої інтеграції в системи замовників.

Основні російські режимні тренажери спочатку проектувалися як окремі програмні комплекси. Використовуються два підходи до розв’язку системи алгебро-диференційних рівнянь моделі перехідних процесів:

- система розв’язується спільно і має високу надійність, при великих обчислювальних витратах;
- алгебраїчні і диференціальні системи рівнянь розв’язуються по черзі - прийнятна надійність при відносно невеликих обчислювальних витратах.

Обидва підходи мають плюси і мінуси. Підхід з окремим розрахунком режиму мережі між кроками інтеграції простіший алгоритмічно, але має меншу

надійність. Підхід з єдиною системою алгебро-диференціальних рівнянь надійніший, але складений алгоритмічно, і сучасні програмні засоби для рішення таких систем рівнянь великої розмірності не задовольняють вимогам до продуктивності режимних тренажерів диспетчера навіть на сучасній технологічній платформі. Таким чином, розробка моделі електроенергетичної системи для режимного тренажера диспетчера з роздільним розв’язанням рівнянь алгебраїчних і диференціальних рівнянь електро - і теплосилового устаткування є доцільною і перспективною.

Розрахунок потокорозподілу у РТД необхідно використати в двох випадках: для розрахунку початкового стану мережі перед тренуванням і під час розрахунку перехідних процесів. Розрахунок початкового стану потрібний для того, щоб уникнути небажаних перехідних процесів, обумовлених відсутністю балансу потужностей/струмів у вузлах ЕМ. Розрахунок потокорозподілу під час тренування є частиною, що зв'язує один з одним диференціальні рівняння теплосилового устаткування під час моделювання перехідних процесів.

Найбільш широко поширені у світі РТД використовують наступні методи розрахунку потокорозподілу:

1. Метод Зейделя [91];

2. Метод Ньютона із спрощеною матрицею Якобі (Fast decoupled loadflow - FDL) [92];

3. Рішення системи лінійних рівнянь у формі балансу струмів методом Гауса [91];

4. Спільне рішення системи алгебро-диференціальних рівнянь методом GMRES [90].

Більшість цих методів мають досить сильно виражені недоліки. Розрахунок потокорозподілу методом Зейделя простий алгоритмічно, дає можливість врахувати нелінійний характер залежності навантаження від напруги, але має погану збіжність і практично непридатний до використання в ЕМ з великою кількістю трансформаторів.

Зневага нелінійними елементами при розрахунку потокорозподілу під час моделювання перехідних процесів призводить до відмінних від реальності показників напруги, струмів і перетікань потужності.

Метод спільного рішення алгебро-диференціальних рівнянь є в усіх сенсах досить перспективним, проте поточні обчислювальні потужності персональних комп'ютерів не дозволяють в реальному часі моделювати перехідні процеси в енергосистемах розмірністю більше 1000 вузлів [88].

На дуже велику увагу заслуговують розробки програмно-апаратних комплексів (ПАК) канадської фірми Real Time Digital Simulator (RTDS Technologies Ltd. - https://www.rtds.com/ та https://hvdc.ca/knowledge-base/v).

Програмно-апаратний комплекс RTDS (Канада) для конструювання КТ оперативно-диспетчерського персоналу МЕМ призначений для цифрового моделювання ЕЕС в реальному режимі часу.

ПАК RTDS використовується для випробування реальних облаштувань АРВ синхронних генераторів, облаштувань PMU вітчизняних і іноземних виробників, дослідження умов виникнення реальних технологічних порушень в електричних мережах та ін.

ПАК RTDS є потужним інструментом що дозволяє проводити наукові дослідження на якісно новому рівні не лише для вирішення теоретичних завдань, але і для практичного дослідження поведінки реальних облаштувань автоматичного управління і захисту.

За допомогою симуляторів RTDS і PSCAD можна виконувати розробку моделей ЕЕС в режимі реального часу для перевірки правильності функціонування і вибору уставок пристроїв РЗ і ПА, досліджувати перехідні процеси при комутаційних і атмосферних перенапруженнях, хвильові процеси, функціонування і перевірку правильності налаштувань автоматичних регуляторів збудження (АРВ) синхронних генераторів, функціонування і перевірку правильності налаштувань облаштувань автоматичного введення резерву (АВР), моделювати в реальному часі ЕЕС, у тому числі ЕЕС, що містять облаштування FACTS, SVC, HVDC, включаючи їх системи автоматичного управління та оптимізувати режими роботи ЕЕС.

Також можливо виконувати розробку і дослідження пристроїв і алгоритмів моніторингу, захисту і управління на основі синхронізованих векторних вимірів (WAMS, WACS, WAPS), моделювати, у тому числі в реальному часі, ЕЕС з розподіленою генерацією, включаючи поновлювані джерела енергії, розробляти і досліджувати алгоритми управління і захисту енергосистем з розподіленою генерацією.

Для розрахунку електромагнітних перехідних процесів (EMTP) використовується алгоритм Г. Доммеля (H.Dommel) з перетворенням в еквівалентну заступну схему, що складається з джерел струму і опорів:

- диференціальні рівняння перетворяться в алгебрїчні і виконується чисельна інтеграція методом трапецій;
- використовується рівномірний крок розрахунків з періодом 50 мкс (зазвичай) і 2 мкс (напівпровідникові перетворювачі).

Моделювання в реальному часі на RTDS виконується паралельно на декількох процесорах. Також темп виконання розрахунків задається високо стабільним тактовим генератором. Моделювання поведінки системи за час, наприклад, 1 секунди виконується рівно 1 секунду. У системах жорсткого реального часу усі розрахунки, необхідні для визначення стану моделі і обробка станів портів введення/виводу інформації, завершуються строго впродовж заданого кроку розрахунку.

Програмне забезпечення PSCAD встановлюється на ПК користувача і забезпечує: побудову моделі, графічний інтерфейс для введення схем і параметрів моделі, досконалу бібліотеку моделей компонентів(ВЛ і КЛ, трансформатори, електродвигуни і генератори, напівпровідникові ключі, системи автоматичного регулювання, пасивні елементи і джерела, і ін.), компілятор виконуваних файлів для завантаження в комплекс RTDS, виконання моделювання, графічний інтерфейс управління процесом моделювання і спостереження за ним, зручну систему для перегляду і аналізу результатів моделювання, забезпечення автоматичних дій на моделях по заданому сценарію.

Комплекси RTDS дозволяють моделювати енергетичні системи різною

конфігурації, що включають традиційні види устаткування - повітряні і кабельні лінії; електродвигуни і генератори; силові і вимірювальні трансформатори; РЗА, системи автоматичного управління і регулювання; сучасні пристрої:

- установки подовжньої компенсації;
- напівпровідникові силові комплекси FACTS, HVDC, SVC;
- формувати сигнали для дії на вторинне устаткування;
- сприймати сигнали від вторинного устаткування і з урахуванням цих сигналів змінювати конфігурацію моделі.

В роботі [85] стисло розглянуто режимні тренажери диспетчерів (РТД) ЕЕС, що сьогодні знаходяться в експлуатації на пострадянському просторі: "Фенікс" та програмний комплекс (ПК) "Ретрен".

Особливістю цих тренажерів є те, що основний акцент у створенні інструментальних засобів і методології навчання персоналу зроблений на тренуванні диспетчерського персоналу і підтримці його належної кваліфікації Це пов'язано із специфікою диспетчерського управління в Росії і країнах ближнього зарубіжжя. Роль і відповідальність диспетчера тут надзвичайно високі, що робить необхідним і актуальним високу кваліфікацію диспетчерського персоналу і її підтримку на цьому рівні. Специфіка російського підходу до навчання і тренування диспетчерського персоналу робить пріоритетними наступні вимоги до РТД:

1. Режимний тренажер повинен експлуатуватися на моделі енергосистеми диспетчерського центру.

2. Робота в режимі тренування має бути максимально схожою на щоденну роботу диспетчерського персоналу.

3. Має бути присутньою можливість моделювати широку видову різноманітність аварій високої складності. Іншими словами, режимний тренажер повинен стійко працювати у "важких" режимах, з низькою (0.5-0.9 в.о.) і наднизькою (0.1-0.5 в.о.) відносно номінальних напругою.

РТД "Фенікс" призначений для проведення протиаварійних тренувань оперативного персоналу об'єднань енергосистем, енергосистем і електричних

мереж. Цей тренажер був розроблений Сибірською філією ГОЦ енергетики в 1990-х роках.

РТД "Фенікс" моделює необхідні перехідні процеси, проте електромеханічні моделюються дуже приблизно [93].

Для вирішення диференціальних рівнянь застосований метод Рунге-Кутти 2-го порядку точності з постійним кроком інтеграції. Для вирішення проблем чисельної стійкості в РТД "Фенікс" є можливість завдання користувачем розміру кроку інтеграції в межах 0.01-0.5 с [93].

Для прискорення розрахунків на етапах тривалих перехідних процесів система рівнянь спрощується, крок інтеграції збільшується на порядок і приблизно в стільки ж разів знижується трудомісткість розрахунків на фіксованому інтервалі часу.

Для розрахунку потокорозподілу під час початкового балансування режиму застосовується комбінація методів Зейделя і методу квазіньютонівської процедури, матриця Якобі якої не враховує залежність небалансів активної потужності від рівнів напруги, а реактивної потужності - від фаз напруги (fast decoupled load flow) [92], а по ходу тренування використовується тільки метод Зейделя. Розрахунок потокорозподілу ведеться у формі балансу потужностей. Несиметричні режими тренажер не відтворює [93].

Технологічна межа розрахункового модуля РТД "Фенікс" - схеми розмірністю 1500-2000 розрахункових вузлів. Технологічна межа графічної системи відображення - схеми комутаційного рівня сумарною розмірністю 15000-20000 шин [87].

При розрахунку немає можливості використання декількох ядер процесора.

Програмний комплекс "Ретрен" розроблений НТЦ Електроенергетики як інтегрована багатофункціональна система для вирішення ряду важливих завдань оперативного управління режимом енергооб'єднання в масштабі реального часу. До них відносяться завдання навчання оперативно-диспетчерського персоналу, оцінки тяжкості поточного режиму, перевірки надійності режимів ЕЕС і ЕО при

виводі в ремонт основного устаткування, перевірки можливих дій оперативного персоналу і ряд інших [87].

Розв’язок системи диференціальних рівнянь проводиться із застосуванням неявної схеми інтеграції. На кожному кроці інтеграції вирішується нелінійна система рівнянь мережі у формі балансу струмів. Ця система вирішується ітераційним методом, причому на кожній ітерації система рівнянь мережі лінеарізується для вирішення методом Гауса з трикутною факторизацією матриці провідності. При рішенні рівнянь мережі в матрицю провідності перед факторизацією (після будь-якої комутації) в діагональні елементи матриці вносяться поправочні коефіцієнти, які потім враховуються у векторі струмів. Несиметричні режими тренажер не відтворює [87].

Заявлена межа розрахункового модуля ПК "Ретрен" при розрахунку в режимі реального часу - схеми розмірністю 1000-1500 розрахункових вузлів.

При розрахунку відсутня можливість використати декілька ядер процесора. ПК "Ретрен" має власну систему відображення і може встановлюватися як самостійний комплекс. Формат зберігання даних по устаткуванню - власний. Інтеграція із сторонніми системами відображення - тільки по власному протоколу. Також в комплекс входить інтерфейс для підготовки початкових даних, інтерфейс управління тренуванням і інтерфейс для редагування початкових даних.

Нині цей комплекс використовується в декількох філіях компанії ВАТ "ФСК ЄЕС".

1.2 Технічні і наукові проблеми побудови та функціонування комп'ютерних тренажерів оперативно-диспетчерського персоналу

Важливою умовою сталого та успішного розвитку суспільства України сьогодні, як це вже раніше було згадано, є інтеграційна тенденція ОЕС України до ENTSO-E ЄС.

Головною метою інтеграції України до ЄС у галузі освіти є розбудова взаємовигідної співпраці з державами - членами ЄС для створення в Україні життєздатної системи безперервного навчання і виховання, досягнення високих

освітніх рівнів, забезпечення можливостей постійного духовного самовдосконалення особистості, формування інтелектуального та культурного потенціалу як найвищої цінності нації. Одним з найголовніших завдань освіти в Україні є відродження і подальша розбудова національної системи освіти з метою підготовки висококваліфікованих фахівців, рівень знань і вмінь яких повністю відповідав би вимогам ринкової економіки. З огляду на це постає актуальне питання щодо комплексної наукової розробки і практичного забезпечення, по суті, нової системи підготовки фахівців нової генерації [78].

Аналіз досвіду конструювання комп’ютерних тренажерів дозволив сформулювати найбільш важливі технічні проблеми тренажерних технологій в енергетиці різних країн:

1. Реальні умови виробничої діяльності оперативно-диспетчерського персоналу, пов'язані з безперервністю технології виробництва електричної енергії, призводять до збільшення термінів підготовки кваліфікованого персоналу і утрудняють підтримку високого рівня його готовності до попередження і швидкої ліквідації наслідків аварій. Штатні умови роботи значно превалюють над аварійними ситуаціями.

2. Поточна виробнича діяльність персоналу пов'язана з необхідністю обробки великого об'єму інформації в стислі терміни, що часто є причиною помилкових дій. При цьому персонал випробовує дуже високу психологічну відповідальність за результати своєї діяльності в умовах підвищених ризиків [85].

3. В процесі виробничої діяльності виникає необхідність безперервної підтримки кваліфікації оперативно-диспетчерського персоналу на високому рівні.

4. Різноманіття типів і режимів роботи реального електроенергетичного устаткування, на базі якого створюються КТ, утрудняє їх тиражування та поширення.

5. В процесі створення моделей об'єкту управління (ОУ) і виробничої діяльності персоналу розробники КТ часто прибігають до значних спрощень і допущень, що призводить до зниження достовірності результатів, особливо це стосується динамічних моделей ОУ.

6. Створення якісних КТ вимагає досить тривалого часу, а подальша експлуатація - залучення значних обчислювальних потужностей і великої кількості висококваліфікованих спеціалістів.

Ці технічні проблеми можуть бути вирішені шляхом застосування технологій модельного конструювання КТ і навчальних програм на їх базі при навчанні кваліфікованих кадрів в енергетиці, спираючись на спеціальні інструментальні засоби.

Застосування такої технології дозволяє самим фахівцям-енергетикам брати найактивнішу участь в створенні комп'ютерних тренажерів в якості експертів на етапі проектування і в якості безпосередніх розробників.

Під модельним конструюванням не тільки КТ, а і більш широкого кола комп'ютерних застосувань, розуміють створення спеціалізованої автоматизованої системи комп'ютерних інструментальних засобів для проектування, розробки та використання цільових систем дослідження, навчання і тренажерної підготовки за допомогою засобів обчислювальної техніки, комп'ютерних тренажерів силами самих кваліфікованих фахівців-енергетиків [85]. Ці інструментальні засоби призначені також для постійної модернізації і розвитку відповідних автоматизованих систем.

В якості найбільш важливих наукових проблем тренажерної комп'ютерної тематики можна виділити наступні:

1. Формування засад теорії побудови веб-орієнтованих тренажерних систем на базі онтологічних досліджень та аналізу структури предметної області електроенергетичних систем з метою побудови принципів функціонування розподілених моделюючих систем;

2. Теоретичні і експериментальні дослідження методів розрахунку режимів роботи великих енергосистем, моделі яких є важливою складовою веб-орієнтованих тренажерних систем;

3. Розробляння адекватних моделей елементів ЕЕС і ОЕС для використання в алгоритмах і процедурах комп'ютерних технологій конструювання сценаріїв тренувальних занять і протиаварійних тренувнь;

4. Розробляння методів модельного конструювання комп'ютерних тренажерів, включаючи підсистеми формування структур початкових даних, зберігання і відображення результатів моделювання, із застосуванням веб-орієнтованих технологій;

5. Розробляння алгоритмів програмних комплексів для моделювання усталених режимів і перехідних процесів великих енергосистем - об'єктів управління (ОУ) у складі веб-орієнтованих тренажерних систем та протиаварійних тренажерів.

1.3 Аналіз організації роботи з персоналом на об’єктах МЕМ України та вимоги до КТ

Наявність ключових компетентностей персоналу енергетичної галузі забезпечує безперервну надійну експлуатацію обладнання та режимів роботи ЕЕС та ЕО і стосуються, в першу чергу, процесів диспетчерського управління, організації безпечних умов експлуатації електрообладнання, розпізнавання умов виникнення та розвитку різноманітних аварій, формування і постійної підтримки навиків швидкої ліквідації аварій, технології (правил) штатних і аварійних перемикань на підстанціях, в електричних мережах та інше.

У всьому світі такі компетентності персоналу формуються виключно за допомогою повнофункціональних тренажерів.

Сьогодні як в Україні, так і в країнах Європейського союзу, існує значна кількість невирішених проблем в області підготовки, навчання і підвищення кваліфікації персоналу ЕЕС і ЕО на постійній основі (безперервне навчання), що не дозволяє швидко залучати та використовувати кращі світові освітні стандарти і технології навчання.

Питання професійного навчання працівників частково регулюються Законами України [5, 73]. Згідно директивних документів [2, 3, 7], зобов'язання з підтримки належного рівня кваліфікації персоналу покладені, в основному, на керівництво (організації роботодавців) енергетичних підприємств всіх рівнів існуючої ієрархії управління. Однак на практиці можливості керівників державних

підприємств сьогодні сильно обмежені обсягами державного фінансування та новими ринковими стосунками.

Існуюча система підвищення кваліфікації персоналу енергетики в Україні базується на дуже застарілій системі підвищення кваліфікації очної форми навчання з обов'язковим відривом від виробництва, як правило, один раз на три роки протягом 2-3 тижнів. Згідно з [2], визначено зобов’язання роботодавців щодо забезпечення підвищення кваліфікації працівників не рідше одного раз на п’ять років. В Україні практично відсутня важлива складова тренажерної підготовки оперативно-диспетчерського персоналу, що дуже стримує формування і підтримку потрібної кваліфікації персоналу, наприклад, за тематикою розпізнавання умов виникнення і ліквідації різноманітних аварій.

Сьогодні відрядні витрати (проїзд, харчування і проживання) значно перевищують витрати безпосередньо на саме навчання та підвищення кваліфікації. Такі умови і порядок підвищення кваліфікації утруднюють формування повноцінних однорідних за фахом груп, адекватного змісту навчально-методичної бази і використання ефективних сучасних методів навчання і тренажерної підготовки. Існують також великі проблеми в підборі і підготовці навчально-інструкторського персоналу, що залучається до підвищення кваліфікації. Найкращий шлях для рішення цих проблем – послідовно формувати еліту керівного складу оперативно-диспетчерського персоналу за допомогою інструментальних засобів, орієнтованих на сучасні веб-орієнтовані комп’ютерні тренажери.

З метою підвищення надійності роботи ОЕС України Міністерством енергетики і вугільної промисловості України був виданий наказ № 991 від 24.12.2013 року «Про затвердження Правил проведення протиаварійних тренувань персоналу електричних станцій та мереж». Правила встановлюють порядок планування, підготовки, проведення та підбиття підсумків протиаварійних тренувань, які проводять у процесі виробничої діяльності з персоналом, в обов'язки якого входить прийняття рішень і виконання дій з оперативного управління та експлуатаційного обслуговування енергоустаткування електричних станцій та

мереж. У цих Правилах застосовуються вимоги великої кількості діючих нормативно-правових актів. Серед найбільш важливих - Положення про державний енергетичний нагляд за режимами споживання електричної і теплової енергії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 07 серпня 1996 року № 929 (у редакції постанови Кабінету Міністрів України від 13 лютого 2006 року № 131); Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів, затверджених наказом Міністерства палива та енергетики України від 25 липня 2006 року № 258, зареєстрованих у Міністерстві юстиції України 25 жовтня 2006 року за № 1143/13017 (у редакції наказу Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 13 лютого 2012 року № 91); Правил взаємовідносин між державним підприємством "Національна енергетична компанія "Укренерго" та суб'єктами (об'єктами) електроенергетики в умовах паралельної роботи в складі об'єднаної енергетичної системи України, затверджених наказом Міністерства палива та енергетики України від 02 червня 2008 року № 303, зареєстрованих у Міністерстві юстиції України 23 липня 2008 року за № 673/15364; Інструкції про розслідування і облік технологічних порушень на об'єктах електроенергетики і в об'єднаній енергетичній системі України, затвердженої наказом Міністерства палива та енергетики України від 09 червня 2005 року № 225, зареєстрованої в Міністерстві юстиції України 10 березня 2009 року за № 208/16224 (у редакції наказу Міністерства палива та енергетики України від 29 грудня 2008 року № 668); Положення про спеціальну підготовку і навчання з питань технічної експлуатації об'єктів електроенергетики, затвердженого наказом Міністерства палива та енергетики України від 09 лютого 2004 року № 75, зареєстрованого в Міністерстві юстиції України 05 квітня 2004 року за № 418/9017.

У цих Правилах терміни вживаються в таких значеннях:

аварійна ситуація - стан потенційно небезпечного об'єкта, що характеризується порушенням меж та/або умов безпечної експлуатації;

аварійний режим - технологічне порушення в роботі обладнання, об'єкта електроенергетики чи енергосистеми в цілому, яке супроводжується відхиленням хоча б одного з експлуатаційних параметрів за граничнодопустимі значення, що

може призвести до пошкодження та виходу з ладу обладнання, припинення електропостачання або до виникнення загрози життю і здоров'ю людей та завдати шкоди довкіллю;

ведучий тренування - особа з числа адміністративно-технічного персоналу;

диспетчерська команда - вказівка здійснити аоо утриматись від здійснення конкретної дії з керування технологічними режимами та експлуатаційним станом обладнання об'єктів електроенергетики або електроустановок споживачів електроенергії;

керівник тренування - особа з числа адміністративно-технічного персоналу суб'єкта або об'єкта електроенергетики, яка бере участь у протиаварійному тренуванні та відповідає за організацію, підготовку та проведення тренування;

контролююча особа - особа, яка здійснює контроль за діями осіб, які тренуються, бере участь у підбитті підсумків та оформленні протоколу протиаварійного тренування (або іншого звітного документа);

мережне тренування - тренування, під час якого аварійна ситуація створюється на обладнанні певної дільниці електричної мережі і на підстанціях;

міжсистемне протиаварійне тренування - тренування, у якому аварійна ситуація охоплює мережі та обладнання кількох (не менше трьох) енергосистем з розташованими на їх територіях електричними станціями, магістральними електричними мережами, мережами енергопостачальних організацій та іншими об'єктами електроенергетики;

об'єктове протиаварійне тренування - тренування на обладнанні окремого об'єкта електроенергетики, у якому аварійна ситуація охоплює його обладнання, що підключено до ОЕС України або магістральної теплової мережі (наприклад, електричні станції (крім ядерної частини атомної електричної станції), електричні підстанції, котельні);

оперативний персонал - персонал, що виконує оперативне або оперативно-технологічне управління та експлуатаційне обслуговування енергоустаткування електростанцій та мереж;

особи, що тренуються, - особи з числа оперативного та оперативно-

виробничого персоналу відповідних об’єктів або суб’єктів електроенергетики, яких згідно з програмою тренувань залучено до виконання умовно-реальних дій з локалізації та ліквідації аварійної ситуації, режиму або аварії на закріплених об’єктах;

програма тренування - зміст і план дій, направлених на вирішення тренувального завдання; протиаварійні тренування - одна з обов'язкових форм роботи з персоналом;

робоче місце - місце постійного або тимчасового перебування працівника в процесі трудової діяльності;

системне протиаварійне тренування - тренування, у якому аварійний стан охоплює обладнання визначеної ділянки однієї енергосистеми з розташованими в ній електростанціями, електричними мережами, підстанціями та іншими енергооб’єктами і в якому разом з оперативним персоналом електроенергетичної системи бере участь оперативний персонал не менше ніж двох енергопостачальних компаній, однієї і більше електростанцій та відповідний персонал окремих найбільш енергоємних споживачів;

тренувальне завдання - конкретна задана дія (вправа) для учасників тренування;

учасники тренування - керівники, контролюючі особи, спостерігачі, ведучі і посередники та особи, що тренуються.

Перелічені терміни були використані і покладені в основу запропонованої автором комп’ютерної технології побудови і організації функціонування веб-орієнтованих тренажерних систем оперативно-диспетчерського персоналу МЕМ.

Згідно з [4] - протиаварійні тренування (далі - тренування) є однією з основних форм підготовки оперативного персоналу електроенергетичних систем, енергогенеруючих, енергопостачальних, теплопостачальних компаній та енергопідприємств електроенергетики України. Метою тренувань є відпрацювання, закріплення та перевірка навичок виконання персоналом самостійних дій з оперативної ліквідації аварійних ситуацій, режимів та аварій, навчання оперативного персоналу найбільш оптимальним діям для їх

попередження та ліквідації, а також перевірка вміння персоналу надавати першу допомогу, користування індивідуальними засобами захисту тощо. Під час тренувань виявляють недоліки і розробляють рекомендації, спрямовані на підвищення надійності роботи устаткування, безпеки праці, покращення організації обслуговування та навчання персоналу, удосконалення методів проведення тренувань.

Основними особами під час проведення тренувань є керівник тренування, ведучий тренування, контролююча особа, особи, що тренуються, і за необхідності, посередники. У міжсистемних протиаварійних тренуваннях беруть участь представники Державної інспекції з експлуатації електричних станцій і мереж та Державної інспекції з енергетичного нагляду за режимами споживання електричної і теплової енергії як контролюючі особи в енергопостачальних організаціях, а в разі проведення мережних та об’єктових тренувань в енергопостачальних організаціях - представник територіального підрозділу Державної інспекції з енергетичного нагляду за режимами споживання електричної і теплової енергії як контролююча особа, спостерігач - при необхідності.

Для проведення тренування повинні бути заздалегідь підготовлені програма, необхідні допоміжні засоби для тренування.

Під час планування тренувань енергопостачальних компаній треба передбачати відпрацювання елементів взаємодії з суб’єктами, що експлуатують водо-, газо-, тепломережі, нафтопроводи та інші мережі.

Протиаварійні тренування можна об'єднувати з протипожежними.

За методом проведення розрізняють тренування: за схемами; з умовними діями на устаткуванні, яке знаходиться в роботі; з реальними діями на виведеному з роботи устаткуванні; з використанням ТЗН; комбіновані.

Найбільш поширеними сьогодні із наведеної класифікації тренувань є тренування на схемах і з умовними діями.

Тренування за схемами проводять з використанням технологічних схем і схем нормального режиму без відтворення дій персоналу на робочому місці та устаткуванні, без зв'язку з реальним часом виконання операцій.

Використовуючи відповідні технологічні та ремонтні схеми для різноманітних аварійних ситуацій та режимів, які можуть виникати в роботі обладнання енергооб’єктів та/або режимах електричної та теплової мережі, оперативний персонал відпрацьовує навички швидкого прийняття правильних рішень щодо необхідних оперативних дій з попередження виникнення, локалізації та наступної ліквідації порушень

Цей метод доцільно використовувати під час тренувань керівного та чергового оперативного персоналу об’єктів для засвоєння ним знань особливостей схеми, її технологічної гнучкості.

Тренування з умовними діями персоналу на працюючому устаткуванні проводять у реальному часі з обов'язковим виходом учасників на місця виконання операцій. Цей метод використовують під час тренування з оперативним персоналом, який безпосередньо обслуговує виробничі дільниці.

Тренування з реальними діями на виведеному з роботи устаткуванні (знаходиться в ремонті або резерві, розміщене на навчально-тренувальному полігоні тощо) доцільно проводити для відпрацювання та закріплення персоналом навичок, які вимагають певних професійних прийомів (наприклад, відбирання проби газу з газового реле на трансформаторі, усунення дрібних дефектів устаткування тощо).

Тренування з використанням ТЗН, які функціонують на базі обчислювальної техніки і до яких належать програмні, комплексні та спеціалізовані тренажери, автоматизовані навчальні системи, доцільно проводити для забезпечення можливості багаторазового відпрацювання дій персоналу з можливістю відтворення різних режимів роботи устаткування, навіть таких, які небезпечно створювати на реальному устаткуванні, з фіксацією протікання процесу тренування та його наслідків.

Головним недоліком організації перелічених тренувань є відсутність можливості об’єктивно оцінювати реальний стан кваліфікації персоналу і його а. Цей підхід не дозволяє також формувати і підтримувати здатність (компетентності) оперативно-диспетчерського персоналу розпізнавати і попереджати умови

виникнення складних системних аварій. Для вирішення таких завдань потрібно використовувати сучасні веб-орієнтовані тренажерні системи, які дозволяють відтворювати різноманітні аварійні ситуації із залученням персоналу різних рівнів керування.

Залежно від місця проведення, обсягу обладнання та задіяного оперативного і оперативно-виробничого персоналу тренування поділяються на диспетчерські, міжсистемні, системні, мережні або районні - в електричних мережах МЕМ та енергопостачальних організаціях і їх структурних підрозділів.

Тематика протиаварійних тренувань базується на використанні інформації про аварії та випадки відмов у роботі устаткування, що мали місце на електростанціях та в ЕМ, особливо з аналогічним устаткуванням; можливі аварійні ситуації на устаткуванні, які зазначено в типових інструкціях та інших нормативних документах; ймовірні дефекти свого устаткування та ненормальні режими роботи цієї електростанції і мережі; можливість виникнення пожежі в аварійних умовах; випадки введення в експлуатацію нового устаткування, нових електричних та теплових схем і режимів; "вузькі" місця режимного та експлуатаційного характеру; матеріали квартальних і річних оглядів технологічних порушень.

Згідно з вибраною темою тренування керівником або іншим спеціалістом за дорученням керівника повинна бути складена програма організації та проведення тренування. У програмі необхідно зазначити:

1) тему і вид тренування;

2) мету і метод проведення тренування;

3) дату, час і місце проведення тренування;

4) керівників і учасників тренування;

5) прізвище, ініціали, посаду керівника гасіння пожежі (для тренувань, об'єднаних з протипожежними);

6) посередників з визначенням дільниці контролю, їх прізвища, ініціали, посади (посередниками призначають працівників, які добре знають схему і устаткування дільниці, інструкції, права і обов'язки персоналу, що обслуговує

дільницю). Дії керівника гасіння пожежі контролюються керівником тренування;

7) спосіб надання учасникам умовних сигналів і вказівок під час тренування;

8) порядок користування зв'язком;

9) порядок користування додатковими технічними засобами;

10) умовний час виникнення аварії;

11) схему і режим роботи устаткування до виникнення аварії з вказівками щодо відхилень та ненормальних режимів роботи;

12) стан засобів пожежогасіння (для тренувань, об'єднаних з протипожежними);

13) ввідні команди учасникам тренування;

14) причини виникнення аварії, її розвиток та наслідки;

15) причину займання, опис розвитку пожежі і роботи пожежогасіння (для тренувань, об'єднаних з протипожежними);

16) збалансований у часі опис оптимальної послідовності дій ліквідації аварії (можливі варіанти та їх порівняльна характеристика).

До програми додають перелік необхідних технічних плакатів і бирок; карти діяльності учасників тренувань (за необхідності).

Як прикінцеві положення в програмі ПТ можуть бути наведені варіанти ліквідації умовної аварії, найбільш повчальні приклади з досвіду попередніх тренувань, питань тактики, керівних документів тощо.

Опис послідовності дій щодо ліквідації умовної аварії або аварійної ситуації має бути максимально наближеним до реальної хронології подій. З цією метою учасники тренувань мають обов’язково здійснювати аналіз даних приладів (покажчиків місць пошкоджень), огляд відповідного обладнання (ділянок електричних мереж) з оформленням передбачених документів, дотриманням процедури ведення оперативних переговорів і записів та регламенту оперативних повідомлень. Якщо програмою передбачена аварійна ситуація, пов’язана зі знеструмленням екологічно (техногенно) небезпечних об’єктів, відпрацьовується відповідна взаємодія з персоналом споживача та під контролем організації оперативних повідомлень територіальних органів Державної служби України з

надзвичайних ситуацій.

Операції управління устаткуванням, що не можуть бути проведені за допомогою ТЗН, повинні відтворюватись умовно, наприклад, у вигляді рапорту посереднику.

Вступна інформація і настанови надаються учасникам після зайняття ними робочих місць і встановлення початкового режиму. Вступна інформація, яку повідомляє учасникам керівник або посередник, має містити: особливості інформаційно-оперативного комплексу ТЗН, прийняті умовності та спрощення; загальну характеристику початкового режиму; відхилення від нормальної схеми; порядок використання зв'язку; способи оцінювання тренувальних дій; орієнтовний час виникнення аварії.

У процесі тренування керівник тренування або посередники здійснюють імітацію збурень, відхилень параметрів, відмов, зупинок механізмів, порушень дії автоматики тощо відповідно до програми тренування і з урахуванням конкретної діяльності учасників.

Припиняють тренування за командою керівника тренування, після чого необхідно зробити відповідні позначення в документах і почати збір та облік зареєстрованої інформації.

Особам, яким за результатами тренування виставлено оцінку "задовільно", рекомендується додатково пройти індивідуальні тренування за темою, що пов'язана з допущеними помилками. Особам, які припустилися грубих помилок та одержали незадовільні оцінки за результатами проведення протиаварійного тренування (як групового, так й індивідуального), необхідно протягом наступних 15 днів пройти індивідуальне протиаварійне тренування або за рішенням керівника тренування, якщо більшість з учасників групового тренування отримали незадовільні оцінки, повинно бути проведене повторне групове протиаварійне тренування в строк не пізніше ніж через 30 днів.

Особи, що вчинили грубі помилки й одержали незадовільні оцінки за результатами двох (у тому числі й повторного) протиаварійних тренувань поспіль, відсторонюються від виконання посадових обов’язків, і їм призначається

позачергова перевірка знань.

Базуючись на аналізі існуючих правил проведення протиаварійних тренувань персоналу МЕМ [4] та досвіді вітчизняних і закордонних фахівців у сфері тренажерного будівництва в енергетиці автор сформулював наступні найбільш важливі технічні вимоги (ТВ) до комплексу веб-орієнтованих КТ оперативно-диспетчерського персоналу МЕМ ОЕС України.

Комплекс КТ - це програмно-апаратний комплекс, який повинен функціонувати як в складі локальних 6 ЕЕС, так і в складі глобальної (НЕК "Укренерго") мережі ПК. КТ повинен забезпечувати моделювання (на основі режимних замірів, результатів ієрархічної оцінки стану ОЕС України та даних SCADA) нормальних, аварійних та післяаварійних режимів роботи енергосистем з максимальним наближенням до реальних умов роботи оперативного персоналу ЕЕС та НЕК "Укренерго" (SCADA, комутатори, диспетчерський щит, тощо) як в складі міждержавних енергооб'єднань, так і у відокремленому від сусідніх енергосистем режимі.

ПЗ комплексу КТ повинно мати відкриту архітектуру, яка б забезпечила підключення до КТ інших модулів: "оцінки стану мережі", тренажерів по перемиканнях (наприклад, ПТК ОП розробки НВО "Інфотех"), "Ремонтних заявок", ОІК, тощо.

Програмний комплекс КТ повинен мати ієрархічний принцип побудови і складатися з 6 (шести) окремих програмно-апаратних комплексів, які будуть встановлені в Дніпровській, Центральній, Північній, Південній, Південно-Західній, Західній ЕС, а також НЕК "Укренерго", які при необхідності проведення міжсистемних протиаварійних тренувань повинні об'єднуватися в єдиний, територіально розподілений комплекс.

Комплекс КТ кожної з ЕЕС повинен мати можливість отримання даних з баз даних ОІК (та ієрархічної оцінки стану ОЕС України).

Повинно бути передбачено можливість роботи комплексу КТ в автономному режимі (тобто в кожній ЕЕС, на основі даних режимних замірів, даних з "оцінки стану мережі" та ОІК, з метою проведення протиаварійних тренувань з

оперативним персоналом диспетчерських служб в енергосистемах навіть за відсутності інформаційного обміну між енергосистемою та НЕК "Укренерго", сусідніми енергосистемами). При цьому в комплексі КТ, що працює локально, має бути забезпечено можливість моделювання ситуації на будь-якому об'єкті (підстанції, електростанції) ОЕС України та енергосистем сусідніх країн, що будуть описані в моделі Схема організації взаємодії інструктора і диспетчерів при проведенні протиаварійного тренування представлена на Рис. 1.2.

Інструментальні засоби комплексу КТ повинні забезпечувати вивід інформації на зовнішні засоби відображення: монітори ПК інструктора, диспетчерів, з якими проводиться протиаварійне тренування, плазмові панелі, відеостіни, проектори, засоби стиковки з диспетчерським мнемощитом тощо.

Програмні засоби комплексу КТ повинні забезпечувати, також, можливість проведення протиаварійних тренувань самостійно диспетчером - в режимі самонавчання та самопідготовки.

Тобто, комплекс КТ повинен мати можливість функціонувати в наступних режимах:

- Контролю та перевірки знань інструктором (при проведенні протиаварійних тренувань), та набуття оперативним персоналом диспетчерських служб практичних навичок з локалізації та ліквідації аварійних ситуацій в ОЕС України;
- Підготовки та редагування сценаріїв протиаварійних тренувань та підготовки вихідних даних;
- Самонавчання;
- Тренажеру по оперативних перемиканнях.

Інтерфейс інструктора - інтерактивна процедура керування режимною моделлю тренажеру.

Інструктор повинен мати можливості:

- Включати/відключати комутаційні апарати (вимикачі, роз'єднувачі) безпосередньо на комутаційних схемах енергооб'єктів;

– Змінювати навантаження (P,Q) на енергоблоках електростанцій шляхом миттєвої зміни уставки, та шляхом завдання графіку (швидкості) зміни навантаження;

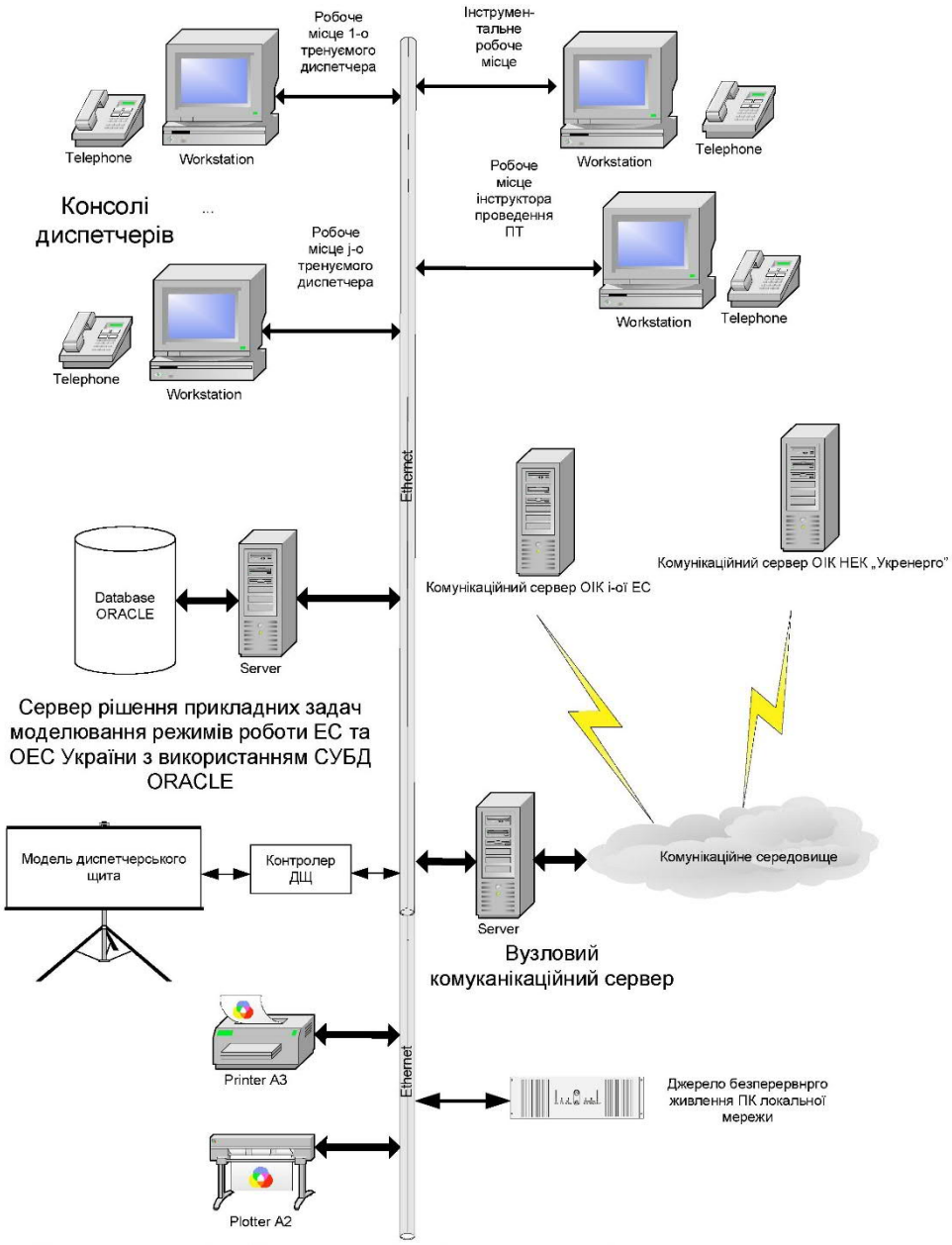


Рис. 1.2. Схема організації взаємодії інструктора і диспетчерів при проведенні протиаварійного тренування

– Керувати режимом енергосистеми по напрузі (за допомогою зміни реактивної генерації на електростанціях), та переключення анцапф РПН АТ, ПБВ АТ, ТПР та ВДТ підстанцій, зміни потужності синхронних компенсаторів, пристроїв продовжної та поперечної компенсації, тощо;

- Керувати режимом енергосистеми по частоті;
- Змінювати величину навантаження споживачів у вузлах електричної мережі (по активній і реактивній потужності) - як для окремо вибраного вузла, так і для групи вузлів одночасно у вибраному енергорайоні шляхом миттєвої зміни уставки, та шляхом завдання графіку (швидкості) зміни навантаження споживачів;
- Зміни уставки ПА, введення в роботу/виведення з роботи РЗ і ПА.

Інтерфейс інструктора повинен забезпечувати можливість побудови та зміни сценаріїв протиаварійних тренувань, підготовки вихідних даних, друкування протоколів тренувань, початку та призупинення моделювання, тощо.

Підсистема відображення повинна забезпечувати вивід на засоби відображення елементів технологічних схем енергооб'єктів з заданим ступенем деталізації. Повинно забезпечуватися масштабування зображень елементів та об'єктів керування.

Взаємодія з інструктором протиаварійного тренування повинна виконуватися за допомогою комутатора.

Необхідно забезпечити прості та зручні способи швидкої корекції, настройки та адаптації програмних засобів комплексу КТ до конкретних місцевих умов, а також, можливості побудови нових сценаріїв, технологічних схем, графіків, інструкцій, для організації та проведення протиаварійних тренувань. Така підсистема повинна складатися з:

- Редактора комутаційних схем;
- Редактора діалогу і системи відображення (інтерфейсу ОІК АСДУ - балансових форм, кадрів, тощо);
- Редактора сценаріїв тренувань;
- Редактора БД технологічних параметрів енергетичного обладнання енергооб'єктів та енергосистем.

Редактор схем повинен бути сумісним з сучасними редакторами (наприклад, AutoCAD).

Комплекс КТ повинен мати можливість моделювання роботи РЗА і ПА з використанням баз даних (наприклад з АНЧАР, тощо).

Комплекс КТ повинен імітувати режими роботи ОЕС України, регіональних енергосистем, та еквівалентів енергосистем сусідніх держав. Повинні моделюватися:

- Сталі (усталені) режими;
- Електромагнітні перехідні процеси;
- Довготривала динаміка (електромеханічні перехідні процеси). Програмно-апаратний комплекс КТ повинен забезпечувати моделювання розрахункової схеми з не менш ніж 20 000 вузлів.

Програмне забезпечення повинно мати можливість моделювання (виконання розрахунків) "багатоострівного" режиму роботи ОЕС України, та регіональних ЕС. Тобто, при відокремленні якого-небудь регіону, або декількох регіонів від основної частини ОЕС України, процес розрахунку режиму і моделювання роботи "островів" ОЕС України не повинен припинятися. В разі знеструмлення відокремленого енергорегіону, повинні відображатися стан комутаційних апаратів, та основні параметри мережі (напруги на шинах, частота, перетоки потужності по ЛЕП та АТ, навіть при нульових значеннях, повинен враховуватись зарядний струм ЛЕП при її односторонньому відключенні). В кожному енергорайоні автоматично (по визначеним правилам) повинен визначатися балансуючий вузол. Для вузлів схеми повинні розраховуватися напруги, для гілок - значення активної, реактивної потужності і струму. Розраховані параметри режиму повинні відображатися на комутаційних схемах енергооб'єктів та структурній схемі енергосистеми, а також в табличних формах.

Комплекс КТ повинен мати можливість моделювання роботи РЗ та ПА (АЧР, АПН, АПАТ, АЛАР, САПАХ, АРС, ЧАПВ, ділильної автоматики (струмової та частотної), автоматики виділення електростанцій на власні потреби, САВН (САОН), АРВЛ (АРОЛ), АРВДЛ (АРОДЛ), тощо).

Режимна модель ОЕС України в комплексі КТ повинна імітувати зміну параметрів режиму енергосистеми у різноманітних аварійних ситуаціях, таких як

відключення комутаційного обладнання, ліній електропередачі, енергоблоків електростанцій, зміни навантаження енергоблоків та споживання, зміна частоти та напруги, випадіння з синхронізму, тощо. Розрахунки потокорозподілу в комплексі КТ повинні виконуватися з періодичністю, що не перевищує 1-3 сек. Повинно бути передбачено можливість моделювання аварійних ситуацій і поведінки (реагування) ОЕС України з циклічністю, яка б відповідала псевдореальному, прискореному та сповільненому часу.

Процеси довготривалої динаміки повинні відображатися в масштабі реального часу з заданою точністю. При розрахунках погано спостережуваних режимів розрахунки повинні продовжувати виконуватися з автоматичним зниженням точності та затримкою масштабу часу.

При розрахунку довготривалої динаміки повинен виконуватися взаємозв'язок між комутаційною та режимною моделями.

Генератори електростанцій та еквівалентні генератори повинні моделюватися як з використанням повної моделі, так і з використанням спрощеної моделі $E_x = const$.

У режимній математичній моделі ОЕС України повинна враховуватися залежність навантаження споживачів від частоти та напруги, причому залежність споживання від напруги повинна враховуватися по статичним характеристикам окремо для кожного вузла навантаження.

Необхідність моделювання електромеханічних перехідних процесів в ОЕС України під час сеансу тренування обумовлюється наступними причинами:

- можливістю порушення синхронної динамічної стійкості ОЕС при різних комутаційних змінах і виникнення асинхронного ходу на лініях електропередачі. Це у свою чергу викликає роботу комплектів ділильного захисту (ТДА), АЛАР і поділ енергосистеми на не синхронно працюючі частини;
- можливістю відмови дії комплектів АЛАР при виникненні асинхронного ходу на лінії електропередачі й необхідності оперативному персоналу

самостійно виявляти і усувати асинхронний хід відключенням відповідних ліній електропередачі.

Якщо в першому випадку оперативному персоналу необов'язково відображати зміни параметрів ОЕС, що супроводжують асинхронний хід, тому що ці процеси короткочасні й диспетчер не зможе їх правильно сприйняти й проаналізувати, то в другому випадку необхідно й моделювати, і вірно відображати зміни параметрів режиму ОЕС, що супроводжують асинхронний хід.

Повинне передбачатися моделювання роботи автотрансформаторів з продовжним та поперечним регулюванням.

При побудові сценаріїв ТрЗ і протиаварійних тренувань повинно бути забезпечено моделювання наступних подій:

- Детерміновані (завчасно визначені події) - відключення ЛЕП, енергоблоків, тощо;
- Умовні - на основі порівняння фактичного і заданого значень параметрів (наприклад, частота);
- Вірогідні - події, дія яких може бути визначена вірогідністю їх виникнення.

При безпосередньому проведенні міжсистемних протиаварійних тренувань за раніш складеним сценарієм ТрЗ повинна бути забезпечена можливість зміни встановленого сценарію (при необхідності), та переходу до іншого сценарію протиаварійного тренування. При проведенні міжсистемних тренувань інструктор енергосистеми повинен бути проінформований про змінений сценарій (змінена частина сценарію) з деталізацією про зміни. Інструктор від енергосистеми повинен мати можливість зміни сценарію на обладнанні, що належить до оперативного управління цієї енергосистеми.

Повинна передбачатися реалізація наступних варіантів функціонування комплексу КТ, та проведення протиаварійних тренувань оперативного персоналу диспетчерських служб:

- Автономно, в кожній енергосистемі, з можливістю моделювання локальних (в межах однієї енергосистеми) аварійних ситуацій таких, як

перевантаження розподільчих та магістральних мереж, автотрансформаторів, виділення енергоблоків електростанцій на власні потреби чи на виділений енергорайон, відключення споживачів, тощо;

– Проведення міжсистемних протиаварійних тренувань.

Інструктор комплексу КТ повинен мати можливість керування в комплексі КТ як обладнанням в межах своєї енергосистеми, так і обладнанням в межах усієї моделі ОЕС України (інших енергосистем).

Експертна система оцінювання дій диспетчерів комплексу КТ повинна оцінювати дії диспетчерів, з якими проводиться протиаварійне тренування. Дії диспетчерів не повинні суперечити правилам виконання оперативних перемикань. Ці правила повинні включатися в експертну систему інструктором. Повинні бути забезпечені спеціальні інструментальні засоби, які дозволили б вводити нові правила, робити в них поправки та видаляти застарілі.

Програмні засоби комплексу КТ повинні забезпечити можливість протоколювання усіх дій, які виконуються в середовищі диспетчерського КТ.

Програмне забезпечення комплексу КТ повинне забезпечувати призупинення моделювання режиму роботи ОЕС України, продовження моделювання, та зберігання поточного режиму в архівах з використанням простого та наочного інтерфейсу.

1.4 Методологічні принципи розробки навчальної бази тренажерних систем підготовки оперативно- диспетчерського персоналу МЕМ

Навчальна база тренажерних систем професійної системи підготовки персоналу в енергетиці має бути спрямована на забезпечення якості підготовки кадрів і розвиток компетенцій, ґрунтуючись на засадах сучасних форм і технологій навчання [34].

Пріоритетними складовими якості підготовки персоналу є зміст навчальних програм, методичне забезпечення та система оцінки якості підготовки працівників. Запровадження компетентністного підходу у процесі розроблення навчальних програм дозволить спрямувати процес навчання на досягнення результатів,

зробити його ефективнішим з точки зору здатності персоналу успішно здійснювати професійну діяльність.

У Законі України «Про вищу освіту» [94] зазначено, що «результати навчання - знання, уміння, навички, способи мислення, погляди, цінності, інші особисті якості, які можна ідентифікувати, спланувати, оцінити і виміряти та які особа здатна продемонструвати після завершення освітньої програми або окремих освітніх компонентів». Отже, система оцінки якості підготовки персоналу має містити інструменти для вимірювання рівня знань, уміння вирішувати реальні, нетипові завдання, ускладнені суперечливими вимогами, часто в умовах неповної або недостатньої інформації, здатність працівників до синтезу і аналізу ситуацій, які виникають у професійній діяльності.

Однією з найвідоміших класифікацій рівнів засвоєння навчального матеріалу, є так звана класифікація елементів таксономії Б. Блума [95]. Таксономія Б. Блума була розроблена ще у середині минулого століття комісією експертів на чолі з Б. Блумом, і мала слугувати основою для порівняння цілей, яких намагаються досягти автори різних навчальних програм. Згідно з цією класифікацією, всі можливі цілі навчання можуть [96] бути розділені на три непересічні області:

- когнітивна або пізнавальна (Cognitive Domain), виражена через такі елементи засвоєння, як розуміння, відтворення, застосування, аналіз, синтез, оцінка;
- афективна або емоційна (Affective Domain), виражається через сприймання, інтереси, нахили, здібності тощо;
- психомоторна або рухова (Psychomotor Domain), так звані навички письма, мовні навички, фізичні, трудові навички.

Пізнавальні цілі охоплюють усе, що зв’язано з придбанням знань і розвитком розумових навичок. Найбільш розроблена і частіше використовується класифікація цілей у рамках когнітивної області, яка була уточнена Л. Андерсон [96] на більш систематичних засадах, і може бути виражена через наступні елементи таксономії (Рис. 1.3):

- рівень знання: на цьому рівні персонал має підтвердити знання інструкцій й інших керівних матеріалів, якими він користується у своїй професійній

діяльності, має показати здатність скористатися знайденою інформацією, уміння обрати вірну відповідь серед запропонованих варіантів;

- рівень розуміння: персонал має продемонструвати здатність засвоїти суть навчального матеріалу;
- рівень застосування: той, кого навчають, має володіти матеріалом у логічній послідовності, розуміти причинно-наслідкові зв'язки, вміти свідомо використати засвоєний матеріал на рівні типових завдань професійної діяльності;
- рівень аналізу: оволодівши цим рівнем, працівник здатний розкладати матеріал на компоненти для уточнення його структури, виявляти суперечливі вимоги, розв'язувати нетипові завдання;
- рівень оцінювання: персонал спроможний оцінити роботу інших колег з погляду її повноти, вірогідності результатів, може діяти в умовах неповної або недостатньої інформації, виявляти причини виникнення аварійних ситуацій;
- творчий рівень: на цьому рівні працівник може підготувати аналітичний звіт, узагальнюючи причини виникнення аварійних ситуацій, виявити закономірності процесів, в яких бере участь в рамках своєї професійної діяльності, спланувати і поставити завдання іншим категоріям працівників.

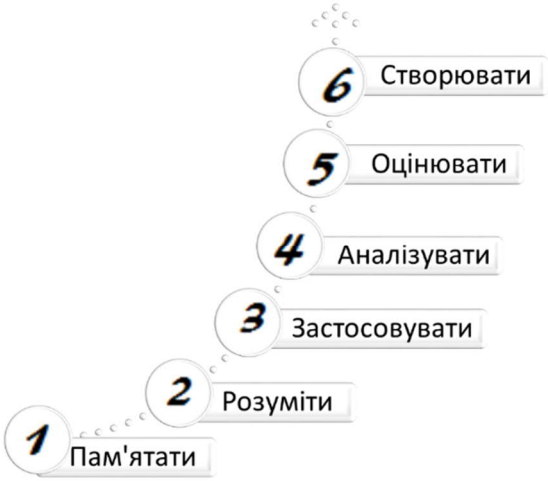


Рис. 1.3. Систематика освітніх цілей за Блумом-Андерсон

Навчальна база тренажерних систем підготовки персоналу в енергетиці має бути побудована таким чином, щоб уникнути трактування таксономії як суто ієрархічної структури, внаслідок чого, наприклад, при навчанні керівників

підрозділів, помилково можуть бути відкинуті цілі нижніх рівнів як «негідні» викладання. Слід пам’ятати, що робота з досягнення вищого рівня базується на досягнутих цілях нижчого рівня.

З метою підтримки високорівневого мислення і створення умов для самостійної навчальної діяльності, у тренажерних системах підготовки персоналу має бути передбачені можливості контролю наявності внутрішньої мотивації працівників до навчання, а також потенціал для створення складних завдань, які дозволяють зв’язати нову інформацію зі старою, знайти місце для втілення власного досвіду, познайомитись з досвідом колег-професіоналів. Таким чином, зазначені принципи організації навчальної бази тренажерних систем, з одного боку, забезпечують індивідуальний розвиток персоналу і сприяють надбанню знань і умінь з використанням власних пізнавальних здібностей. З іншого боку, така побудова процесу навчання впливає на соціальне удосконалення персоналу, в тому числі на його фаховий рівень і впевненість у своїх можливостях щодо існування у суспільстві.

Серед сучасних освітніх технологій, які доцільно впроваджувати з точки зору впливу на використання бюджету, варто відзначити змішане навчання і дистанційне навчання [97 - 101].

Змішане навчання (blended learning) – сучасна освітня технологія, яка поєднує технології аудиторного і електронного навчання, і базується на нових дидактичних можливостях, що надаються сучасними засобами навчання, інформаційно-комунікаційними технологіями тощо. Змішане навчання дозволяє підтримувати на високому рівні пізнавальний інтерес, надати більше можливостей з меншими витратами і може поєднати традиційне й дистанційне навчання, виходячи з потреб працівників, роботодавців та інших заінтересованих сторін.

Дистанційне навчання не є новою формою освіти й існує вже впродовж десятиліть [102]. Дистанційна форма освіти наразі присутня практично в усіх університетах світу. Найбільш затребуваним дистанційне навчання є у закладах післядипломної освіти або в інших освітньо-наукових установах, які здійснюють післядипломну освіту. Перевагою електронного навчання перед традиційним є те,

що ці технології дозволяють поєднувати професійну діяльність і навчання у власному темпі, не витрачаючи зайвий час.

Нормативно-правову базу дистанційного навчання в Україні забезпечує низка державних нормативних документів, таких як:

- Закон України «Про вищу освіту» 2014 року (із змінами), у якому серед форм навчання у закладах вищої освіти виокремлено дистанційну [94];
- Концепція розвитку дистанційної освіти в Україні, затверджена Постановою МОН України від 20.12.2000 р., згідно з якою дистанційна освіта є повноцінною формою навчання, реалізованою з допомогою технологій дистанційного навчання ;
- Наказ МОН України «Про затвердження Положення про дистанційне навчання» від 25.04.2013 р. № 466 (із змінами), у якому сформульовано мету і завдання дистанційного навчання, визначено ряд термінів, пов’язаних з дистанційною формою навчання.

Згідно з Положенням про дистанційне навчання [6], «під дистанційним навчанням розуміється індивідуалізований процес набуття знань, умінь, навичок і способів пізнавальної діяльності людини, який відбувається в основному за опосередкованої взаємодії віддалених один від одного учасників навчального процесу у спеціалізованому середовищі, яке функціонує на базі сучасних психолого-педагогічних та інформаційно-комунікаційних технологій».

Визначенню таких понять, як «дистанційне навчання» (distance learning), «дистанційна освіта» (distance education), «електронне навчання» (e-learning) тощо, розробленню теоретичних положень з реалізації технологій дистанційного навчання, присвячено низку праць як вітчизняних науковців (В. Кухаренко, О. Тіхомірова, В. Биков, Н. Жевакіна, Н. Корсунська, Є. Полат, А. Хуторськой та ін.), так і зарубіжних вчених (Д. Пейнтер (D. Painter), П. Валіатан (P. Valiathan), Е. Розетт (A. Rossett), Р. Воган Фразе (R. Vaughan Frazze), Р. Шанк (R. Schank) та ін.).

Важливим елементом дистанційного навчання є дистанційний курс. Згідно з В. Кухаренко, дистанційний курс – це комплекс навчально-методичних матеріалів та освітніх послуг, створених у віртуальному навчальному середовищі для

організації дистанційного навчання на основі інформаційних та комунікаційних технологій за моделлю дистанційного навчання.

З точки зору використання інформаційних програмних засобів, дистанційний курс є досить складною структурою, змістова складова якого підпорядкована можливостям педагогічних технологій, які використовують різні методи і засоби навчання, в тому числі активні. Сукупно комплекс обраних технологій має визначати обрану викладачем стратегію навчання. У той же час, інформаційні програмні засоби беруть на себе функції доставки інформації, формування навчального середовища, організації спілкування тощо. Таким чином, на зміст і на якість навчання, у першу чергу, впливають педагогічні стратегії навчання, а не інформаційні технології, які використовуються для доставки інформації.

Основними педагогічними проблемами при створенні дистанційного курсу є визначення й опис цілей навчання, структурування й ущільнення інформації, яка має бути засвоєна, формування діагностичних функцій навчання, гарантованість певного рівня якості навчання [103 - 107].

Таким чином, створення дистанційних курсів для тренажерних систем підготовки персоналу в енергетиці вимагає високоякісної командної роботи фахівців – методистів й експертів енергетичного сектору, – а також комплексного застосування дидактичних, технічних і електронних засобів навчання та контролю [59, 61, 108 - 110].

Методологічні принципи, розглянуті у даному розділі, є основою для розроблення дистанційних курсів тренажерних систем підготовки кадрів в енергетиці. Зокрема, спеціалістами НВ ТОВ «Інфотех» [111] розроблено ряд дистанційних курсів для системи дистанційного навчання та тренажу оперативно-диспетчерського персоналу у рамках співробітництва з ПрАТ «НЕК «Укренерго», ПрАТ «Київобленерго» та Центром підвищення кваліфікації керівників і спеціалістів Міненерго КПІ ім. Ігоря Сікорського: «Тренажерна підготовка і проведення протиаварійних тренувань з використанням повнофункціонального режимного веб-тренажера», «Дослідження методів оптимізації режимів роботи об'єднаної електроенергетичної системи України в темпі процесу (реальному

часі)», «Автоматизована підготовка бланків перемикань на підстанціях ПрАТ «НЕК «Укренерго», «Створення протиаварійних тренувань із застосуванням ПТК ОП++», «Конструктор-редактор повнофункціонального режимного веб-тренажера для створення штатних та протиаварійних сценаріїв тренувань».

Вказані дистанційні курси призначені для формування та підтримки у оперативно-диспетчерського персоналу стійких навиків ліквідації умов виникнення та розвитку аварій на підстанціях, а також складних системних та міжсистемних аварій в електричних мережах ОЕС України. Розпочато поетапне впровадження створених курсів у навчальний процес навчальних закладів, що підпорядковуються ПрАТ «НЕК «Укренерго» та ЦПК Міненерго України. ПрАТ «НЕК «Укренерго» у 2015 запровадило дистанційно-очний курс підвищення кваліфікації диспетчерів центральних диспетчерських служб.

Підвищення кваліфікації персоналу із застосуванням технологій змішаного і дистанційного навчання доцільно проводити у акредитованих віртуальних науково-навчальних центрах. Віртуальні центри підвищення кваліфікації забезпечать еволюційний шлях модернізації існуючої системи підготовки персоналу в енергетиці з урахуванням нової моделі ринку електроенергії [72], максимально можливий ріст якості кваліфікації персоналу та дозволять заощадити величезні людські і фінансові ресурси.

1.5 Висновки до першого розділу

Отримані в роботі результати аналізу стану досліджень з наявних технічних і наукових проблем побудови комп’ютерних тренажерів в Україні, ближньому і дальньому зарубіжжі підтвердили необхідність і важливість використання сучасної веб-орієнтованої системи роботи з персоналом на об’єктах МЕМ для забезпечення безперервної і надійної роботи ОЕС України в цілому. МЕМ ОЕС потребує велику кількість комп’ютерних тренажерів для різних рівнів ієрархії управління і попит на них прогнозовано буде зростати. Існуюча система роботи з персоналом є дуже застарілою і потребує невідкладної модернізації вдосконалення. Недооцінка цього факту може привести до виникнення умов з розвитку системних аварій з великими

негативними наслідками. Перспективним підходом до вирішення теоретичних і практичних проблем побудови ефективних комп’ютерних тренажерів є пропозиція представляти протиаварійні тренування у вигляді семантичної мережі станів МЕМ ОЕС, яка відображає різноманітні сценарії певних дій професіональної діяльності персоналу та ОУ. Це дозволяє значно скоротити об'єм моделі ОУ і розробляти більш простіші моделі режиму. Рішення проблеми радикального підвищення якості безперервного навчання та тренажерної підготовки оперативно-диспетчерського персоналу МЕМ ОЕС України може бути вирішено тільки шляхом використання комп’ютерних технологій веб-орієнтованих тренажерних систем, що функціонують в розподіленому середовищі.

РОЗДІЛ 2
ОНТОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ДОСЛІДЖЕНЬ МЕМ ОЕС УКРАЇНИ

2.1 Дослідження проблеми побудови інформаційної частини моделі МЕМ ОЕС України

Тут і далі під БД розуміється програмно-технічний засіб для раціонального і ефективного зберігання інформації, який забезпечує надійний захист даних і забезпечена механізмами пошуку інформації, що задовольняють комфортним вимогам до продуктивності транзакцій [112 - 114].

Сьогодні реляційні БД є найбільш надійними, функціональними і універсальними [115 - 117].

Тому в якості важливої складової інструментальних інформаційних засобів модельного конструювання комп’ютерних технологій в роботі досліджуються можливості тільки реляційних БД.

Для розробки реляційних БД використовують засоби систем управління базами даних (СУБД). Реляційна БД - це реалізація реляційної моделі (моделі даних) на фізичному рівні. Реляційна модель даних - модель даних, заснована на представленні даних у вигляді набору зв'язків, кожен з яких є підмножиною декартового множення певних великих кількостей, і маніпулюванні ними за допомогою безлічі операцій реляційної алгебри або реляційного числення.

З метою формалізації міркувань про призначення, властивості і функції БД, що розробляється, далі використовуватимемо наступні види і засоби опису типів даних у базах даних. Схема БД (Data base scheme) представляє опис БД в контексті конкретної моделі даних.

Зовнішня схема БД (External scheme - це схема БД, яка підтримується системою управління БД для додатків. Внутрішня схема БД (Internal scheme) - це схема БД, що визначає представлення даних в середовищі зберігання і шляху доступу до них.

Концептуальна схема БД (Conceptual scheme) - це схема БД, що визначає представлення БД, єдине для усіх її застосувань і не залежне від використовуваного в системі управління цією БД представлення даних в середовищі зберігання і шляхів доступу до них.

Мова опису даних (Data definition language) - це мова, призначена для опису схем БД. Модель даних (Data model) - це сукупність правил породження структур даних у БД, операцій над ними, а також обмежень цілісності, що визначають допустимі зв'язки і значення даних, послідовність їх зміни. Для завдання моделі даних використовуватимемо мову опису даних і мову маніпулювання даними.

Саме поняття БД означає окремий простий набір даних, що містить, наприклад, список однорідних записів про параметри конкретного енергетичного устаткування, наприклад, назва, рік виготовлення, тип, вага і так далі. Але частіше таке поняття використовується для опису цілої структури для зберігання інформації про складніші об'єкти, наприклад, електричні підстанції або електричної мережі, що містить сотні тисяч параметрів.

Реляційні БД використовуються, як правило, для моделювання поведінки деяких аспектів представлення складних об'єктів якійсь частині реального миру. Ці частини реальності називають *предметною областю*.

Тут і далі в якості предметної області розглядатимемо найбільш важливі сутності і зв’язки предметної області МЕМ ОЕС країни. На Рис. 2.1 наведено приклад підключення до БД.

Рис. 2.1. Приклад з’єднання з БД

Об’єкт ERRLOG містить інформацію про помилки програмного забезпечення, що виникли під час обробки даних. Вони можуть бути постійними або мінливими, пов’язаними зі змістом даних БД ОЕС, з помилками в програмному

забезпеченні, з відсутністю зв’язку з іншими вузлами ОЕС, з інших причин. При появі записів в цій таблиці необхідно вжити заходів щодо усунення помилки самостійно або звернутися до розробника.

Забезпечення захисту БД від несанкціонованого доступу досягається шляхом застосування штатних механізмів автентифікації та розмежування доступу СУБД Oracle на підставі облікових записів користувачів бази даних. Створення облікових записів користувачів бази даних та надання користувачам повноважень на доступ до об’єктів бази здійснюється виключно Адміністратором бази даних. Для ефективного управління повноваженнями користувачів Адміністратором бази даних використовуються штатні механізми СУБД Oracle, які реалізують рольовий принцип управління повноваженнями користувачів.

База даних Oracle з моменту створення містить два облікові записи - SYS і SYSTEM. Обліковий запис SYS містить всі системні об'єкти - внутрішні таблиці бази даних, пакети, процедури. Крім того, користувач SYS є власником словника даних. Словник даних Oracle - це сукупність таблиць і представлень, що дозволяють отримати будь-яку інформацію про структуру бази даних, про її налаштуваннях і стані за допомогою стандартних SQL-запитів. Обліковий запис SYS є також обліковим записом адміністратора бази даних з необмеженими повноваженнями. Обліковий запис SYSTEM надає доступ до всіх об'єктів бази і наділена роллю DBA.

2.2 Теоретичні основи конструювання інформаційної частини моделі МЕМ

Надійна і стійка робота електроенергетики України значною мірою залежить від ефективної реалізації наявних можливостей і способів управління режимами роботи устаткування на усіх рівнях наявної ієрархічної системи управління.

Експлуатацію електроенергетичного устаткування здійснює оперативно-диспетчерський персонал, від рівня кваліфікації якого також залежить надійність енергопостачання споживачів.

Реалізація можливостей і способів управління режимами, у свою чергу, нерозривно пов'язана з процесами послідовного отримання оперативним персоналом центральних диспетчерських центрів (підприємств) достовірних вимірюваних або розрахункових даних про параметри режиму роботи електроенергетичних систем (ЕЕС) і завжди базується на різних інформаційних моделях елементів або окремих частин ЕЕС.

Сьогодні нестримно розвивається система глобальної світової електроенергетики, утворена злиттям національних ОЕС.

Як приклад можна привести створення єдиного європейського електроенергетичного об'єднання (European Network of Transmission System Operators for Electricity) далі ENTSO=E.

Слід зазначити, що у будь-якій країні процеси отримання, розподілу і споживання електричної енергії структурно подібні і реалізуються, як правило, за допомогою автономних або об’єднаних паралельно працюючих ЕЕС.

Забезпечення можливості паралельної роботи ЕЕС збільшує надійність енергопостачання споживачів, проте ускладнює систему управління ОЕС в цілому. Тому головна мета формування глобальної електроенергетики - надійне (без перерви в часі) і економічно ефективне забезпечення споживачів якісною електроенергією в необхідних об'ємах.

Системи управління електроенергетикою різних країн базуються, як правило, на використанні різноманітних інформаційних моделей (ІМ) об'єктів і елементів ЕЕС.

Наприклад, для формування простої інформаційної моделі (ІМ) електроенергетики будь-якої країни в цілому досить було б використати тільки інформацію про режими функціонування розподіленого на великій території електроенергетичного устаткування і опис (характеристики) процесів управління. Якість цих процесів залежить від рівня кваліфікації об'єднаного в різні системи управління персоналу, що забезпечує експлуатацію цього устаткування (Рис. 1). Проте така модель, на жаль, не може бути безпосередньо використана для цілей управління, моделювання і прогнозування різноманітних режимів, а також для

вирішення великої кількості проектних і експлуатаційних електроенергетичних завдань в процесі функціонування ЕЕС і ОЕС.

Питанням аналізу і моделювання режимів роботи електроенергетичних систем присвячена велика кількість публікацій, проте системному аналізу умов функціонування ОЕС України з перспективою інтеграції в європейську електроенергетичну систему, на наш погляд, приділяється недостатня увага.

Процес рішення будь-якої електроенергетичної задачі з використанням засобів обчислювальної техніки, як правило, пов'язаний з розробкою простого інтерфейсу, що забезпечує можливість багатоваріантних розрахунків, а також зручної для користувача системи підготовки і зберігання початкових даних з метою подальшого аналізу результатів і ухвалення рішення.

Для цих цілей часто широко використовується проста в експлуатації файлова система, структура якої формується залежно від вимог вирішуваної задачі (Рис. 2.**2**). Самий трудомісткий етап - підготовка і формування структури початкових даних, які, як правило, мають рідко змінювану початкову форму. Будь-яка зміна в постановці завдання або допущеннях майже завжди призводить до необхідності зміни структури файлів, що містять початкові дані. Це, у свою чергу, викликає необхідність переписування кодів програм.

Рис. 2.2. Інформаційна модель ОЕС України

Такий підхід утрудняє можливість широкої інтеграції різних програмних комплексів, а також безпосереднього використання результатів аналізу, що отримуються в процесі рішення споріднених груп електроенергетичних завдань.

Для цих цілей на практиці використовуються так звані програмні шлюзи, файлові обмінники, електронні поштові скриньки і багато що інше. Часто доводиться забезпечувати синхронізацію даних в різних файлових системах, що призводить до численних виправлень і помилок в кодах програм і структурах початкових даних і невиправданого збільшення витрат часу програмістів.

В якості наявних прикладів можна навести складні існуючі програмні комплекси для розрахунку усталених режимів роботи енергосистем і струмів коротких замикань. У цих програмних комплексах використовуються майже однакові заступні схеми елементів ЕЕС (ПЛ, підстанції і тому подібне) однієї і тієї ж енергосистеми.

Практично одну і ту ж інформацію з незначними відмінностями доводиться зберігати в різних місцях двічі, тричі і більше, забезпечувати її надійне зберігання і обов'язкову архівацію, а також вести облік усіх змін в цих комплексах в процесі зміни або модернізації будь-якої частини. Також завжди сильно ускладнений обмін інформацією між цими комплексами в процесі рішення вказаних завдань.

Саме тому сьогодні практично усі інженерні проекти за визначенням повного життєвого циклу енергетичного устаткування, що реалізовуються в передових країнах світу, базуються на застосуванні однакових інструментальних засобів - географічних інформаційних системах (ГІС), об'єднаних в ГІС-технології. Ці засоби застосовуються на усіх етапах проведення науково-дослідних робіт, проектування і виготовлення устаткування, подальшого монтажу і пуско-налагоджувальних робіт. Ці ж засоби також використовуються в процесі експлуатації устаткування і його подальшого демонтажу після закінчення запланованого терміну служби. Такий підхід дозволяє значно скоротити загальні витрати на впровадження нового устаткування і спростити процедуру його інтеграції в працюючі ЕЕС, полегшити процеси планування введення або виведення устаткування в планові ремонти, знижуючи таким чином

експлуатаційну складову витрат на виробництво і передачу електроенергії споживачам.

ГІС-технологія базується на використанні сучасних СУБД, серед яких важливе місце займають ORACLE, PostgreSQL і MySQL. Перша і друга СУБД використовується для реалізації, як правило, масштабних проектів, а друга - для порівняно невеликих за об'ємом локальних проектів. Для розробки структур зберігання початкових даних у вигляді різних моделей елементів ЕС вживають поняття концептуальних, зовнішніх і внутрішніх схем [112, 111, 119].

Електроенергетичне устаткування і системи управління ЕЕС і ОЕС завжди розосереджені на великій території і включають велику кількість складного устаткування для генерації електричної енергії (атомні, теплові, гідравлічні та ін. станції), відкриті розподільні пристрої (ВРП), підстанції і лінії електропередачі різних класів напруги. Експлуатацію усього устаткування здійснює кваліфікований персонал - як невід'ємна складова частина різних систем управління на різних рівнях існуючої ієрархічної системи управління енергетикою.

Використовуючи підхід, вживаний в технологіях розробки інформаційних моделей (ІМ) різних предметних областей (наприклад, CASE -технологія), можна говорити про те, що предметна область енергетики будь-якої країни може бути представлена у вигляді різних сутностей (описів), об'єднаних певними технологічними зв'язками і стосунками, що адекватно відображають режими її функціонування. Інформаційна структура сутностей у базі даних (БД) відображається таблицями, що містять стовпці і рядки. Кожна сутність відбиває якісь певні властивості енергетики в цілому як технології.

2.3 Розробка концептуальної, зовнішніх та внутрішніх схем розподілених кластерних баз даних МЕМ великих енергосистем

Розглянемо найбільш важливі сутності предметної області МЕМ ОЕС України для конструювання комп’ютерних тренажерів.

Перша важлива сутність відбиває факт приналежності енергетики якій-небудь країні - Україні, Росії, Білорусі, Польщі і так далі. Цю сутність можна

назвати ENERGY - енергетика. Вона дозволяє у разі потреби легко досліджувати та аналізувати важливі загальні показники результатів моделювання умов автономних або паралельних режимів роботи ОЕС і ЕЕС сусідніх країн без внесення змін до таблиць вже існуючих БД. Ця сутність також може характеризуватися балансами енергії (вироблення, споживання, сальдо та ін.) в реальному часі, географічними картами з розміщеним на них електроенергетичним устаткуванням, діаграмами, параметрами режиму (напруга, перетікання потужностей, частота та ін.) на тлі географічних, технологічних і електричних схем, описом особливостей експлуатованого енергетичного устаткування, параметрів режимів роботи і тому подібне. Як правило, різні варіанти сутності ENERGY часто використовуються на самих верхніх рівнях ієрархічної системи управління енергетикою для ухвалення ефективних управлінських рішень.

Наступна сутність - розподілена багаторівнева ієрархічна система управління (CS - control system) енергетикою країни. Ця сутність відбиває факт існування (наприклад, в Україні) розподіленої ієрархічної системи управління, вершина якої - Кабінет Міністрів і Міненерго України. Наступні ієрархічні рівні системи управління включають системи управління корпоративними правами підприємств, системи управління відновлювальними джерелами енергії, АЕС, ТЕС, ГАЕС і ГЕС, а також магістральними мережами ОЕС України та енергопостачальними підприємствами. Ця сутність може посилатися на сутність типів систем управління (TYPE_CS), що використовуються для цієї мети в практиці управління світової енергетики, а також на сутність ENERGY, враховуючи, таким чином, приналежність CS до певної групи систем управління, використовуваної в конкретній країні. Головна особливість даної сутності - її ієрархічна структура. CS використовується для аналізу ефективності функціонування різних варіантів систем управління.

Третя важлива сутність - це сукупність усього енергетичного устаткування (EQUIPMENT), що утворює енергетичну галузь країни. Ця сутність містить опис типів устаткування і включає повний перелік повітряних ліній (ПЛ), підстанцій,

атомних, теплових, гідравлічних, гідроакумулюючих, сонячних і вітроелектростанцій України.

Четверта сутність предметної області енергетики - це устаткування ліній електропередачі (EQ_LINE). Ця сутність містить інформацію про реальний склад устаткування усіх ліній електропередачі (найменування, довжина, розташування і матеріал дроту, кількість і тип опор, найменування прилеглих підстанцій і тому подібне), що об'єднують підстанції, включаючи ВРП електростанцій різних класів напруги. Також до устаткування ПЛ часто відносять траверси, ізолятори, арматуру, опори, блискавкозахисті троси, розрядники, заземлення, секціонуючи пристрої, а також допоміжне устаткування (апаратура високочастотного зв'язку, ємнісного відбору потужності та ін.). Ця сутність може посилатися на сутності ENERGY і CS, а також на різні довідники типів елементів устаткування ліній електропередачі (марка дроту, клас напруги і тому подібне).

П'ята сутність подібна EQ_LINE і описує повний перелік устаткування підстанцій (EQ_SUBSTATION). Ця сутність включає найменування підстанції, клас напруги, диспетчерські найменування устаткування і тому подібне. Може посилатися на сутності: TRANSFORMER - трансформатори, SWITCH - вимикачі, STATION_BUS - шини підстанцій і тому подібне. Також можливі посилання на різні довідники по різних типах устаткування підстанцій. До устаткування підстанцій, як правило, відносяться наступні елементи цієї сутності:

- силові трансформатори і автотрансформатори, ввідні конструкції для повітряних і кабельних ліній електропередачі;
- відкриті (ВРП) і закриті (ЗРП) розподільні пристрої, включаючи: системи і секції шин; силові вимикачі і роз'єднувачі;
- вимірювальне устаткування (вимірювальні трансформатори струму і напруги, вимірювальні прилади);
- струмообмежувальні, регулюючі пристрої (конденсаторні батареї, реактори, фазообертачі і ін.);

Система живлення власних потреб підстанції:

- трансформатори власних потреб; щити змінного струму;

- ·акумуляторні батареї; щити постійного (оперативного) струму; дизельні генератори і інші аварійні джерела енергії (на великих і особливо важливих підстанціях);
- системи захисту і автоматики, допоміжні системи і багато що інше.

Шоста сутність містить опис устаткування теплових електростанцій (EQ_POWER_STATION). Ця сутність може посилатися на сутність GENERATOR - генератори, TURBINE - турбіни, BOILER - котли і тому подібне.

Наступні сутності - це устаткування різних генеруючих джерел енергії, наприклад, атомних (EQ_ATOMIC_POWER_STATION), гідравлічних (EQ_HYDRO_POWER_STATION) і вітрових (EQ_WIND_POWER_STATION) електростанцій. Загальним для цих сутностей є те, що вони обов'язково посилаються на сутності ENERGY і CS, можуть посилатися на GENERATOR, TURBINE та ін., а також на різні довідники типів елементів устаткування електростанцій.

Сутність магістральних електричних мереж (МЕМ), що входять до складу ЕЕС ОЕС, описується своїм найменуванням, приналежністю до ЕЕС, схемами підстанцій, балансами і тому подібними характеристиками.

Сутність енергопостачальних організацій (OBLENERGO), які входять до складу відповідних ЕЕС, описується своїм найменуванням, приналежністю до ЕЕС, схемами підстанцій, балансами і тому подібне.

Перелічені вище сутності були покладені в основу розробки інформаційної частини моделі МЕМ ОЕС України для створення віртуального середовища сучасної системи електронного навчання та тренажу персоналу МЕМ ОЕС України.

Для моделювання режимів роботи ЕЕС широко у світі використовуються, як правило, сутності вузлів і гілок. У цих сутностях обов'язково мають бути наведені відомості про приналежність останніх до ЕЕС, підстанцій та підприємств енергетичного сектору цієї країни. Це забезпечує однозначну ідентифікацію будь-яких елементів ЕЕС, що використовуються у розрахунках, а також незалежність процесів моделювання режимів роботи ЕЕС і ОЕС конкретної країни від структури

початкової інформації, що формується у БД. Фрагмент концептуальної схеми БД інформаційної частини моделі електроенергетики України приведений на Рис. 2.3.

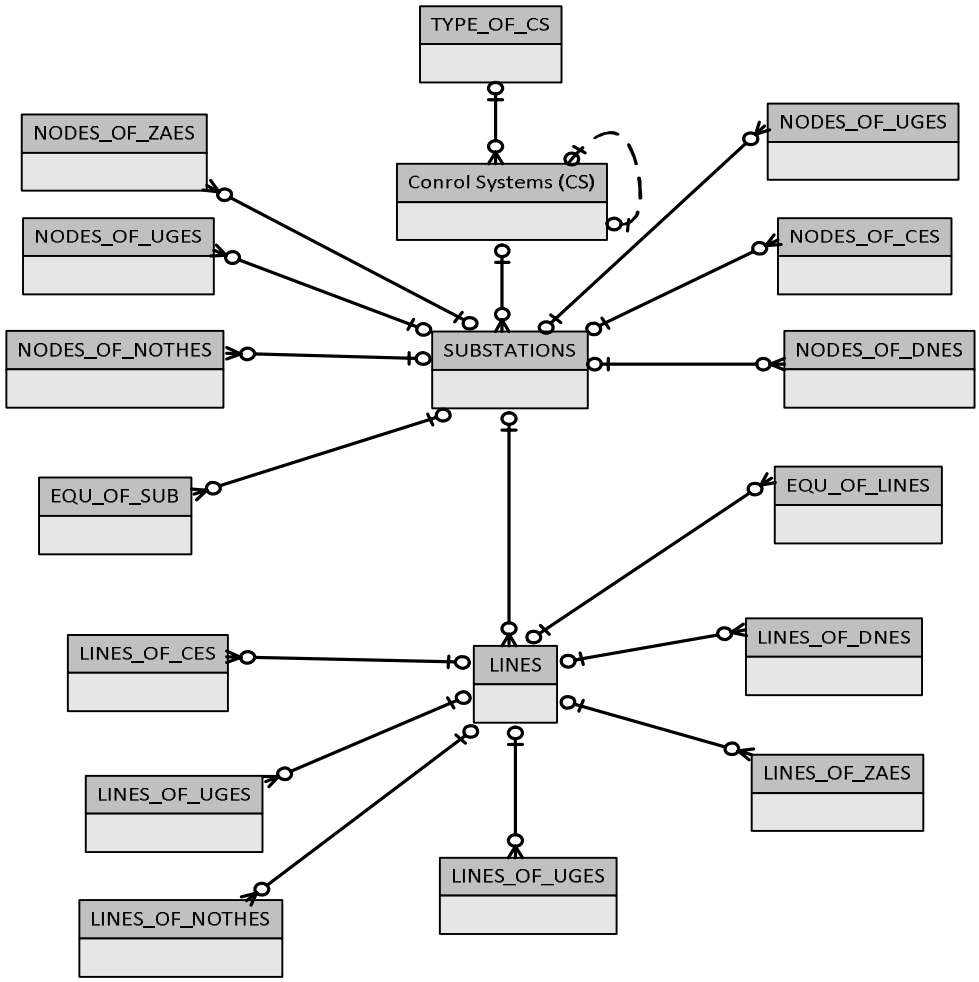


Рис. 2.3. Фрагмент концептуальної схеми БД інформаційної частини моделі ОЕС України

Такий підхід дозволяє здійснювати пошук і розробку нових ефективних методів моделювання і управління режимами роботи ОЕС різних країн на основі викладених принципів побудови інформаційної частини моделі електроенергетики України.

2.4 Сутності і зв'язки інформаційної частини моделі МЕМ ОЕС України в комп’ютерних тренажерах

Уся предметна область енергетики будь-якої країни може бути представлена деякою сукупністю сутностей і зв'язків, що відбивають найважливіші властивості, стосунки і характеристики засобів виробництва, розподілу і споживання електричної і теплової енергії.

Необхідність аналізу структури сучасного енергетичного виробництва, що є великою штучною системою, із залученням саме такого виду представлення сьогодні диктується гострою потребою оперативного аналізу її різноманітних режимів функціонування, а також необхідністю рішення швидко зростаючого різноманіття споріднених електроенергетичних завдань в процесі експлуатації і управління.

Також швидко збільшуються обчислювальні потужності, що використовуються для цих цілей, і об'єми обробки технологічної інформації, пов'язаної в основному з кількістю і якістю виробленої енергії.

Сутності і зв'язки інформаційної частини моделі об'єднаних в єдину енергосистему регіональних електроенергетичних систем (ЕЕС) ОЕС України формують віртуальну моделюючу основу і середовище, що дозволяє знаходити і використати найбільш ефективні способи управління режимами роботи ЕЕС для надійного і стійкого енергопостачання споживачів.

Зв'язки є логічними співвідношеннями між сутностями і, як правило, виражаються дієсловами, що означають приналежність або дію. Наприклад, сутність МЕМ (магістральні електричні мережі) належить сутності ЕНЕРГОСИСТЕМА.

Тут дієслово "належить" виражає зв'язок між двома сутностями - МЕМ і ЕНЕРГОСИСТЕМА. Зв'язки також допомагають встановлювати однозначну відповідність між параметрами режиму, устаткуванням, його елементами і цілком реальними частинами конкретної енергосистеми. Якщо ми розглядаємо який-небудь елемент енергетичного устаткування, то він завжди повинен належати конкретній підстанції (ПЛ, електростанції і тому подібне), що входить до складу енергопостачальної компанії, МЕМ і/або ЕЕС, які розташовані, у свою чергу, в конкретному районі певної країни.

На практиці для вирішення різноманітних електроенергетичних завдань аналізу, проектування і управління МЕМ ОЕС використовуються різні типи структурованої (впорядкованою) інформації у вигляді різних моделей елементів

ЕЕС, які базуються на поняттях концептуальних, зовнішніх і внутрішніх схем [112, 120 - 123].

Концептуальна схема служить для як найповнішого опису предметної області енергетики будь-якої країни в цілому або їх об'єднань. До неї відносяться, в першу чергу, увесь набір сутностей і зв'язків електроенергетичного устаткування, призначеного для виробництва і розподілу енергії, а також сутності і зв'язки, що відбивають характеристики і рівень кваліфікації експлуатаційного персоналу, об'єднаного в ієрархічні системи управління режимами роботи устаткування. Міра деталізації концептуальної схеми залежить від цілей рішення певної групи конкретних електроенергетичних завдань.

У будь-якому випадку концептуальна модель МЕМ ОЕС України повинна будуватися на ітераційній основі з можливістю подальшого доповнення і модифікації.

З метою ілюстрації можливого набору сутностей МЕМ ОЕС України в Таблиця 2.1. приведений варіант пропонованого переліку таких сутностей. Принцип формування складу сутностей визначається приналежністю різного енергетичного устаткування і персоналу до процесів виробництва і розподілу енергії.

При такому підході до поняття "устаткування" можна віднести усе те, що належить електростанціям, ПЛ, підстанціям, включаючи ВРП електростанцій і багато що інше, а до персоналу - об'єднані в ієрархічну систему управління різні експлуатаційні підприємства і підрозділи.

Оперативно-диспетчерський персонал ЕЕС здійснює управління режимами роботи на підставі даних про параметри режиму і устаткування. Різні рішення, що приймаються персоналом про вибір яких-небудь певних дій, як правило, завжди базуються на прогнозуванні сформованих в процесі тривалої експлуатації різноманітних типів реакцій стану (поведінки) устаткування в подібних ситуаціях.

До числа розглянутих в [120] сутностей необхідно додати групу балансів потужностей в реальному часі підстанцій, що об'єднують усю сукупність енергопостачальних компаній, регіональних експлуатаційних центрів (РЕЦ), ЕЕС і

ОЕС України в цілому. Баланси є потужним інструментом економічного аналізу діяльності різних енергетичних підприємств і давно використовуються для аналізу режимів і оптимізації втрат в електричних мережах.

Структура різних балансів потужностей безпосередньо пов'язана з усіма електричними схемами устаткування, які беруть участь в процесі вироблення і розподілу енергії. Використовувані для аналізу режимів електричні схеми представляють собою синтез статичної (незмінною) частини і динамічно змінюваних параметрів режиму роботи цього устаткування. Для цих цілей найчастіше використовуються мнемонічні схеми устаткування підстанцій, ПЛ і електростанцій різних типів.

Процеси отримання, розподілу і споживання теплової і електричної енергії структурно подібні і реалізуються за допомогою автономних або паралельно працюючих ЕЕС. Така ж структурна подібність характерна і для концептуальних схем інформаційної частини моделей енергетики будь-якої країни. Головна мета формування концептуальної схеми полягає в створенні простого і зручного для подальшого аналізу уявлення про процеси, що відбуваються в глобальній енергетиці, покликаній забезпечувати надійне постачання споживачів електроенергією необхідного об'єму і заданої якості.

Рішення будь-яких електроенергетичних завдань на сучасному етапі здійснюється з обов'язковим залученням потужних засобів обчислювальної техніки. При цьому майже завжди від розробників вимагається передбачити можливість багатоваріантних розрахунків, а також зручну для користувача систему підготовки і зберігання початкових даних з метою подальшого аналізу результатів і ухвалення оптимальних рішень. Такий підхід примушує розробників застосовувати найсучасніші СУБД реляційного типу.

Залучення для цих цілей концептуальних схем дозволяє відмовитися від широко використовуваної в сучасних інформаційних технологіях файлової системи. Також усувається необхідність багатократного дублювання використовуваною для вирішення електроенергетичних завдань однієї і тієї ж інформації, що кінець кінцем завжди призводить до зменшення витрат часу і

засобів. Завжди використовується тільки потрібний в конкретному завданні об'єм початкової інформації.

У запропонованій концептуальній схемі сутність ENERGY дозволяє моделювати умови паралельної роботи ОЕС і ЕЕС сусідніх країн.

Ця сутність ENERGY може характеризуватися також балансами енергії (вироблення, споживання, сальдо та ін.) в реальному часі, географічними картами з розміщеним на них електроенергетичним устаткуванням, діаграмами, параметрами режиму (напруга, перетікання потужностей, частота та ін.) на тлі географічних, технологічних і електричних схем, а також описом особливостей експлуатованого енергетичного устаткування, параметрів режимів роботи і тому подібне. Варіанти сутностей ENERGY можуть використовуватися для ухвалення ефективних управлінських рішень.

Існуюча розподілена багаторівнева ієрархічна система управління енергетикою CS (control system) вирішує усі необхідні завдання для її ефективного функціонування.

Різні рівні системи ієрархії управління CS відбивають різні елементи схеми управління, включаючи корпоративні права підприємств Мінекоенерго України. Система управління CS НЕК "Укренерго" (системний оператор) призначена для управління режимами паралельної роботи ЕЕС, теплових, атомних, гідравлічних, сонячних і вітрових станцій.

Система управління магістральними електричними мережами (МЕМ) забезпечує управління режимами роботи високовольтних підстанцій у складі ЕЕС.

Сукупність усього енергетичного устаткування представлена сутністю EQUIPMENT (устаткування) і містить повний опис існуючих типів устаткування, включаючи найменування ПЛ, підстанцій, ВРУ, атомних, теплових, гідравлічних і вітрових електростанцій. Ця сутність належить сутності CS.

Устаткування ПЛ є змістом суті EQ_LINE. Ця сутність включає опис складу устаткування усіх ПЛ (найменування, довжина, розташування, матеріал дроту, кількість і тип опор, найменування прилеглих підстанцій і тому подібне), різних

класів напруги, що об'єднують підстанції. Ця сутність належить сутності EQUIPMENT.

Повний перелік устаткування підстанцій представляється сутністю EQ_SUBSTATION (устаткування підстанцій). Ця сутність належить сутності EQUIPMENT і включає такі характеристики, як найменування підстанції, клас напруги, диспетчерське найменування і тому подібне. Цій сутності належать сутності TRANSFORMER - трансформатори, SWITCH - вимикачі, STATION_BUS - шини підстанцій і тому подібне. Перераховані сутності можуть посилатися на різні довідники існуючих типів устаткування підстанцій.

Наступна сутність містить опис устаткування теплових електростанцій (EQ_POWER_STATION).

Ця сутність належить сутності EQUIPMENT і містить сутності GENERATOR - генератори, TURBINE - турбіни, BOILER - котли і тому подібне

Подібну структуру мають сутності устаткування атомних (EQ_ATOMIC_POWER_STATION), гідравлічних (EQ_HYDRO_POWER_ STATION) і вітрових (EQ_WIND_POWER_STATION) електростанцій.

Ці сутності належать сутності EQUIPMENT і також містять сутності GENERATOR, TURBINE та ін.

Внутрішня схема описує вид елементів сутностей, представлених у БД у вигляді таблиць. Використання внутрішніх схем дає можливість оцінити потребу в дисковій пам'яті і виконати аналіз часу реакції на дії, що управляють, і транзакції, які часто називаються операціями вводу-виводу.

Окрім концептуальної і внутрішньої схем, також важливі і зовнішні схеми, призначені для застосування у разі рішення конкретних електроенергетичних завдань (наприклад, розрахунок струмів КЗ, статичної або динамічної стійкості). Для кожного з цих завдань застосовуватимуться різні набори сутностей, які завжди належать одній загальній концептуальній схемі інформаційної частини моделі енергетики будь-якої країни. Приклад набору сутностей зовнішньої схеми для розрахунку усталених після аварійних режимів наведений в Таблиця 2.1.

Таблиця 2.1

Приклад набору сутностей зовнішньої схеми для розрахунку усталених після аварійних режимів

Найменування сутності предметної області енергетики	**Короткий опис**
BALANS_ENERGY_COUNTRY	Баланси потужності підприємств енергетики України
EMPLOYEES_COUNTRY_CS	Система управління (СУ) персоналом
CS	СУ устаткуванням
DEPARTMENT_CS	Підрозділи СУ
DIAGRAMS	Сукупність електричних схем
DISP_CONTROL_PANEL_DIAGRAM	Сукупність диспетчерських щитів
EMPLOYEES_CS	Персонал СУ
ENERGY	Енергетика країни
EQUIPMENT_OF_LINES	Устаткування ПЛ
EQUIPMENT_OF_SUB	Устаткування підстанцій
EQUIPMENT_OF_SUB_SWITCH	Вимикачі
EQUIPMENT_OF_SUB_SWITCH_DEV	Регулятори напруги з РПН
EQUIPMENT_NAME	Перелік підстанцій
EQUIPMENT_TYPE_COMMON	Типи устаткування
JOB_HISTORY_CS	Персональні дані
JOBS_CS	Система посад персоналу
LOCATION_CS	Розташування/адреса підрозділів
MODEL_EQU_SUB	Моделі устаткування підстанцій
MODEL_EQU_SUB_TRANSF	Моделі трансформаторів
NI_WORK_CES	Початкові дані (ПД) про гілки Центральної ЕС (ЦЕС)
NI_WORK_DNES	ПД про гілки ДнЕС
NI_WORK_DOES	ПД про гілки ДЕС
NI_WORK_KES	ПД про гілки КЕС
NI_WORK_SEVES	ПД про гілки Північної ЕЕС
NI_WORK_UGES	ПД про гілки Південної ЕЕС
NI_WORK_UZES	ПД про гілки ПЗ ЕЕС
NI_WORK_ZAES	ПД про гілки ЗЕС
NS_WORK_CES	ПД про вузли ЦЕС
NS_WORK_DNES	ПД про вузли ДнЕС
NS_WORK_DOES	ПД про вузли ДЕС
NS_WORK_KES	ПД про вузли КЕС
NS_WORK_SEVES	ПД про вузли СЕС
NS_WORK_UGES	ПД про вузли Південної ЕЕС
NS_WORK_UZES	ПД про вузли ПЗ ЕЕС
NS_WORK_ZAES	ПД про вузли ЗЕС
OIK_DIAGRAM	Відеограми ОІК (SCADA)
REGION_ES	Розташування ЕС

Найменування сутності предметної області енергетики	Короткий опис
SUBSTATIONS	Підстанції
TC	Система телесигналів
TI	Система телевимірювань
TYPE_OF_CS	Типи СУ
LINES	Параметри і характеристики ПЛ

Застосування відкритого набору сутностей і зв'язків дозволяє забезпечити однозначну ідентифікацію будь-яких елементів МЕМ ЕЕС, що використовуються в моделюванні або розрахунках, а також незалежність процесів моделювання режимів роботи устаткування конкретної країни від структури початкової інформації, що формується у БД. Це також дозволить будувати повноцінну ідентифікаційну систему всього енергетичного устаткування.

Використання концептуальної схеми інформаційної частини моделі МЕМ ОЕС України дозволить застосовувати ефективні методи структурного аналізу різних існуючих і прогнозованих систем управління, а також способи їх моделювання.

Викладені принципи побудови інформаційної частини моделі МЕМ ОЕС України носять універсальний характер і можуть бути використані для вирішення великого спектру електроенергетичних задач в царині тренажеробудування в енергетиці різних країн [113, 123 - 126].

В БД повинні зберігатися поточні значення параметрів. Для підвищення надійності зберігання параметрів БД повинна реплікуватися з резервними серверами додатків та БД.

Механізм реплікації даних повинен забезпечувати цілісність інформації, яка міститься в системі на резервованих серверах БД. Реплікація (синхронізація) даних між серверами БД має бути повною, тобто виконуватись для наступних типів інформації, які надходять до системи без переривання функціонування:

- телеінформація (в тому числі аварійні повідомлення);
- дії оператора (ручне введення);
- системні події;

– оновлення графічних схем та символів, що представлені у АСДУ.

База даних параметрів, що контролюються, формується в режимі реального часу. Повинна існувати можливість зміни джерела інформації (телевиміри, ручне введення, дорозрахунок) з відображенням ознак джерела.

Кількість параметрів, що зберігаються у БД – не менше 100000 точок з можливістю подальшого розширення без зміни складу обладнання.

В БД зберігається атрибутивна інформація про об’єкти обладнання: ієрархічна структура представлення одиниць обладнання, розширюваний та змінюваний набір атрибутів для кожного типу обладнання. Система управління базами даних (далі - СУБД) надає користувачу можливість перегляду атрибутивної інформації про елементи обладнання зі схеми мережі. СУБД надає користувачу можливість виконувати пошук обладнання в базі даних за визначеними критеріями, повертати перелік обладнання, що відповідає критеріям пошуку, відображати це обладнання на схемі мережі та відображати атрибутивну інформацію про об’єкт із переліку. Забезпечується доступ до сховища даних. Передбачена можливість доступу до документів по об’єктам в БД, які зберігаються на файловому сервері, напряму із елементів на схемі мережі. Такими документами можуть бути: специфікації, креслення, фотографії, мапи, інструкції.

В окрему БД виведена інформація про дії обслуговуючого персоналу, в якій повинна міститися наступна інформація: журнал аварійних подій, журнал дій персоналу. АСДУ формує в БД журнал аварійних повідомлень з фіксацією: часу надходження повідомлення, місця та об’єкту, що викликає повідомлення, тексту/назви повідомлення, типу, класу, пріоритету повідомлення.

СУБД надає користувачу можливість виконувати комплексну фільтрацію журналу подій та пошук подій за визначеними критеріями. АСДУ веде в БД окремий електронний журнал дій персоналу:

– запис всіх виконуваних оперативним персоналом дій в мережі (дата та час отримання команди (узгодження), найменування об’єкту та обладнання, де виконуються переключення, ПІБ диспетчера, що надав команду

(узгодження), дата та час виконання та повідомлення про виконання команди (узгодження)), а також запис історії всіх дій та подій;

– запис виконання команд з можливістю використання готових штампів та корекцією необхідних параметрів;
– запис про розміщення на схемах диспетчерських плакатів;
– запис про розміщення переносних заземлень, допуск бригад, вивід автоматик та захистів.

Електронний журнал дій персоналу дозволяє здійснювати навігацію по схемі мережі на об’єкт, з яким виконувалась дія. Записи в журналі дій персоналу можуть бути скасовані з відповідною відміткою, але не можуть бути знищені. Записи подій в журналі дій персоналу виконуються тільки персоналом, який має управління над об’єктами мережі. Об’єкти мережі розподілені за зонами управління (за територіальною ознакою та за рівнем напруги).

В цьому розділі наведений опис складу даних, їх форматів та взаємних зв’язків між даними для баз даних МЕМ ЕЕС ОЕС України. Логічна модель бази даних МЕМ ЕЕС представлена на Рис. 2.4, фрагмент фізичної моделі – на Рис. 2.5.

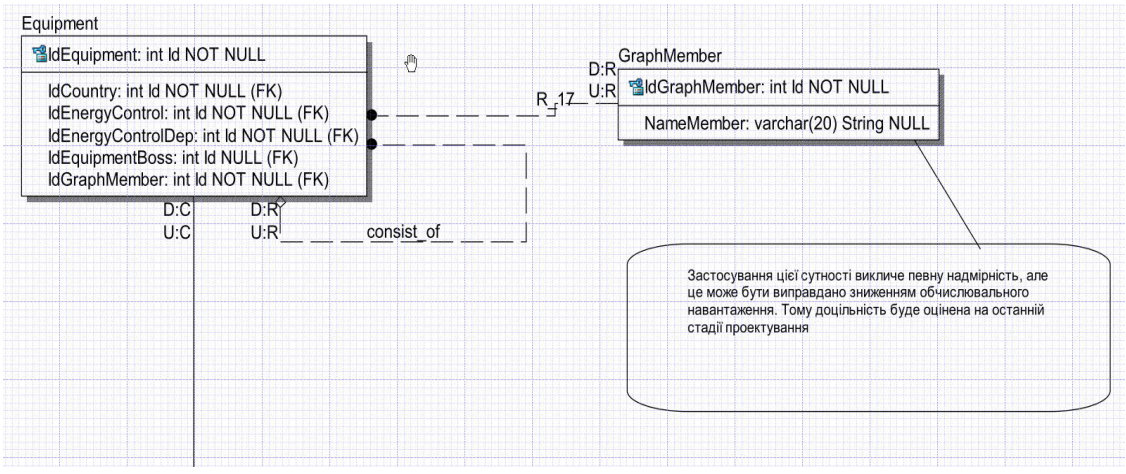


Рис. 2.4. Фрагмент логічної моделі БД МЕМ ЕЕС ОЕС України

Для організації БД МЕМ ЕЕС ОЕС України обрано систему управління БД (СУБД) Oracle 11gR2 Standart Edition.

Ця СУБД дозволяє організувати кластерну систему за технологією Oracle Real Application Cluster та має можливість побудови розподілених баз даних, що сприяє створенню прозорого механізму інформаційного обміну з базою даних

Головного обчислювального центру ПрАТ «НЕК «Укренерго» (далі - ГОЦ) ОЕС України за допомогою розроблених інтерфейсів.

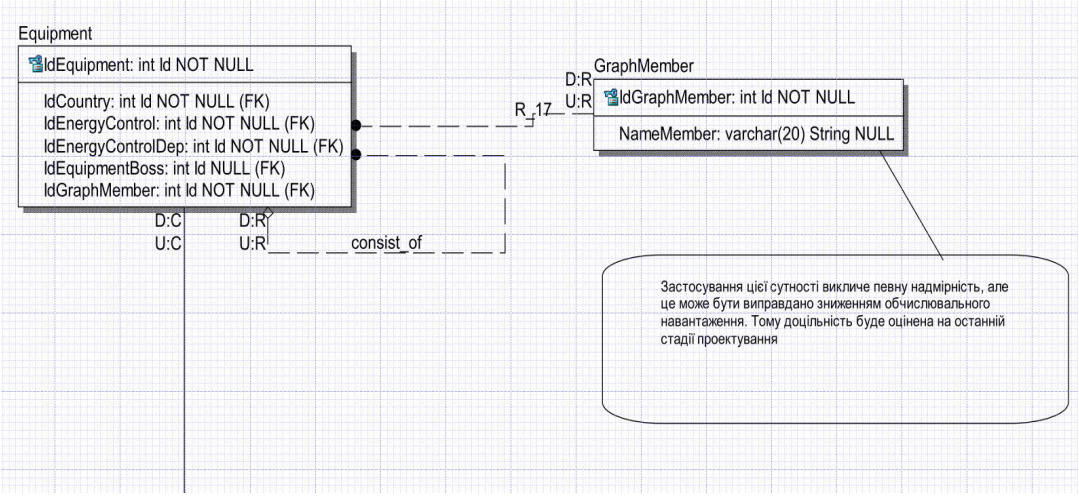


Рис. 2.5. Фрагмент фізичної моделі бази даних МЕМ ЕЕС ОЕС України

Сервери БД організовані в кластер, що побудований за технологією Oracle Real Application Cluster (далі - RAC). БД МЕМ ОЕС України функціонує з двома апаратними вузлами кластера. В разі збою одного з вузлів програмне забезпечення RAC переносить всі клієнтські підключення до бази даних на другий вузол.

На рівні доступу до даних і дисків реалізована технологія ASM - Automatic Storage Management. Це окремий екземпляр Oracle, що встановлений на кожному вузлі кластера та забезпечує надійний та прозорий механізм роботи з дисками для вузлів RAC.

Таблиці БД розміщуються в табличних просторах бази даних. Табличні простори бази даних поділяються на два типи: постійні – призначені для збереження таблиць і тимчасові – призначені для виконання запитів до бази даних. Табличні простори складаються з одного або більше файлів даних, що розміщуються в ASM на дискових масивах.

2.5 Розробка системи автоматизації розрахунків режимів роботи великих енергосистем для комп’ютерних тренажерів

Об’єктом моделювання та управління в комп’ютерному тренажері є ЕМ, усталені режими і перехідні електромеханічні процеси роботи якої описуються системою нелінійних алгебраїчних та диференційних рівнянь великої розмірності.

Існує багато методів рішення таких систем, але швидкість їх рішення дуже сильно залежить від властивостей системи автоматизації ітераційних розрахунків. Необхідність моделювати багато різноманітних режимів роботи ЕМ обумовлена існуючою технологією виробництва електроенергії та необхідністю частого виведення енергетичного устаткування в обов'язковий ремонт і зворотне введення його в роботу за допомогою комутаційних елементів (вимикачів, роз’єднувачів і т.п.). Це призводить до частої зміни топологічної моделі ЕМ і, як наслідок, до необхідності формування і рішення нових систем нелінійних алгебраїчних та диференційних рівнянь.

У роботі наведено результати дослідження та розробки алгоритмів формування структур топологічних моделей ЕМ для використання в комп’ютерних тренажерах в розосередженому моделюючому середовищі.

Функціонування МЕМ ЕЕС характеризується безперервною коливальною зміною усіх параметрів режиму. В процесі перетворення, передачі і розподілу електричної енергії змінюються: частота змінного струму, напруга у вузлових точках ЕМ, струми і потоки потужності в лініях електропередач ЕМ, генерація генераторів і навантаження споживачів електричної енергії.

Поточний стан електричної мережі - її режим, визначається вектором стану - конкретними значеннями взаємозалежних параметрів в кожен момент часу. Відповідні значення елементів такого вектору стану характеристик є параметрами режиму.

Сукупність станів ЕМ за певний відрізок часу утворює різноманітні структури, які зручно представляти і аналізувати у вигляді причинно-наслідкової семантичної мережі. Об'єднані у вигляді семантичної мережі заздалегідь підготовлені набори векторів стану можуть бути використані для розробки ефективних ТрЗ занять без необхідності розрахунку режимів в процесі протиаварійного тренування оперативного персоналу.

Такий підхід до модельного конструювання сценаріїв ТрЗ буде більш детально розглянуто наступних розділах.

Розрахунки параметрів електричних систем здійснюють, в основному, для визначення і перевірки допустимості напруги у вузлах електричної мережі, перетікань потужності в окремих лініях або групах ліній (контрольованого перерізу), перевірки можливості передачі заданої потужності від джерела електричної енергії до споживача, оцінки сумарних втрат потужності і тому подібне.

Розрахунки параметрів усталених режимів електричних систем використовуються в КТ для конструювання тренувальних занять в сценаріях протиаварійних навчань.

Розрахунок робочого стану мережі (системи) за складеною заступною схемою зводиться до звичайного розрахунку електричного ланцюга відомими методами з теоретичних основ електротехніки. Складність заступної схеми і велика кількість розрахункових параметрів не дозволяють безпосередньо використати класичні розрахункові методи. Вони модифікуються з метою повнішого відображення специфіки електричних мереж. З цією метою широко використовується матрична форма представлення параметрів режиму мережі і теорія графів [127 - 129].

Застосовуючи теорію графів до електричних ланцюгів, в заступній схемі виділяють вузли, дуги (гілки), незалежні контури, дерево і хорди. Потім усі елементи послідовно нумеруються, а їх взаємне положення описується системами адресних посилань або спеціальними матрицями. Вбудовані векторні і матричні функції полегшують рішення завдань лінійної алгебри при описі складних електричних мереж і систем. Їх аргументами є одновимірні масиви даних або багатовимірні матриці.

У практиці розрахунків усталених режимів замкнутих електричних систем знайшла широке застосування модифікація контурної розрахункової моделі із застосуванням методу розрахунку струмів контурів – методу розрізання контурів [130]. Основна ідея методу полягає в еквівалентній заміні замкнутої електричної мережі на розімкнену, режим якої повністю співпадає з режимом початкової електричної системи.

Реалізація контурної розрахункової моделі усталеного режиму ЕМ передбачає попереднє виділення в схемі дерева і хорд. У разі наявності в схемі тільки одного балансуючого (опорного по напрузі) вузла завжди утворюється тільки одне дерево і багато хорд для сильно замкнутих мереж. В цьому випадку використовується одне опорний метод побудови топологічної моделі ЕМ і, відповідно, одне опорний метод розрахунку контурних струмів [131, 132].

До складу дерева входять ділянки, які забезпечують повний зв'язок усіх вузлів схеми, за умови відсутності хоч би одного замкнутого контуру. Інші частини схеми, які містять ділянки, додавання яких до дерева призводить до утворення замкнутих контурів, називають хордами, а замкнуті контури, що відповідають хордам, - незалежними контурами.

До складу кожного незалежного контура входить тільки одна хорда (гілка). Усі інші замкнуті контури є залежними і можуть бути отримані шляхом перекомпонування незалежних контурів. Позитивним напрямом обходу контура приймається напрям, який відповідає позитивному напряму відповідної хорди.

У практичних розрахунках параметрів усталених режимів ЕМ зазвичай використовують підхід до розрізання контурів, заснований на еквівалентному заміщенні усіх хорд схеми ЕМ на пари фіктивних навантажень або струмів у вузлах, до яких примикає хорда, так, щоб різниця векторів напруги в цих вузлах в розімкненій схемі мережі дорівнювала падінню напруги на цій хорді:

$$\dot{\boldsymbol{U}}_{\boldsymbol{\iota}} - \dot{\boldsymbol{U}}_{\boldsymbol{J}} = \dot{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{ij}} \cdot \dot{\boldsymbol{Z}}_{\boldsymbol{ij}}, \qquad (2.1)$$

де $\dot{U}_{\iota}$ – напруга початкового вузла поточної гілки ij дерева; U_j - напруга кінцевого вузла поточної гілки ij дерева; $\dot{I}_{ij}$ – струм гілки ij; $\dot{Z}_{ij}$ – опір гілки ij.

Формула (2.1) є основною для послідовного розрахунку напруги вузлів ЕМ впорядкованих гілок (у напрямі від кореня дерева) і застосовується у вигляді:

$$\dot{\boldsymbol{U}}_{\boldsymbol{J}} = \dot{\boldsymbol{U}}_{\boldsymbol{\iota}} - \dot{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{ij}} \cdot \dot{\boldsymbol{Z}}_{\boldsymbol{ij}}. \qquad (2.2)$$

Формула (2.2) послідовно застосовується для всіх гілок дерева, напруга початкового вузла $\dot{U}_{\iota}$, струм $\dot{I}_{ij}$ та опір $\dot{Z}_{ij}$ якої завжди відомі.

Для трансформаторних гілок формула (дещо змінюється і дозволяє враховувати у розрахунках режимів комплексні коефіцієнти трансформаторів:

Струм гілок рахується також послідовно у напряму від кінцевих гілок до кореня дерева простим підсумовуванням живлячих струмів кінцевих вузлів поточних гілок ij дерева. Тут слід відзначити, що живлячі струми гілок попередньо формуються у вигляді суми струму кінцевого вузла поточної гілки і усіх прилеглих до нього струмів хорд з урахуванням умовно вибраних в них напрямів струму.

Метою розрахунків є визначення фіктивних навантажень вузлів, які забезпечують режим роботи розімкненої схеми електричної мережі еквівалентний режиму початкової замкнутої мережі. Кількість пар таких навантажень завжди дорівнює кількості хорд в схемі електричної мережі, причому, струми таких навантажень дорівнюють струмам видалених перемичок (хорд).

У разі наявності в реальних замкнутих високовольтних ЕМ великої кількості балансуючих (опорних по напрузі з відомими напругами) вузлів завжди утворюється багато дерев, кількість яких дорівнює кількості джерел генерації і багато незалежних контурів (хорд). В цьому випадку можуть виникати незалежні контури, утворені різними джерелам енергії, які називатимемо виродженими (Рис. 2.**6**).

Цей випадок, в основному, і розглядається в роботі в якості основного для моделювання режимів роботи великих ЕЕС в комп’ютерних тренажерах оперативно-диспетчерського персоналу МЕМ ОЕС України.

Для розрахунку режимів роботи великих ЕЕС автором був розроблений багатоопорний метод побудови топологічної моделі ЕМ і, відповідно, багатоопорний метод розрахунку контурних струмів.

Завдання розрахунку усталених режимів роботи електричних мереж (ЕМ) полягає у визначенні напруги у вузлах, струмів в елементах, потоків і втрат потужності в елементах ЕМ. Вибір методу розрахунку усталених режимів роботи ЕМ залежить від постановки завдання, мети і початкових даних. Для розрахунків усталених електричних режимів в комп’ютерних диспетчерських тренажерах зазвичай використовуються системи нелінійних алгебраїчних рівнянь у формі

балансу потужностей $[\dot{S}_s]$ вузлів. Транспонований вектор повних вузлових потужностей $[\dot{S}_s]^T$ вузлів ЕМ, виражений через вузлові струми $[\dot{I}_s]$ і напруги $\dot{U}_s$, можна записати так:

$$[\dot{S}_s]^T = [\dot{I}_s]^T [\hat{U}_s]_d, \qquad (2.3)$$

де $[\hat{U}_s]_d$ - діагональна матриця спряжених векторів напруги вузлів; $[\dot{I}_s]^T$ транспонований вектор-стовпець струмів вузлів.

Струми вузлів ЕМ можна розраховувати за допомогою лінійного алгебраїчного рівняння:

$$[\dot{I}_s] = [\dot{Y}_{ss}][\dot{U}_s], \qquad (2.4)$$

де $[\dot{Y}_{ss}]$ - комплексна матриця відомих вузлових провідностей електричної мережі; $[\dot{U}_s]$ - вектор-стовпець невідомих комплексних напруг вузлів; $[\dot{I}_s]$ - вектор-стовпець комплексних відомих/заданих струмів вузлів.

Згідно із розробленим алгоритмом, всю мережу автоматично поділяють спочатку на окремі частини, а окремі частини – на окремі дерева та хорди.

Операцію розділення ОЕС на окремі ЕС (частини) шляхом визначення хорд (ліній електропередач) з граничними вузлами, які утворюють ОЕС будемо називати декомпозицією першого рівня. Декомпозиція другого рівня полягає в розділенні схем заміщення паралельно працюючих окремих ЕС на окремі дерева та хорди.

Кожне дерево завжди має лише один опорний вузол із джерелом енергії. Опорні вузли виконують функції балансуючих з урахуванням існуючих фізичних обмежень з генерації. Хорди (зв’язки) між деревами можуть утворювати звичайні або вироджені незалежні контури, струми яких розраховуються після кожної поточної ітерації процесу розрахунку напруги вузлів. Автоматизована система розрахунків режимів у складі тренажера використовує (у програмній реалізації) класи вузлів, гілок, дерев, хорд і реалізована таким чином, що будь-яка хорда або гілка дерева мережі однозначно визначаються адресами початкового та кінцевого

вузлів, які можуть бути розміщені в різних базах даних на різних серверах, включаючи віртуальні.

Щодо збіжності ітераційних процесів пропонованого алгоритму розрахунку режимів роботи ЕС і можливості фізичного існування режимів в методі використовуються деякі евристичні попереджувальні заходи.

Для попередньої оцінки можливості збіжності ітераційного процесу аналізується баланс потужності. Спочатку виконується розрахунок режиму для ЕМ із заданими векторами напруги (модулями і нульовими кутами) вузлів джерел енергії з метою визначити сумарні втрати потужності. У випадку, якщо отримані втрати є більшими від наперед заданих, то використовується гіпотеза про відсутність в цьому випадку існування режиму і, очевидно, треба змінити навантаження деяких вузлів. В розрахункових циклах також виконується перевірка струмів гілок на термічну стійкість і перевірка напруг вузлів. Це дозволяє виділяти і брати до уваги тільки клас прогнозовано фізично можливих режимів і, таким чином, підвищувати вірогідність збіжності пропонованого методу.

Більшість сучасних програмних систем для розрахунку режимів великих ЕС мають ряд обмежень щодо способів завдання балансуючих вузлів джерел генерації у розрахункових схемах. Зазвичай використовуються три основні моделі вузлів з джерелами енергії: вузли з фіксацією модулів напруги і відомою активною/заданою генерацією (розраховують невідомі реактивну потужність генерації ***Q*** і кут напруги), вузли з фіксацією вектору напруги (розраховують невідомі активну ***P*** і реактивну ***Q*** потужності генерації), а також вузли з фіксацією **P**=const, **Q**=const (розраховують комплексну напругу). В існуючих промислових комплексах розрахунку режимів передбачається, що є тільки один балансуючий вузол, а призначити вузли з фіксацією векторів напруги з різними кутами неможливо. В пропонованому алгоритмі кількість вузлів з фіксацією векторів напруги ЕМ не обмежуються. Саме ця можливість дозволяє створити та застосувати розосереджене моделююче середовище для забезпечення функціонування веб-орієнтованих комп’ютерних тренажерів оперативно-диспетчерського персоналу ЕС і ОЕС.

Застосування декомпозиції дозволяє розділити рівняння (1) на *t* окремих рівнянь, кількість яких дорівнює кількості автоматично виділених дерев і тоді (2) для *t-го* дерева можна записати наступним чином.

$$\left[\dot{\boldsymbol{Y}}_{\boldsymbol{ss}}\right]_{\boldsymbol{t}}\left[\dot{\boldsymbol{U}}_{\boldsymbol{s}}\right]_{\boldsymbol{t}} = \left[\dot{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{s}}\right]_{\boldsymbol{t}} \pm \left[\dot{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{h}}\right]_{\boldsymbol{t,t+1}}, \qquad (2.5)$$

де $\left[\dot{Y}_{ss}\right]_t$ - матриця вузлових провідностей *t-го* дерева ; $\left[\dot{U}_s\right]_t$ - вектор-стовпець напруги вузлів *t-го* дерева ; $\left[\dot{I}_h\right]_{t,t+1}$ - вектор-стовпець струмів хорд між вузлами *t*-го та *(t+1)* дерев .

Вектор різниці напруг $\left[\Delta\dot{U}_h\right]_{t,t+1}$ між граничними вузлами хорд обчислюється так:

$$\left[\Delta\dot{\boldsymbol{U}}_{\boldsymbol{h}}\right]_{\boldsymbol{t,t+1}} = \left[\dot{\boldsymbol{U}}_{\boldsymbol{sg}}\right]_{\boldsymbol{t}} - \left[\dot{\boldsymbol{U}}_{\boldsymbol{sg}}\right]_{\boldsymbol{t+1}}. \qquad (2.6)$$

Вектор струмів хорд $\left[\dot{I}_h\right]_{t,t+1}^{T}$ між граничними вузлами *t*-го та *(t+1)* дерев розраховуються так:

$$\left[\dot{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{h}}\right]_{\boldsymbol{t,t+1}}^{\boldsymbol{T}} = \left[\Delta\dot{\boldsymbol{U}}_{\boldsymbol{h}}\right]_{\boldsymbol{t,t+1}}^{\boldsymbol{T}}\left[\dot{\boldsymbol{Y}}_{\boldsymbol{h}}\right]_{\boldsymbol{d\ t,t+1}}, \qquad (2.7)$$

де $\left[\dot{Y}_h\right]_{d\ t,t+1}$ – діагональна матриця провідностей хорд між граничними вузлами *t*-го та *(t+1)* дерев.

Вектор потоку потужності на початку хорд можна визначити за допомогою формули:

$\left[\dot{S}_h\right]_{t,t+1}^{T} = \left[\dot{I}_h\right]_{t,t+1}^{T}\left[\widehat{U}_{sg}\right]_{d\ t}$, а вектор потоку потужності у кінці –

$$\left[\dot{S}_h\right]_{t,t+1}^{T} = \left[\dot{I}_h\right]_{t,t+1}^{T}\left[\widehat{U}_{sg}\right]_{d\ t+1}.$$

Баланс потужностей вузлів для *t-го* дерева можна представити у наступному вигляді:

$$\left[\dot{I}_s\right]_{t}^{T}\left[\widehat{U}_s\right]_{d\ t} = \left[\dot{S}_s\right]_{t}^{T} \pm \left[\dot{S}_h\right]_{t,t+1}^{T},$$

а для *(t+1)-го* дерева:

$$\left[\dot{I}_s\right]_{t+1}^{T}\left[\widehat{U}_s\right]_{d\ t+1} = \left[\dot{S}_s\right]_{t+1}^{T} \pm \left[\dot{S}_h\right]_{t,t+1}^{T}.$$

Такий підхід до розрахунків режимів за допомогою дворівневої декомпозиції великих ОЕС дозволяє розділити процес рішення рівняння (1) на окремі паралельні

процеси із можливістю залучення віртуальних комп'ютерів (хмарних технологій) та технології паралельних обчислень. Для забезпечення однозначної адресації вузлів і гілок розрахункової схеми ОЕС їх адреси доповнюються номерами (IP) серверів та іменами баз даних (БД), в яких вони розміщені. Імена таблиць з інформацією про вузли і гілки є однаковими для всіх БД і тому не потребують додаткової ідентифікації.

Алгоритм багатоопорного методу розрахунку контурних струмів у загальному вигляді можна сформулювати наступним чином:

1. Попередньо до загальної схеми ОЕС застосовується дворівнева декомпозиція, гілки дерев впорядковуються, починаючи з опорних вузлів, по рівням (ярусам).

2. В якості початкових наближень для напруг всіх вузлів задаються номінальні напруги опорних вузлів для всіх виділених дерев.

3. Розраховуються (уточняються) струми вузлів $\dot{I}_s$ всіх *t* дерев:

$$\dot{I}_s^{(i+1)} = \dot{I}_s^{(i)} + k2 \cdot (\Delta\dot{S}_s^{(i)}) / \widehat{U}_s^{(i)} \pm \sum_{k=1}^{k=l} \dot{I}_{hk}^{(i)},$$

де $k2$ – оптимальний [9,10] коефіцієнт прискорення зовнішнього ітераційного процесу; $\Delta\dot{S}_s^{(i)}$ небаланс потужності *s*-го вузла; $\widehat{U}_s^{(i)}$ - спряжений вектор напруги *s* -го вузла схеми; $\dot{I}_{hk}^{(i)}$ – струм *k*-ї хорди *s*-го вузла; *l* – кількість хорд *s*-го вузла; *i* – номер ітерації.

Розраховується максимальний небаланс $max\ (\Delta\dot{S}_s^{(i)})$ поточних потужностей вузлів, в якості критерію збіжності використовується вираз:

$$max\ (\Delta\dot{S}_s^{(i)}) = \dot{S}_{s\,\text{зад}} - \dot{S}_s^{(i)} \le \Delta\dot{S}_{s\,\text{зад}},$$

де $\dot{S}_{s\,\text{зад}}$ - задана потужність *s* -го вузла; $\dot{S}_s^{(i)}$ – розрахункова потужність *s* -го вузла; $\Delta\dot{S}_{s\,\text{зад}}$ – наперед задана максимально допустима похибка розрахунку; *i* – номер ітерації.

Якщо ітераційний процес зійшовся, то управління передається на п.8.

4. Розраховуються в циклі струми гілок $\dot{I}_{ij}$, починаючи з кінцевих гілок *ij*, впорядкованих по рівням дерев, і до опорного вузла дерева:

$$\dot{I}_{ij}^{\text{п р}} = \dot{I}_{ij}^{\text{п р}} + \dot{I}_{ij}^{\text{н р}},$$

де $\dot{I}_{ij}^{\text{п р}}$ – струм гілки *ij* поточного рівня; $\dot{I}_{ij}^{\text{н р}}$ – струм гілки *ij* наступного рівня.

Слід відзначити, що струм гілки кінцевого рівня дерева дорівнює струму кінцевого вузла дерева. У цьому циклі перевіряються обмеження для струмів кожної гілки на термічну міцність.

5. В циклі розраховуються напруги вузлів, починаючи від опорних вузлів дерев:

$$\dot{U}_{sj} = \dot{U}_{si} - \dot{I}_{ij} \cdot Z_{ij},$$

де $\dot{U}_{sj}$ – напруга вузла, що є кінцем гілки *ij*; $\dot{U}_{si}$ – відома напруга вузла, що є початком гілки *ij*; $\dot{I}_{ij}$ – відомий струм гілки *ij; Z_{ij}* – опір гілки *ij*.

Для трансформаторних гілок враховується комплексний коефіцієнт трансформації. Перевіряються розраховані напруги вузлів на відповідність допустимим межам.

6. В циклі розраховуються струми всіх хорд $\left[\dot{I}_h\right]_{t,t+1}$ за формулою (5) і перевіряються отримані значення струмів на перевищення заданих меж.

7. Передача управління п.3.

8. Запис результатів в БД.

Наведений алгоритм методу був реалізований мовою JAVA у вигляді вбудованих функцій БД ORACLE та PostgreSQL для використання в комп'ютерному диспетчерському тренажері PORT.

Для проведення експериментальних розрахунків режимів роботи були використані моделі розміщених в окремих БД шести ЕС з наступними параметрами: Центральна (939 вузлів, 1190 гілок), Південно-Західна (686 вузлів, 820 гілок), Південна (382 вузла, 551 гілка), Дніпровська (568 вузлів, 863 гілок), Західна (634 вузла, 774 гілки) і Північна (4058 вузлів, 4799 гілок). Для розрахунку режимів використовувались чотирьохядерні процесори типу Intel Core i9-9900K. Результати чисельних розрахунків усталених режимів роботи ЕС у складі ОЕС України показали, що час їх розрахунку в процесі виконання персоналом тренувальних занять за тематикою технології оперативних перемикань в ЕМ не

перевищує 2 секунд, що є прийнятним для використання в диспетчерських тренажерах для організації тренажерної підготовки персоналу.

Для ілюстрації цього методу розглянемо невелику тестову схему (Рис. 2.**6**) з результатами декомпозиції першого рівня.

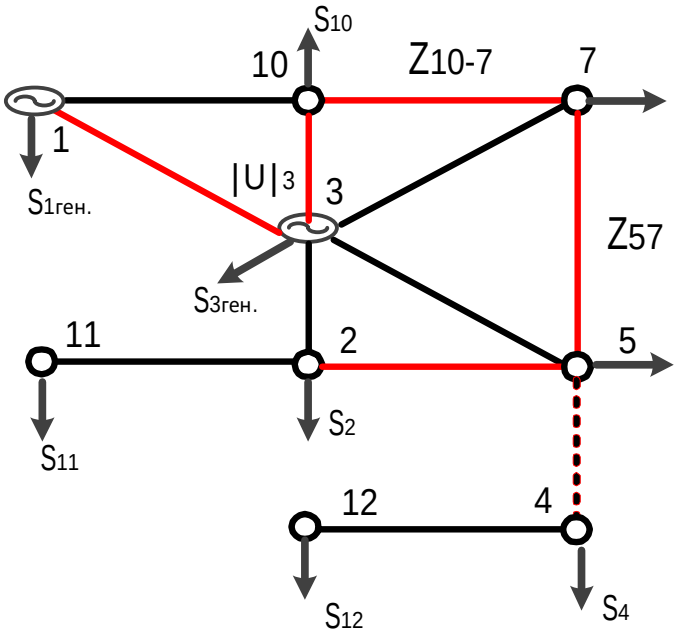


Рис. 2.6. Тестова схема для ілюстрації багатоопорного методу (червоний колір для хорд)

Топологія любої ЕМ зазвичай однозначно описується двома таблицями, в яких наводяться інформаційні моделі вузлів (Рис. 2.7) і гілок (Рис. 2.8).

id	Номер вузла	Тип вузла	Параметри
1	1	m	
2	2		
3	10		
4	3	v	
5	5		
6	7		
7	11		
8	4		
9	12		

Рис. 2.7. Таблиця параметрів вузлів тестової схеми – топологія ЕМ

№	№ Початку	№ Кінця	NIVKL	Параметри
1	2	5	y	
2	2	3	y	
3	3	5	y	
4	3	7	y	
5	5	7	y	
6	1	3	y	
7	10	3	y	
8	1	10	y	
9	7	10	y	
10	2	11	y	
11	5	4	n	
12	4	12	y	

Рис. 2.8. Таблиця параметрів гілок тестової схеми – топологія ЕМ

В результаті автоматичного виділення окремих дерев і хорд ЕМ (Рис. 2.**9**), за допомогою розробленого автором алгоритму, отримаємо три дерева, п’ять хорд, топологія яких у вигляді системи автоматизації розрахунків наведена на Рис. 2.10. В процесі програмування необхідно врахувати, що нумерація в масивах мови JAVA розпочинається з нуля.

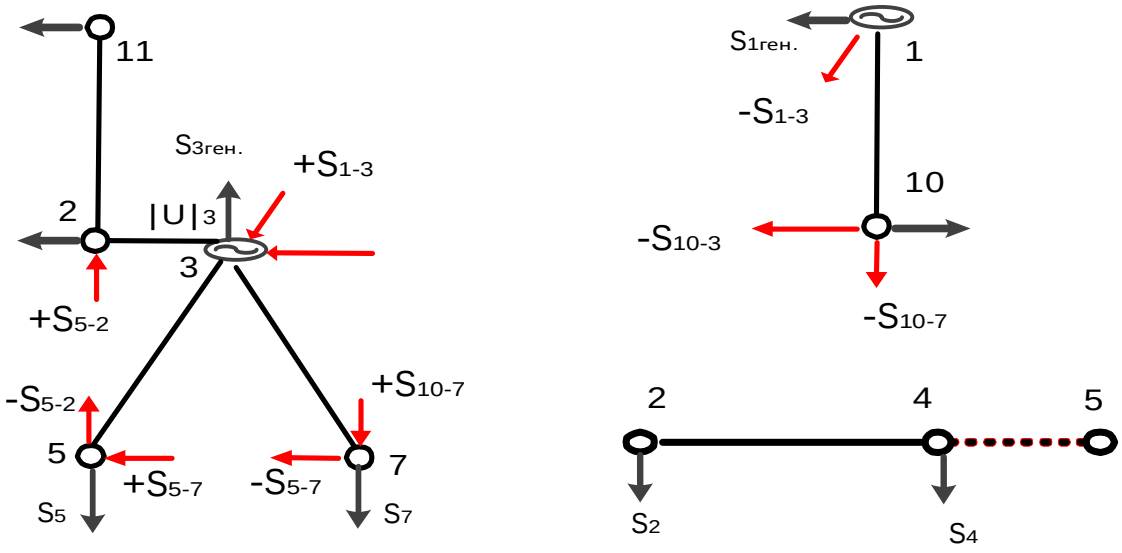


Рис. 2.9. Результати декомпозиції розрахункової схеми ЕМ першого рівня (сформовано 3 дерева).

γ_s	α	β
1	8	3
4	2	2
4	3	5
4	4	6
2	10	7

γ_1	α_v	γ_2
1	6	4
3	7	4
2	1	5
6	9	3
5	5	6

Рис. 2.10. Система автоматизації розрахунків у вигляді таблиць адресних посилань для гілок дерев та хорд

Вузли 4, 12 та гілки 4-12 і 4-5 відносяться до так званої «погашеної» підсистеми без джерел енергії.

Важливою відмінністю розроблених алгоритмів і методів побудови топологічних моделей ЕМ від існуючих є вбудована можливість конструювання в реальному часі відповідних топологічних моделей, швидкого їх аналізу та розрахунку режимів роботи автономних і паралельно працюючих ЕЕС. Результати таких розрахунків є дуже важливою складовою інформації для прийняття ефективних прогнозних рішень оперативно-диспетчерським персоналом в процесі тренажерних підготовки. Штучне створення в реальних умовах більшості таких типів топології ЕМ з метою використання для тренувальних занять не завжди можливе для реалізації. Тому використання комп’ютерних тренажерів для цієї мети є доцільним і дуже ефективним.

Розрахунки в завданнях, пов'язаних з графами, помітно спрощуються, якщо їх елементи спеціальним чином впорядковані для використання системою автоматизації ітераційних розрахунків. Під впорядковуванням вершин зв'язного орграфа без циклів розуміють таке розбиття його вершин на групи (яруси), при якому:

1) вершини першої групи не мають попередніх вершин, а вершини останньої групи подальших;

2) вершини будь-якої іншої групи (ярусу) не мають передуючих в наступній групі;

3) вершини однієї і тієї ж групи хордами (дугами) не з'єднуються.

Аналогічним чином вводиться поняття впорядкування дуг. В результаті впорядкування елементів отримують орграф, ізоморфний початковому. Впорядкування елементів виконується графічним або матричним способом. Графічний спосіб впорядковування вершин, дуг орграфа носить назву алгоритму Фалкерсона [133].

Алгоритм Фалкерсона для впорядкування вершин полягає в наступному:

1. Знаходять вершини графа, в які не входить жодна дуга. Вони утворюють першу групу (ярус). Нумерують вершини групи в натуральному порядку 1, 2, ... При цьому привласнення номерів вершинам усередині групи може бути зроблене не єдиним чином, що не має значення.

2. Подумки викреслюємо усі пронумеровані вершини і дуги, що з них виходять. У графові, що вийшов, знайдеться, принаймні, одна вершина, в яку не входить жодна дуга. Цій вершині, що входить до другої групи (ярусу), привласнюється черговий номер і так далі. Цей крок повторюється до тих пір, поки усі вершини не будуть впорядковані (пронумеровані).

Алгоритм Фалкерсона для впорядкування дуг:

1. Знайти дуги, що не мають безпосередньо передуючих (вони утворюють I групу – I ярус).

2. Викреслити знайдені дуги; після цього з'явиться, принаймні, одна нова дуга, що не має безпосередньо передуючою (у графі без дуг I групи – I ярусу). Такі дуги складають II групу – II ярус. Повторювати цей крок, поки усі дуги не будуть розбиті на групи. На закінчення впорядкування дугам привласнюють нові позначення з індексами 1, 2, ...

В роботі використовується модифікований алгоритм Фалкерсона. Модифікація полягає у формуванні додаткових систем адресних посилань на відповідні дуги і яруси в напрямах до (розраховуються струми гілок) і від гілок кореня дерева (розраховується напруга кінцевих вузлів гілок). Це дозволяє швидко

корегувати поточну конфігурацію ЕМ без конструювання нових топологічних моделей. Такий підхід значно зменшує час розрахунків режимів роботи ЕМ у випадках інтенсивної роботи комутаційних апаратів і частої зміни топології ЕМ. На Рис. 2.11 наведено фрагмент алгоритму автоматичного конструювання системи автоматизації розрахунків режимів роботи великих ЕЕС у вигляді таблиць адресних посилань.

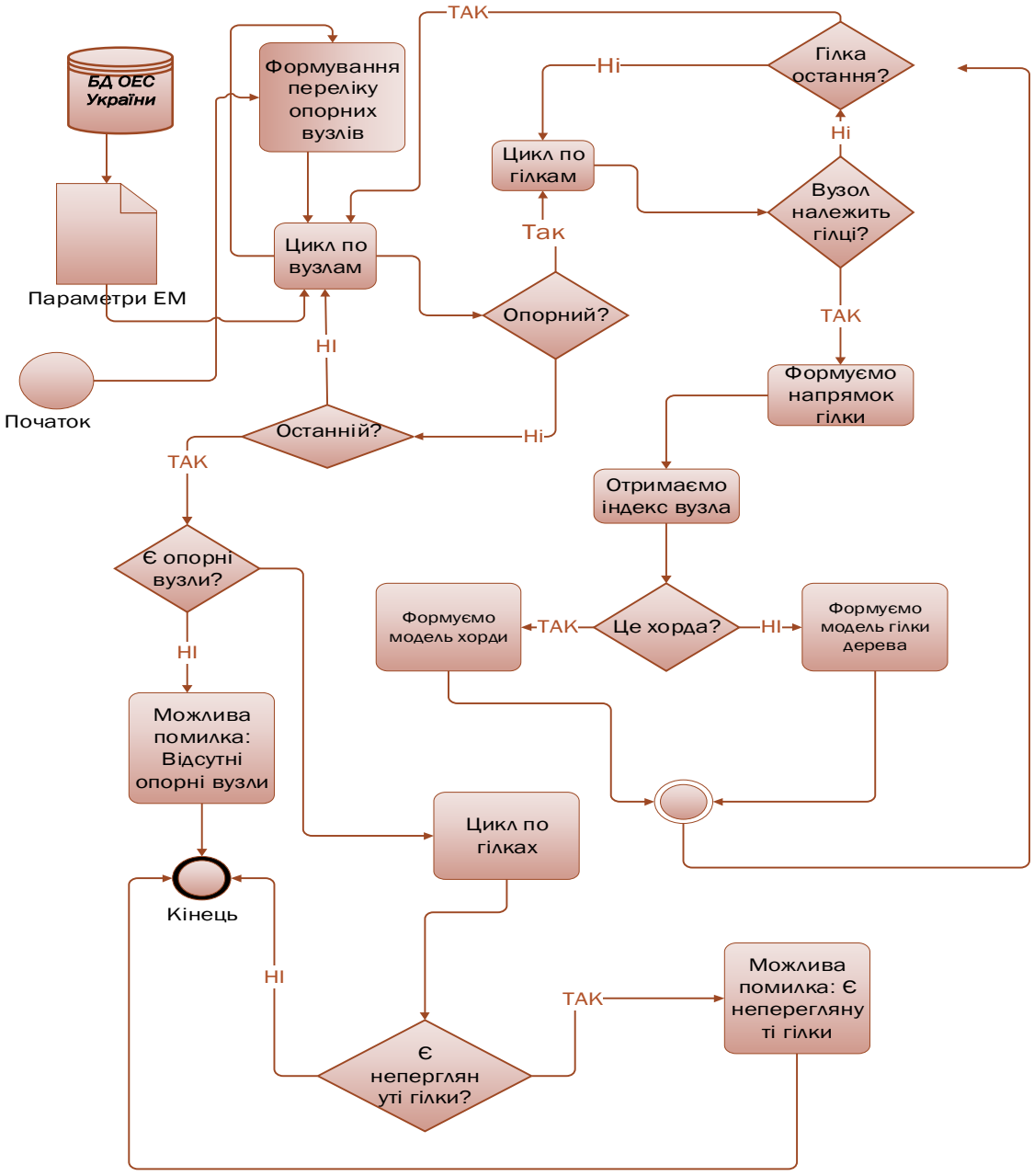


Рис. 2.11. Фрагмент алгоритму конструювання системи автоматизації розрахунків режимів роботи великих ЕЕС – моделей дерева і хорд

Наявні тестові схеми американського Інституту інженерів з електротехніки та електроніки (англ. Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) широко використовуються дослідниками для реалізації нових ідей та концепцій. В роботі розглянута, в якості прикладу і ілюстрації деталей багатоопорного методу розрахунку режимів роботи ЕЕС, електрична мережа тестової схеми IEEE 14-шинної системи [93]. Тестова схема (14 вузлів, 20 гілок) складається з навантажень, конденсаторних банків, ліній електропередачі та генераторів, як показано на Рис. 2.**12**.

Кожна синхронна машина (генератор) представлена як джерело напруги. У

Таблиця 2.**2** наведені узагальнені характеристики кожного джерела (V – модуль напруги вузла; **δ** – кут наруги; **P** - активна генерація; Q - реактивна генерація).

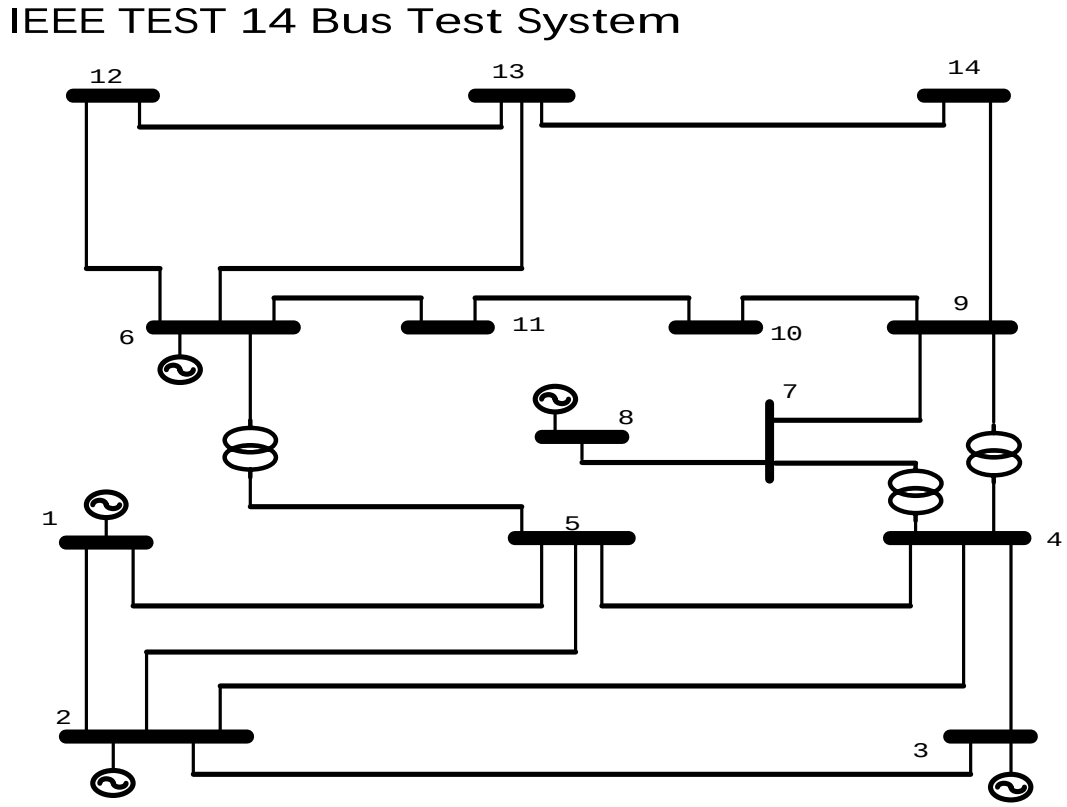


Рис. 2.12. Тестова схема IEEE 14 вузлів, 5 генераторів

Таблиця 2.2

Параметри опорних вузлів - джерел енергії

Номер вузла	Напруга V [kV]	Кут δ [градуси]	P [МВт]	Q [МВАр]
1	146.28	0.0000	-232.39	16.55
2	144.21	-4.9826	-40.00	43.56
3	139.38	-12.7250	0.00	25.08
6	147.66	-14.2209	0.00	12.73
8	150.42	-13.3596	0.00	17.62

Лінії електропередачі моделюються за допомогою моделі Bergeron (П-образна заступна схема, Рис. 2.13). У Таблиця 2.3 підсумовані параметри лінії електропередачі.

Таблиця 2.3

Параметри лінії електропередачі

Лінія		R [Ом]	X [Ом]	Провідність B [Сіменси]
Вузол початку	Вузол кінця			
1	2	10.252	31.3009	0.0000998
1	5	28.5819	117.9882	0.000093
2	3	24.8577	104.7261	0.0000828
2	4	30.7402	93.2733	0.0000643
2	5	28.5819	117.9882	0.000093
3	4	24.8577	104.7261	0.0000828
4	5	30.7402	93.2733	0.0000643
6	11	12.5611	26.3045	0
6	12	16.2548	33.8309	0
6	13	8.7483	17.2282	0
7	8	0	23.2958	0
7	9	0	14.5488	0
9	10	4.2068	11.1751	0
9	14	16.8103	35.7578	0
10	11	10.8511	25.4013	0
12	13	29.2167	26.4341	0
13	14	22.6055	46.0256	0

Навантаження моделюються як постійне навантаження PQ з параметрами, як показано в Таблиця 2.4.

Таблиця 2.4

Параметри навантаження вузлів

Вузол	**P [МВт]**	**Q [МВАр]**
2	21.7	-12.7
3	94.2	-19.0
4	47.8	3.9
5	7.6	-1.6
6	11.2	-7.5
9	29.5	-16.6
10	9.0	-5.8
11	3.5	-1.8
12	6.1	-1.6
13	13.5	-5.8
14	14.9	-5.0

Перевірка ефективності розроблених автором інформаційних і топологічних моделей ЕМ для використання в повнофункціональному режимному тренажері (ПОРТ) була підтверджена відповідно до значень потоку потужності за допомогою відомих програмних комплексів розрахунку режимів PSS/E та PSCAD [87]. У Таблиця 2.5 наведено результати порівняння лінійних та джерельних потоків живлення. Час розрахунку режимів не порівнювався і в Таблиця 2.5 не наведено.

Таблиця 2.5

Перевірка (валідація) результатів розрахунку

Вузол		**PSS/E**		**PSCAD**		**ПОРТ**	
		P [МВт]	**Q [МВАр]**	**P [МВт]**	**Q [МВАр]**	**P [МВт]**	**Q [МВАр]**
1		-232.4	16.5	-232.30	15.48	-232.39	-16.55
2		-40.0	43.6	-39.95	44.93	-40	43.56
3		0.000	25.1	0.07	26.13	0	25.08
6		0.000	12.7	0.20	14.98	0	12.73
8		0.000	17.6	-0.11	18.96	0	17.62
Вузол початку	**Вузол кінця**						
1	2	1.569	-0.204	1.5690	-0.2005	1.5687	-0.2041
1	5	0.755	0.039	0.7543	0.0450	0.7551	0.0385
2	3	0.709	-0.016	0.7096	-0.0164	0.7092	-0.0160
2	4	0.561	-0.030	0.5606	-0.0209	0.5613	-0.0155
2	5	0.406	0.012	0.4043	0.0165	0.4152	0.0117

Вузол		PSS/E		PSCAD		ПОРТ	
		P [МВт]	Q [МВАр]	P [МВт]	Q [МВАр]	P [МВт]	Q [МВАр]
3	4	0.237	-0.048	0.2354	-0.0540	0.2329	-0.0447
4	5	0.612	-0.158	0.6130	-0.1750	0.6116	-0.1583
6	11	0.074	0.034	0.0747	0.0384	0.0735	0.0356
6	12	0.078	0.025	0.0781	0.0253	0.0778	0.02.50
6	13	0.177	0.072	0.1782	0.0740	0.1775	0.0721
7	8	0.000	0.176	0.0011	0.1844	0	0.1716
7	9	0.281	0.050	0.2793	-0.0539	0.2807	-0.0576
9	10	0.052	0.042	0.0511	0.0380	0.0523	0.0422
9	14	0.093	0.034	0.0878	0.0217	0.0942	0.0361
10	11	0.038	0.016	0.0390	0.0200	0.0378	0.0162
12	13	0.016	0.008	0.0166	0.0080	0.0161	0.0075
13	14	0.056	0.017	0.0568	0.0188	0.0564	0.0175

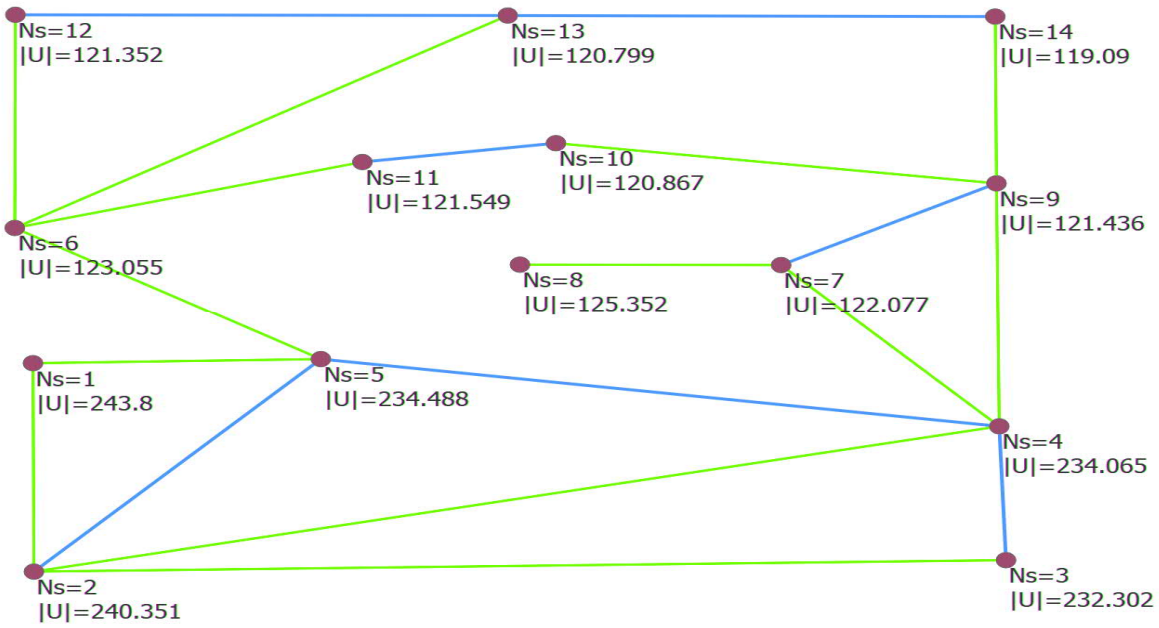


Рис. 2.13. Граф заступної схеми тестової ЕМ IEEE 14 вузлів для одно опорної декомпозиції

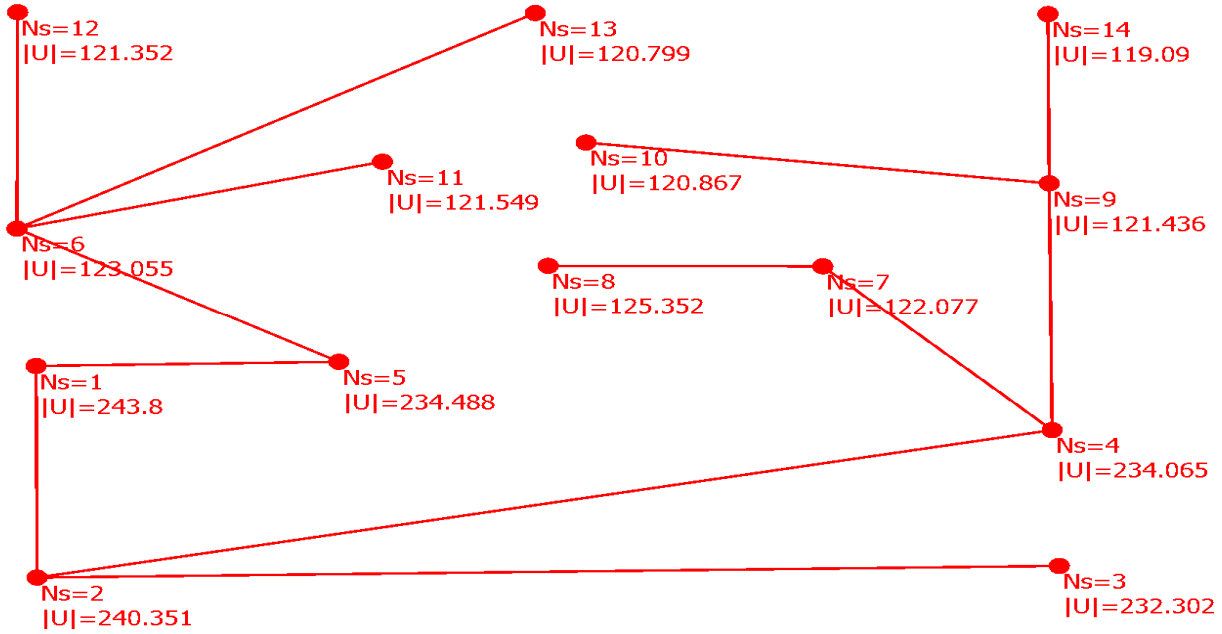


Рис. 2.14 Граф дерева заступної схеми тестової ЕМ IEEE 14 вузлів для одно опорної декомпозиції (один опорний вузол №1 і одне дерево)

Рівняння 1-го закону Ома для цієї схеми у випадку одно опорної декомпозиції має наступний вигляд.

$$\begin{bmatrix} I_{k1} \\ I_{k2} \\ I_{k3} \\ I_{k4} \\ I_{k5} \\ I_{k6} \\ I_{k7} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 & Z_{12} & 0 & Z_{14} & Z_{15} & 0 & Z_{17} \\ Z_{21} & Z_2 & Z_{23} & Z_{24} & Z_{25} & 0 & Z_{27} \\ 0 & Z_{32} & Z_3 & Z_{34} & Z_{35} & 0 & Z_{36} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_4 & Z_{45} & 0 & Z_{47} \\ Z_{51} & Z_{52} & Z_{53} & Z_{54} & Z_5 & 0 & Z_{57} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_6 & Z_{67} \\ Z_{61} & Z_{62} & Z_{63} & Z_{64} & Z_{65} & Z_{66} & Z_7 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\dot{U}_{2-5} \\ \Delta\dot{U}_{4-5} \\ \Delta\dot{U}_{3-4} \\ \Delta\dot{U}_{7-9} \\ \Delta\dot{U}_{10-11} \\ \Delta\dot{U}_{12-13} \\ \Delta\dot{U}_{13-14} \end{bmatrix}, \quad (2.8)$$

де I_{k1} … I_{k7} – струми відповідно із 1-го по 7-й контур; $Z_1 = Z_{12} + Z_{15} + Z_{25}$ – опір 1-го контуру; $Z_2 = Z_{12} + Z_{15} + Z_{24} + Z_{45}$ - опір 2-го контуру; $Z_3 = Z_{23} + Z_{24} + Z_{34}$ - опір 3-го контуру; $Z_4 = Z_{47} + Z_{49} + Z_{79}$ – опір 4-го контуру; $Z_5 = Z_{12} + Z_{15} + Z_{24} + Z_{49} + Z_{9\,10} + Z_{10\,11} + Z_{6\,11} + Z_{56}$ – опір 5-го контуру; $Z_6 = Z_{6\,12} + Z_{6\,13} + Z_{12\,13}$ – опір 6-го контуру; $Z_7 = Z_{12} + Z_{15} + Z_{56} + Z_{6\,13} + Z_{24} + Z_{49} + Z_{9\,14} + Z_{13\,14}$ – опір 7-го контуру;

$\Delta\dot{U}_{2-5}$ - різниця напруги між вузлами 2 і 5; $\Delta\dot{U}_{4-5}$ - різниця напруги між вузлами 4 і 5; $\Delta\dot{U}_{3-4}$ - різниця напруги між вузлами 3 і 4; $\Delta\dot{U}_{7-9}$ - різниця напруги між вузлами 7 і 9; $\Delta\dot{U}_{10-11}$ - різниця напруги між вузлами 10 і 11; $\Delta\dot{U}_{12-13}$ - різниця напруги між

вузлами 12 і 13; $\Delta\dot{U}_{13-14}$ - різниця напруги між вузлами 13 і 14. Матриця опорів Z_k у випадку одно опорної декомпозиції завжди практично відносно сильно заповнена, але її розмірність завжди значно менша, ніж матриці провідностей.

Рівняння (2.8) можна також переписати наступним чином:

$$[I_k] = [Z_k]^{-1} \cdot [\Delta U_k],$$

де $[I_k]$ – вектор-стовпець контурних струмів; $[Z_k]^{-1}$ – звернена матриця контурних опорів тестової схеми; $[\Delta U_k]$ – різниця напруг на відповідних хордах.

Чисельні значення елементів матриці опорів контурів Z_1 подвоєної розмірності (14x14) мають наступний вигляд (

Таблиця 2.**6**):

Графік збіжності наведено на Рис. 2.15.

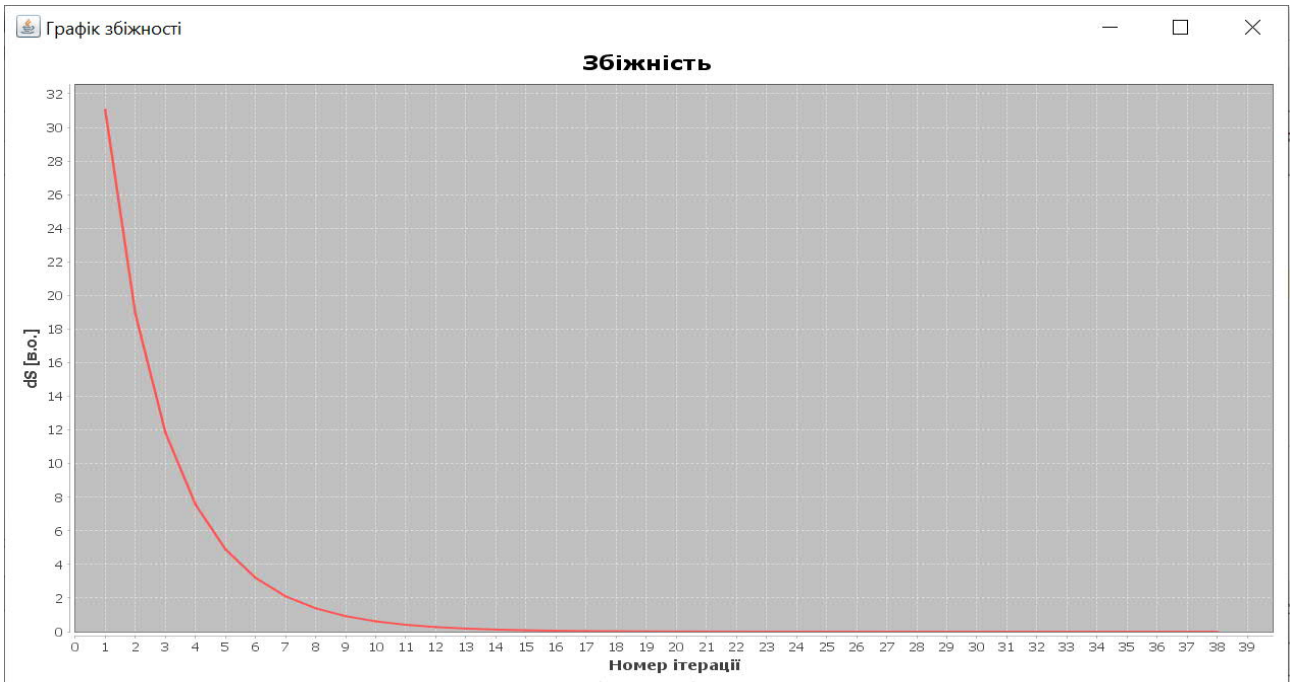


Рис. 2.15. Графік збіжності багатоопорного методу декомпозиції першого рівня

Таблиця 2.6

Z1		Z2		Z3		Z4		Z5		Z6		Z7	
68,96	-241,27	38,83	-149,29	0,00	0,00	-0,05	0,15	20,62	-79,45	0,00	0,00	-20,62	79,45
241,27	68,96	149,29	38,83	0,00	0,00	-0,15	-0,05	79,45	20,62	0,00	0,00	-79,45	-20,62
38,83	-149,29	76,64	-264,84	-30,74	93,27	-0,20	0,59	36,49	-127,58	0,00	0,00	-36,49	127,58
149,29	38,83	264,84	76,64	-93,27	-30,74	-0,59	-0,20	127,58	36,49	0,00	0,00	-127,58	-36,49
0,00	0,00	-30,74	93,27	91,05	-288,47	0,15	-0,45	-15,86	48,13	0,00	0,00	15,86	-48,13
0,00	0,00	-93,27	-30,74	288,47	91,05	0,45	0,15	-48,13	-15,86	0,00	0,00	48,13	15,86
-0,05	0,15	-0,20	0,59	0,15	-0,45	0,00	-115,77	-0,10	73,87	0,00	0,00	0,10	-73,87
-0,15	-0,05	-0,59	-0,20	0,45	0,15	115,77	0,00	-73,87	-0,10	0,00	0,00	73,87	0,10
20,62	-79,45	36,49	-127,58	-15,86	48,13	-0,10	73,87	46,76	-236,91	0,00	0,00	-19,14	174,03
79,45	20,62	127,58	36,49	-48,13	-15,86	-73,87	-0,10	236,91	46,76	0,00	0,00	-174,03	-19,14
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	54,22	-77,49	-8,75	17,23
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	77,49	54,22	-17,23	-8,75
-20,62	79,45	-36,49	127,58	15,86	-48,13	0,10	-73,87	-19,14	174,03	-8,75	17,23	67,31	-273,04
-79,45	-20,62	127,58	-36,49	48,13	15,86	73,87	0,10	174,03	-19,14	-17,23	-8,75	273,04	67,31

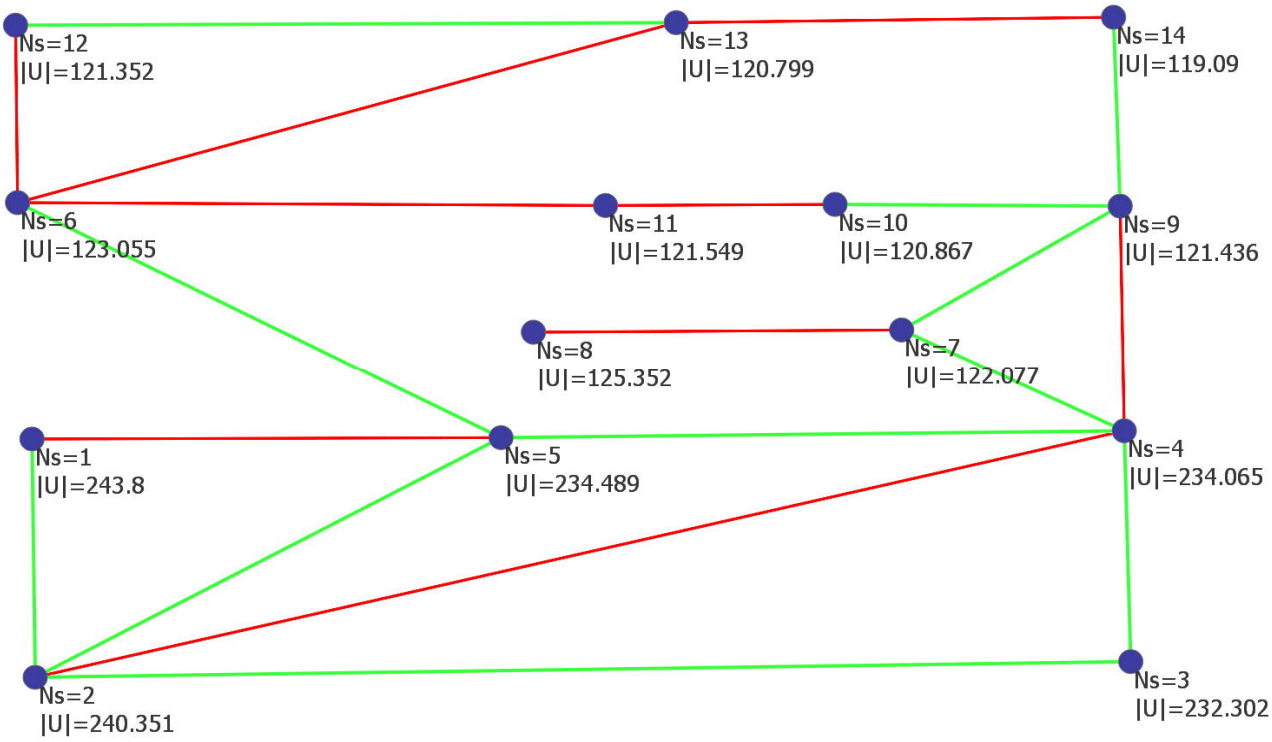


Рис. 2. 16. Граф розрахункової схеми тестової ЕМ IEEE 14 вузлів для багатоопорної декомпозиції – гілки зеленого кольору є хорди, червоного - дерева

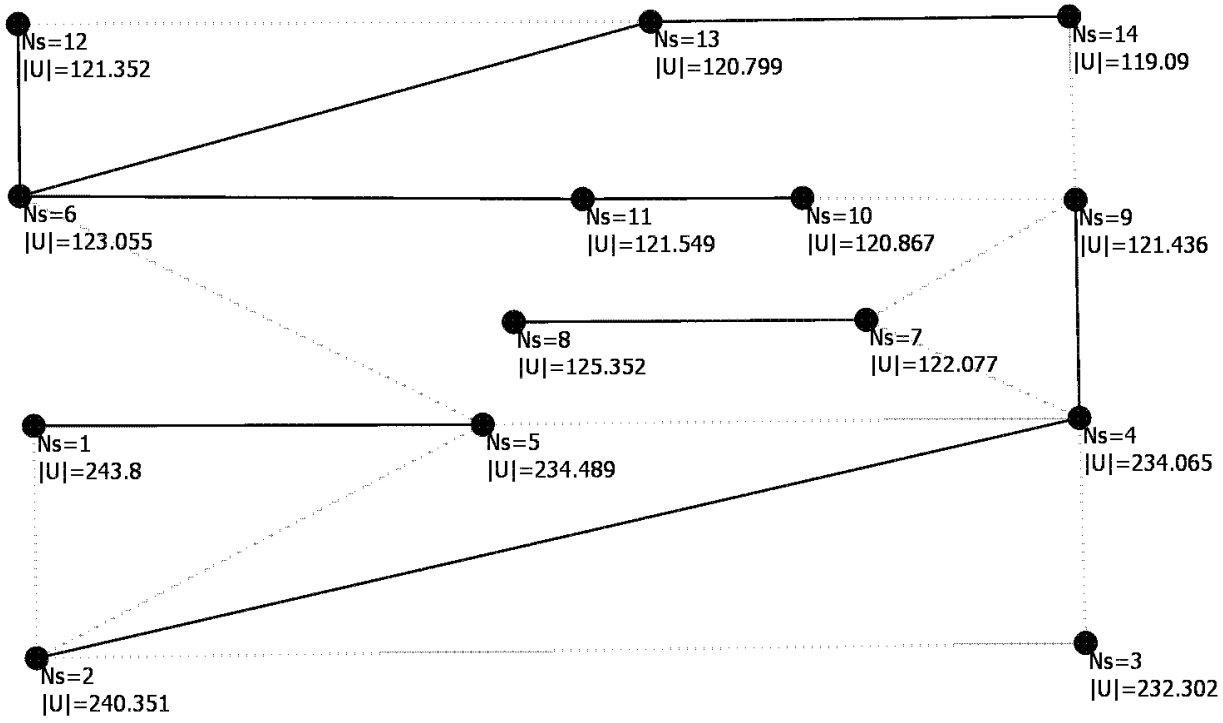


Рис. 2. 17 Графи (дерева) розрахункової схеми тестової ЕМ IEEE 14 вузлів для багатоопорної декомпозиції

Рівняння 1-го закону Ома для цієї схеми у випадку багатоопорної декомпозиції має наступний вигляд:

Для матриці розмірністю 11x11 маємо 38 ненульових недіагональних елементів (ННЕ). Матриця структурно симетрична. Сума недіагональних елементів рядків значно менша за діагональні.

$$\begin{bmatrix} \Delta U_{1-2} \\ \Delta U_{2-3} \\ \Delta U_{2-5} \\ \Delta U_{3-4} \\ \Delta U_{5-6} \\ \Delta U_{4-5} \\ \Delta U_{4-7} \\ \Delta U_{7-9} \\ \Delta U_{12-13} \\ \Delta U_{9-10} \\ \Delta U_{9-14} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_3 & 0 & Z_{35} & Z_{36} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_4 & 0 & Z_{46} & Z_{47} & Z_{48} & 0 & Z_{4\,10} & Z_{4\,11} \\ 0 & 0 & Z_{53} & 0 & Z_5 & Z_{56} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{63} & Z_{64} & Z_{65} & Z_6 & Z_{67} & Z_{68} & 0 & Z_{6\,10} & Z_{6\,11} \\ 0 & 0 & 0 & Z_{74} & 0 & Z_{76} & Z_7 & Z_{78} & 0 & Z_{7\,10} & Z_{7\,11} \\ 0 & 0 & 0 & Z_{84} & 0 & Z_{86} & Z_{87} & Z_8 & 0 & Z_{8\,10} & Z_{8\,11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_9 & 0 & Z_{9\,11} \\ 0 & 0 & 0 & Z_{10\,4} & 0 & Z_{10\,6} & Z_{10\,7} & Z_{10\,8} & 0 & Z_{10} & Z_{10\,11} \\ 0 & 0 & 0 & Z_{11\,4} & 0 & Z_{6\,11} & Z_{11\,7} & Z_{11\,8} & Z_{11\,9} & Z_{11\,10} & Z_{11} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{k1} \\ I_{k2} \\ I_{k3} \\ I_{k4} \\ I_{k5} \\ I_{k6} \\ I_{k7} \\ I_{k8} \\ I_{k9} \\ I_{k10} \\ I_{k11} \end{bmatrix},$$

де I_{k1} ... I_{k11} – струми відповідно із 1-го по 11-й контур; $Z_{\,1}$=$Z_{\,12}$ – опір 1-го контуру; $Z_{\,2}$=$Z_{\,23}$ - опір 2-го контуру; $Z_{\,3} = Z_{\,15} + Z_{\,25}$ - опір 3-го контуру; $Z_{\,4}$=$Z_{\,34} + Z_{\,24}$ – опір 4-го контуру; $Z_{\,5} = Z_{\,15} + Z_{\,56}$ – опір 5-го контуру; $Z_{\,6} = Z_{\,1\,5} + Z_{\,4\,5} + Z_{\,2\,4}$ – опір 6-го контуру; $Z_{\,7} = Z_{\,47} + Z_{\,24} + Z_{\,87}$ – опір 7-го контуру; $Z_{\,8} = Z_{\,24} + Z_{\,49} + Z_{\,87}$+$Z_{\,79}$ - опір 8-го контуру; $Z_{\,9} = Z_{\,6\,13} + Z_{\,6\,12} + Z_{\,12\,13}$ - опір 9-го контуру; $Z_{\,10} = Z_{\,9\,10} + Z_{\,6\,11} + Z_{\,11\,10}$+$Z_{\,24}$+$Z_{\,49}$ - опір 10-го контуру; $Z_{\,11} = Z_{\,9\,14} + Z_{\,6\,13} + Z_{\,13\,14}$+$Z_{\,24}$+$Z_{\,49}$ - опір 11-го контуру; $\Delta\dot{U}_{1-2}$ - різниця напруги між вузлами 1 і 2; $\Delta\dot{U}_{2-3}$ - різниця напруги між вузлами 2 і 3; $\Delta\dot{U}_{2-5}$ - різниця напруги між вузлами 2 і 5; $\Delta\dot{U}_{3-4}$ - різниця напруги між вузлами 3 і 4; $\Delta\dot{U}_{5-6}$ - різниця напруги між вузлами 5 і 6; $\Delta\dot{U}_{4-5}$ - різниця напруги між вузлами 4 і 5; $\Delta\dot{U}_{4-7}$ - різниця напруги між вузлами 4 і 7; $\Delta\dot{U}_{7-9}$ - різниця напруги між вузлами 7 і 9; $\Delta\dot{U}_{12-13}$ - різниця напруги між вузлами 12 і 13; $\Delta\dot{U}_{9-10}$ - різниця напруги між вузлами 9 і 10; $\Delta\dot{U}_{9-14}$ - різниця напруги між вузлами 9 і 14.

Матриця опорів Z_k у випадку багатоопорної декомпозиції завжди практично не сильно заповнена, але її розмірність завжди менша, ніж матриці провідностей, але трохи більша, ніж матриці у одно опорному випадку.

Потрібно відмітити, що одне дерево в одно опорному методі декомпозиції розділяється на декілька в багатоопорному і завжди дорівнює кількості опорних вузлів.

Також була розглянута у якості тестової широко відома схема New England під назвою IEEE TEST 39 BUS (Рис. 2. **18**). Після декомпозиції першого рівня для багатоопорного методу загальна розрахункова схема розділяється на десять окремих дерев (Рис. 2. 19 і Рис. 2. **20**).

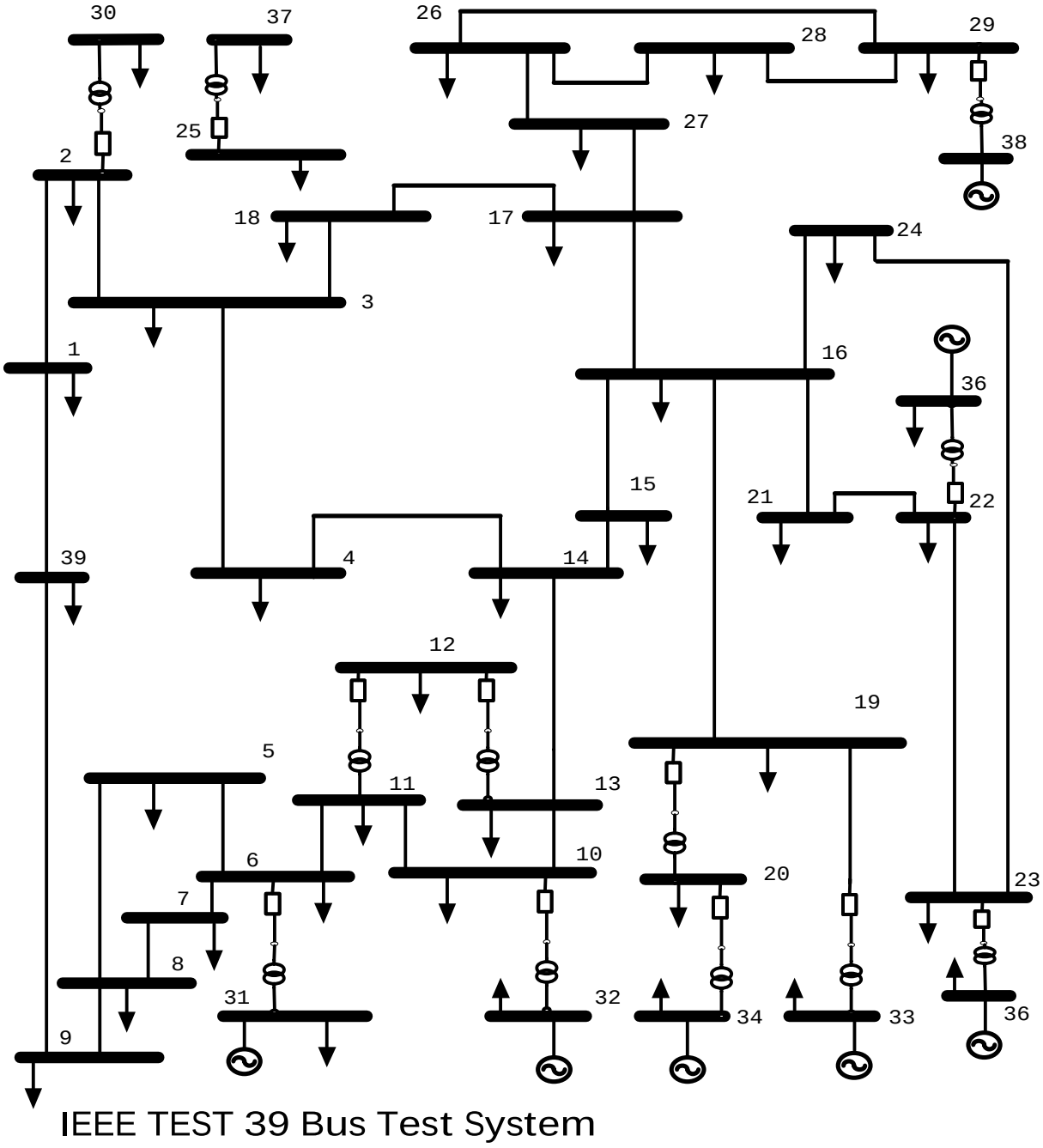


Рис. 2. 18. Тестова схема IEEE 39 вузлів, 10 генераторів

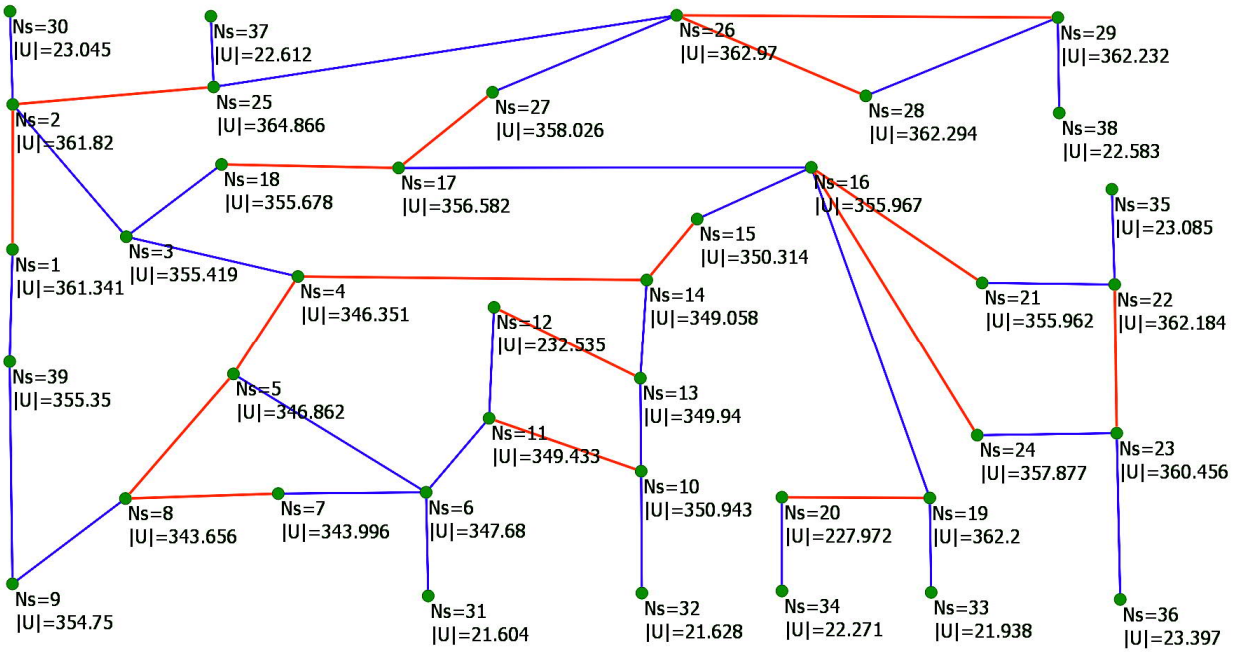


Рис. 2. 19. Тестова розрахункова схема EM IEEE TET 39 BUS, 10 генераторів у випадку багатоопорного методу, гілки червоного кольору є хорди, синього - дерева

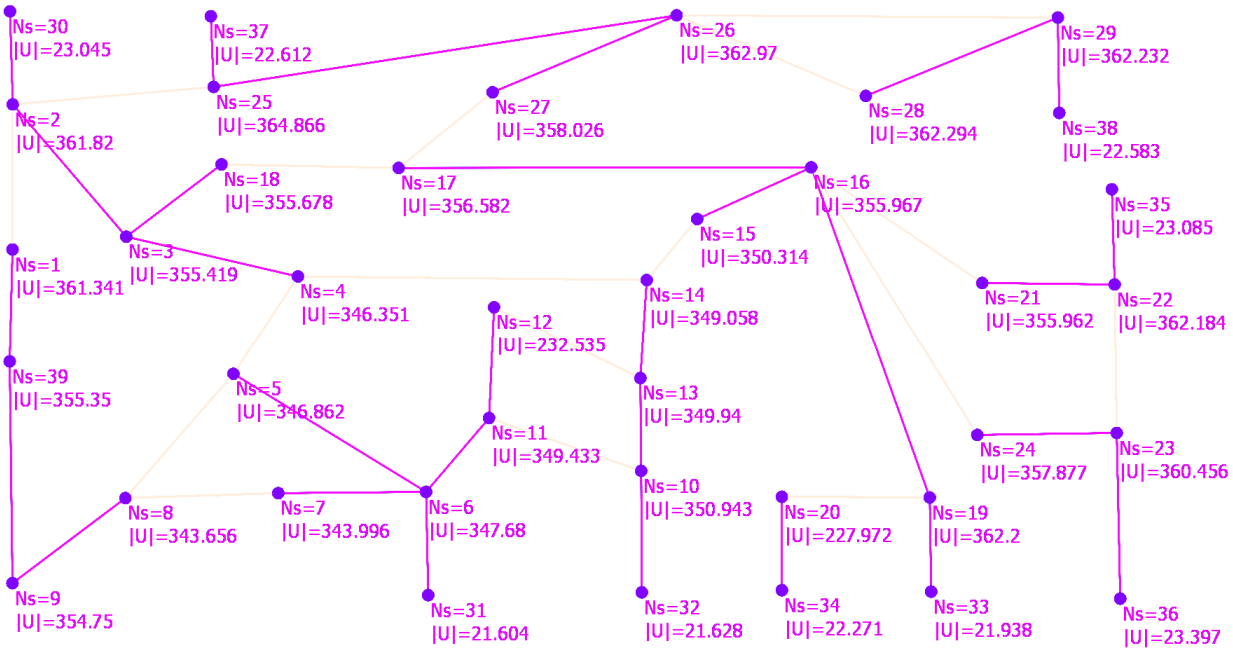


Рис. 2. 20 Тестова розрахункова схема EM IEEE TET 39 BUS автоматично розділена на 10 дерев

Під системою автоматизації розрахунків будемо розуміти програму попереднього автоматичного конструювання допоміжних структур асоціативних адресних посилань на вузли, гілки та хорди, які дозволяють

максимально швидко формувати елементи розріджених матриць провідностей, опору і Якобі для використання в різних методах рішення систем нелінійних алгебраїчних рівнянь (Таблиця 2.7, Позначення у **Ошибка! Неверная ссылка закладки.: IP** – адреса комп'ютера, на якому розташована відповідна БД із інформацією про параметри ЕМ, наприклад, 195.177.125.107; SID – ім'я БД, наприклад, ; Ni, Nj, Nij – відповідно номери моделей вузла початку, кінця і самої довільної гілки дерева.

Таблиця 2.8).

Важливість системи автоматизації розрахунків значно збільшується зі збільшенням розмірності систем нелінійних рівнянь. У цих випадках час, який витрачається на формування елементів відповідних матриць, відомих векторів-стовбців, зберігання результатів і таке інше наближається до часу самого методу розрахунку. Питання мінімізації часу на попередні обчислення стає таким же важливим, як і вибір методу розрахунку.

Непередбачене розділення великих ЕЕС на окремі, не завжди збалансовані підсистеми, часто викликається роботою відповідної системної автоматики, а відновлення паралельної роботи окремих підсистем виконується диспетчером виключно у ручному режимі. Сценарії тренувальних занять, пов'язані з розділенням МЕМ ОЕС на незалежні (автономні) підсистеми, і подальшим підключенням їх на паралельну роботу, є дуже складними, але ефективними, оскільки в реальних умовах це важко відтворити та часто це взагалі неможливо.

Таблиця 2.7

Моделі гілок дерева

Індекс моделі адресних посилань	Адреса моделі початку гілки	Адреса моделі гілки	Адреса моделі кінця гілки	Адреса наступної гілки	Адреса попередньої гілки
1	IP.SID.Ni	IP.SID.Nij	IP.SID.Nj	2	0
2	IP.SID.Ni	IP.SID.Nij	IP.SID.Nj	4	1
…	…	…	…	…	…
4	IP.SID.Ni	IP.SID.Nij	IP.SID.Nj	5	2
5	IP.SID.Ni	IP.SID.Nij	IP.SID.Nj	0	4

Позначення у **Ошибка! Неверная ссылка закладки.**: IP – адреса комп’ютера, на якому розташована відповідна БД із інформацією про параметри ЕМ, наприклад, 195.177.125.107; SID – ім’я БД, наприклад, ; Ni, Nj, Nij – відповідно номери моделей вузла початку, кінця і самої довільної гілки дерева.

Таблиця 2.8

Моделі гілок хорд

Індекс моделі адресних посилань	Адреса моделі початку гілки	Адреса моделі гілки	Адреса моделі кінця гілки	Адреса наступної гілки	Адреса попередньої гілки
1	IP.SID.Ni	IP.SID.Nij	IP.SID.Nj	2	0
2	IP.SID.Ni	IP.SID.Nij	IP.SID.Nj	13	1
…	…	…	…	…	…
13	IP.SID.Ni	IP.SID.Nij	IP.SID.Nj	0	2

Застосований підхід до автоматичного формування системи автоматизації розрахунків режимів роботи великих енергосистем у вигляді таблиць адресних посилань дозволяє використовувати як окреме розподілене середовище моделювання, так і віртуальні комп’ютери в ньому.

На Рис. 2.21 наведена загальна структура ОЕС України з міжсистемними зв’язками. Для декомпозиції ОЕС України на верхньому рівні був запропонований той же самий підхід. Загальна схема ЕМ також розділена на вузли і гілки. В якості вузлів такої схеми виступають умовно виділені паралельно працюючі електроенергетичні системи ОЕС, а гілками є високовольтні лінії електропередач, які об’єднують відповідні ЕЕС. Опорними вузлами є граничні попередньо виділені вузли паралельно працюючих ЕЕС. В результаті такої декомпозиції отримаємо схему ЕМ, представлену на Рис. 2.21, Рис. 2.22. Потужність кожного міжсистемного зв’язку заміняється на два умовних (один із знаком «+», а другий – «-»). Нова заступна схема МЕМ представлена на Рис. 2.23 і Рис. 2.24 (після декомпозиції другого рівня). Таке розділення загальної схеми МЕМ на декілька незалежних дозволяє створювати і застосувати розподілене моделююче середовище,

паралельно розраховувати режими роботи окремих ЕЕС і об'єднувати їх шляхом врахування обчислених обмінних потужностей.

Матриці провідностей у цьому випадку дуже маленькі, струми об'єднуючих гілок розраховуються дуже швидко і можливе застосування алгоритмів незалежних паралельних обчислень.

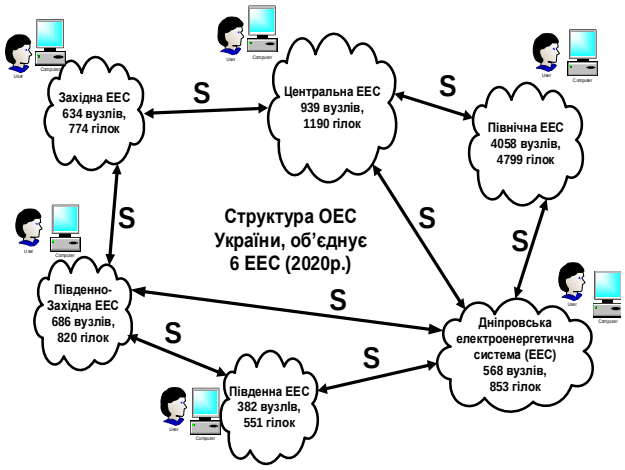


Рис. 2.21. Структура ОЕС України, об'єднує 6 ЕЕС (S – обмінна потужність)

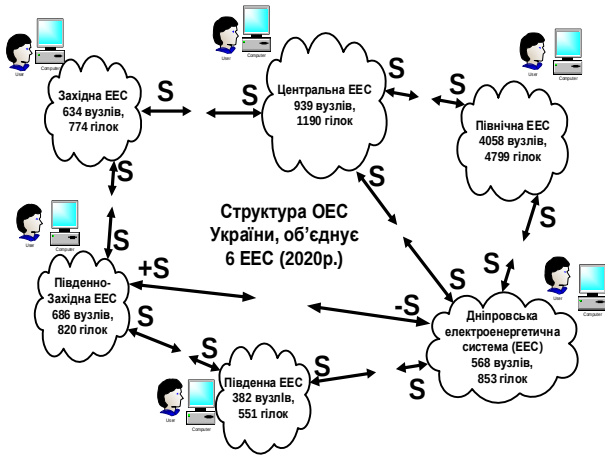


Рис. 2.22. Структура ОЕС України після декомпозиції другого рівня , об'єднує 6 ЕЕС (S – обмінна потужність)

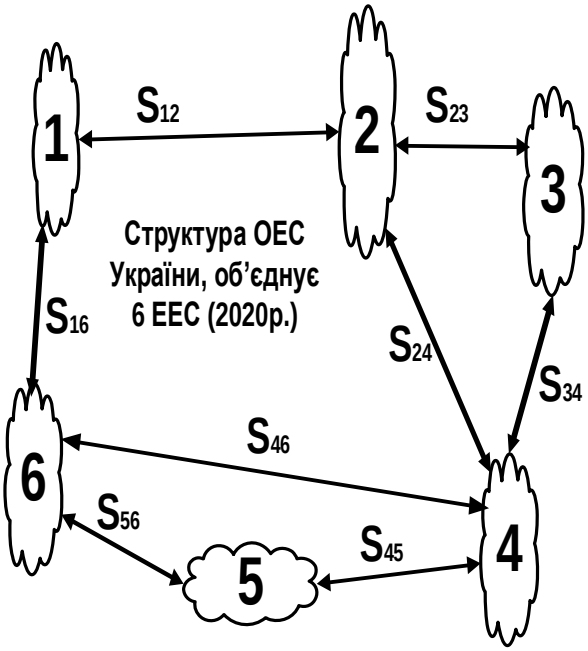


Рис. 2.23. Розрахункова схема МЕМ ОЕС України, яка об'єднує 6 ЕЕС

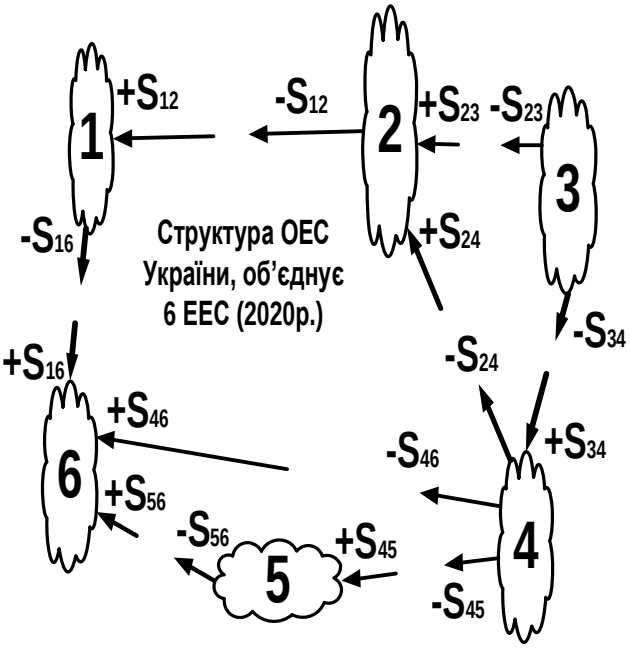


Рис. 2.24. Розрахункова схема МЕМ ОЕС України після декомпозиції другого рівня

2.6 Висновки до другого розділу

Використання теоретичних засад онтологічного підходу до аналізу предметної області досліджень МЕМ ОЕС України дозволило виявити та сформувати найбільш важливі сутності інформаційної частини моделі МЕМ і встановити однозначні зв’язки між ними. Цей підхід закладає важливі теоретичні основи уніфікації та структуризації моделей використованих даних для забезпечення побудови і ефективного функціонування всіх підсистем веб-орієнтованих комп’ютерних тренажерів підготовки персоналу в розподіленому моделюючому середовищі. Виконано дослідження та вирішена проблема побудови інформаційної частини моделі МЕМ ОЕС України для використання у веб-орієнтованих комп’ютерних тренажерах. Наведено теоретичні основи конструювання інформаційної частини моделі МЕМ ОЕС України. Отримані і застосовані результати розробки концептуальної, зовнішніх та внутрішніх схем розподілених кластерних баз даних МЕМ великих енергосистем, які є основою для побудови математичних моделей веб-орієнтованих тренажерних систем на базі сутностей і зв'язків інформаційної частини моделі МЕМ ОЕС України в комп’ютерних тренажерах. Виконано теоретичне і практичне розробляння системи автоматизації розрахунків режимів роботи великих енергосистем для комп’ютерних тренажерів в розподіленому моделюючому середовищі з використанням двохрівневої декомпозиції ЕМ.

РОЗДІЛ 3
ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ ВЕБ-ОРІЄНТОВАНИХ ПРОТИАВАРІЙНИХ ТРЕНАЖЕРІВ

3.1 Теоретичні основи моделювання режимів роботи МЕМ

Комп'ютерний тренажер (КТ) для оперативно-диспетчерського персоналу МЕМ ЕЕС і ОЕС України є технічним засобом навчання, яке забезпечує персонал можливістю адекватно моделювати задані режими роботи і умови експлуатації устаткування в навчальному процесі для формування ключових кометентностей, - розпізнавання умов і причин виникнення аварій, а також формування стійких навичок швидкої ліквідації аварій.

Під веб-орієнтованою комп’ютерною тренажерною системою (ВОКТС) розумітимемо сукупність віртуальних КТ, що моделюють з високою точністю різні функції реального устаткування МЕМ ЕЕС та ОЕС в нормальних і аварійних ситуаціях для використання персоналом в навчальному процесі у складі розподілених віртуальних науково-навчальних центрів (ВННЦ). Важливою складовою КТС є розподілений моделюючий комплекс [134].

Проблемам моделювання та питанням розрахунку усталених і перехідних режимів (УР і ПР) роботи великих ЕЕС присвячено багато досліджень та публікацій [24, 28, 32, 58, 135 - 166], в яких розглядаються питання побудови і використання математичних, топологічних, інформаційних і комп’ютерних моделей різноманітних методів моделювання; методи та засоби формування і рішення рівнянь стану ЕМ; методи оцінки стану (ОС) електричних мереж; питання збіжності ітераційних процесів різних методів моделювання, існування і єдиності рішення систем нелінійних рівнянь стану електричної мережі; граничні режими та багато ін.

Можна відмітити істотний вклад у вирішенні цієї проблеми таких науково-технічних організацій як ІЕД НАН України, ІПМЕ ім. Г.Є.Пухова

НАНУ, Обчислювальний центр головного технічного управління Міненерго України, а також закладів вищої освіти, наприклад, КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Вклад у дослідження і розробку методів, алгоритмів і програмних засобів моделювання і розрахунку режимів електричних мереж внесли відомі учені: В.М. Авраменко [35], Д.А. Арзамасцев, О.А. Буткевич, В. А. Веніков [161, 167], О.В. Кириленко, П.Д. Лежнюк, В.П. Мельник, Н.А. Мельніков, В.Л. Пріхно, В.І. Тарасов, Ю.І. Тугай, Х.Ф. Фазилов, В.М. Холмський [130], Л.В. Цукерник, А.Б. Чернин, Ю.В. Щербіна й інші.

Незважаючи на великі швидкодію і пам'ять процесорів сучасних комп’ютерів, важливі питання моделювання, пов’язані із забезпеченням гарантії збіжності ітераційних методів рішення систем нелінійних рівнянь алгебри, які описують режими роботи електричних мереж, і з умовами забезпечення прийнятного (комфортного) для подальшого аналізу часу отримання результатів моделювання залишаються невирішеними [8, 27, 168]. Це залежить від системи допущень і спрощень, які приймаються дослідниками і розробниками в процесі визначення мети, постановки завдання і рішення певного класу електроенергетичних завдань, і якості (рівня інтелектуалізації) використовуваних для цих цілей математичних і інформаційних моделей [169 - 177].

Нині також недостатньо задіяні можливості віртуальних технологій для побудови і використання математичних, топологічних, інформаційних і комп’ютерних моделей методів моделювання в розподілених веб-орієнтованих середовищах [9, 11, 30, 34]. Такі середовища часто називають хмарними обчислюваннями, головна мета яких забезпечити користувачам певні сервіси [178]: OasS, IaaS, PaaS тощо.

Розглянемо класичну постановку задачі розрахунку режимів роботи довільної ЕЕС для створення моделюючого комплексу з метою його використання у протиаварійних комп’ютерних тренажерах.

Моделюючий комплекс створюється на базі режимної моделі ЕЕС, яка, зі свого боку, використовує різні так звані заступні схеми окремих об'єктів

електричної мережі і джерел генерації ЕЕС: електростанцій, ліній електропередачі, елементів підстанцій з шинами, трансформаторами, вимикачами, роз'єднувачами, систем РЗ і А та ін.

Структура (топологія) схеми довільної ЕЕС моделюється за допомогою направлених графів, вузлами яких є вузли заступних схем джерел генерації та елементів підстанцій, а гілками є лінії електропередачі, трансформатори та об'єкти підстанцій [127 – 129, 142].

Формування звступних схем і розрахунок параметрів їх елементів здійснюються з використанням відомих спрощень і допущень [130, 145, 163, 179 - 185].

Трифазні схеми ЕМ часто вважаються симетричними і можуть бути представлені еквівалентними однолінійними схемами заміщень, лінії електропередачі – Т-подібними, а трансформатори Г-подібними.

Так звана повна потужність S_i вузла i довільної електричної мережі розраховується у мегаватах на три симетричні фази часто з урахуванням статичних характеристик навантаження [20, 24, 25] за формулою:

$$S_i = \widehat{U}_i \cdot \dot{I}_i = P_i + jQ_i \text{ [МВА]}, \qquad (3.1)$$

Де $\widehat{U}_i$ - спряжена лінійна напруга i-го вузла у кіловольтах [кВ], $\dot{I}_i$ - фазний струм i-го вузла помножений на $\sqrt{3}$ у кілоамперах [кА], P_i - активна потужність i-го вузла у мегаватах [МВт], Q_i - реактивна потужність i-го вузла у мега вольтамперах реактивних [МВАр].

Елементи електричної мережі (повітряні та кабельні лінії електропередачі, трансформатори, реактори тощо) в розрахунках режимів часто розглядаються як лінійні і симетричні. Асиметричні схеми, що відповідають синхронним генераторам, двигунам і ушкодженням елементів симетричної мережі, описуються здебільшого з використанням симетричних схем прямої, зворотної і нульової послідовності [158, 161, 167, 186-189].

Моделювання режимів електромереж можливе за умови, коли відомі (задані) параметри електричної мережі: топологія мережі (перелік вузлів і гілок), потужності вузлів, параметри схем заміщень джерел енергії, ліній

електропередачі, трансформаторів, шунтів та ін. Параметрами режиму ЕМ є напруга вузлів навантажень (комплексне значення напруги або модуль і кут) і отримання цих параметрів є завданням розрахунку режимів [19, 21 - 23, 190, 191].

На Рис 3.1 в якості простого прикладу показано параметри 2-вузлової електричної заступної схеми та результати розрахунку УР, які нанесені на схему. Заданими параметрами цієї простої електромережи є вектор напруги $\dot{U}_1 = 110 + j0$ [кВ] опорного (балансуючого) вузла 1, повна потужність $S_{н2наг.} = 90 - j75$ [МВА] вузла 2, опір $Z_{1-2} = 2 + j6$ [Ом] лінії електропередачі (гілка 1-2).

Результатом розрахунку УР є напруга $\dot{U}_2 = 103.81 - j3.545$[кВ] вузла 2.

За допомогою отриманої напруги вузла 2 можна розрахувати струм $\dot{J}_2 = (0.841 - j0.751)$ [кА] вузла 2, струм $\dot{I}_{1-2} = (0.841 - j0.751)$ [кА] гілки 1-2, який згідно 1-му закону Кірхгофа дорівнює струму вузла 2, втрати потужності $\Delta S = (2.54 - j7.63)$ [МВА] у гілці 1-2, струм $\dot{J}_1 = (0.841 - j0.751)$ [кА] і генерацію $S_1 = (-92.54 + j82.63)$ [МВА] відповідно опорного (балансуючого) вузла 1.

До аналізу параметрів режимів роботи ЕЕС обов'язково входить перевірка балансу потужності в мережі згідно із наступною умовою: сумарна генерація має дорівнювати сумі потужності всіх вузлів і втрат потужності в гілках мережі для любого *t*-го моменту часу:

$$\dot{S}_{1ген.}(t) = \dot{S}_{2пот.}(t) + \Delta\dot{S}_{1-2.}(t) = \\ = (90 - j75) + (2.54 - j7.63) = (-92.54 + j82.63). \qquad (3.2)$$

За допомогою формули (3.1) також отримаємо потужність балансуючого вузла 1:

$$S_1 = \hat{U}_1 \cdot \dot{J}_1 = (110 - j0) \cdot (0.841 - j0.751) = (-92.51 + j82.61)\ [\text{МВА}]$$

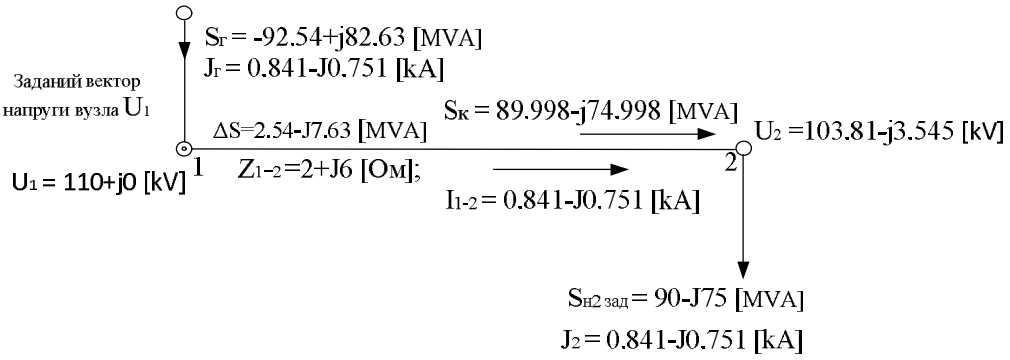


Рис 3.1. Результати розрахунку УР для схеми із заданим вектором напруги вузла 1

Аналіз отриманих результатів закінчено дозволяє зробити висновок: розрахунок папметрів режиму виконано вірно, 1-й закон Кірхгофа для вузлів виконується, баланс потужності підтверджується із заданою максимальною похибкою $\Delta S_{зад.} \leq 0.03$ [МВА].

З метою дослідження впливу модуля опорного (балансуючого) вузла на зміну його генерації було здійснено ряд розрахунків із різними векторами, але однаковими модулями напруги опорного вузла 1. Результати розрахунків довели важливу особливість такого завдання: повна генерація балансуючого вузла є незмінною. Це дуже важливий висновок, який дозволяє спростити моделювання вузлів – джерел генерації, із заданими модулями напруги і активною генерацією. На Рис 3.2 наведено результати такого розрахунку із заданим вектором напруги опорного вузла 1, модуль якого є незмінним.

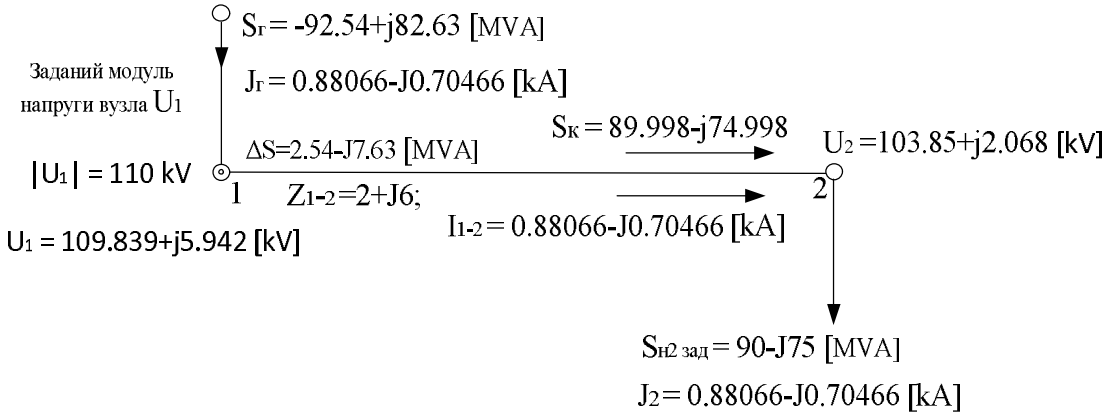


Рис 3.2. Результати розрахунку УР для схеми із заданим модулем напруги вузла 1

Представлені на Рис 3.1 і Рис 3.2 результати розрахунків усталених режимів у вигляді нанесених на заступну схему мережі розрахункових параметрів режиму, безпосередньо у своїй діяльності диспетчерами або операторами ЕЕС та ЕО не використовуються. Це обумовлено наступними відмінностями розрахункових програм від тренажерів:

1. Отримані результати дійсні тільки для одного моменту часу, не враховується добовий графік зміни навантаження/генерації.

2. Відсутні диспетчерський щит (ДЩ), оперативно-інформаційний комплекс (ОІК) і немає телефонного комутатору для діалогу з керівником тренування або іншими учасниками.

3. Відсутні можливості розробки і створення сценаріїв протиаварійних тренувань, що моделюють аварії в ЕЕС.

4. Результати розрахунків неможливо безпосередньо використати в діяльності диспетчерів.

5. Відсутнє навчально-методичне забезпечення для організації системи навчання і тренажерної підготовки.

Для прийняття оперативних рішень диспетчер повинен бачити максимально повний і достовірний стан енергетичного обладнання, а не тільки його електричну схему з параметрами.

На Рис 3.3 і Рис 3.4 представлені реальні типові мнемосхеми диспетчерських щитів і відеограми систем збору і керування інформацією (SCADA-системи), з якими працює диспетчер.

Розрахунки усталених нормальних і аварійних режимів ЕМ ЕЕС часто використовуються для проектування і експлуатації ЕЕС практично на усіх рівнях ієрархічної системи управління ОЕС України. Розрахунки УР і ПР також виконуються у якості підзадач при рішенні оптимізаційних завдань, розрахунку і аналізі стійкості ЕЕС, розробці заходів по протиаварійному управлінню, виборі уставок РЗА тощо.

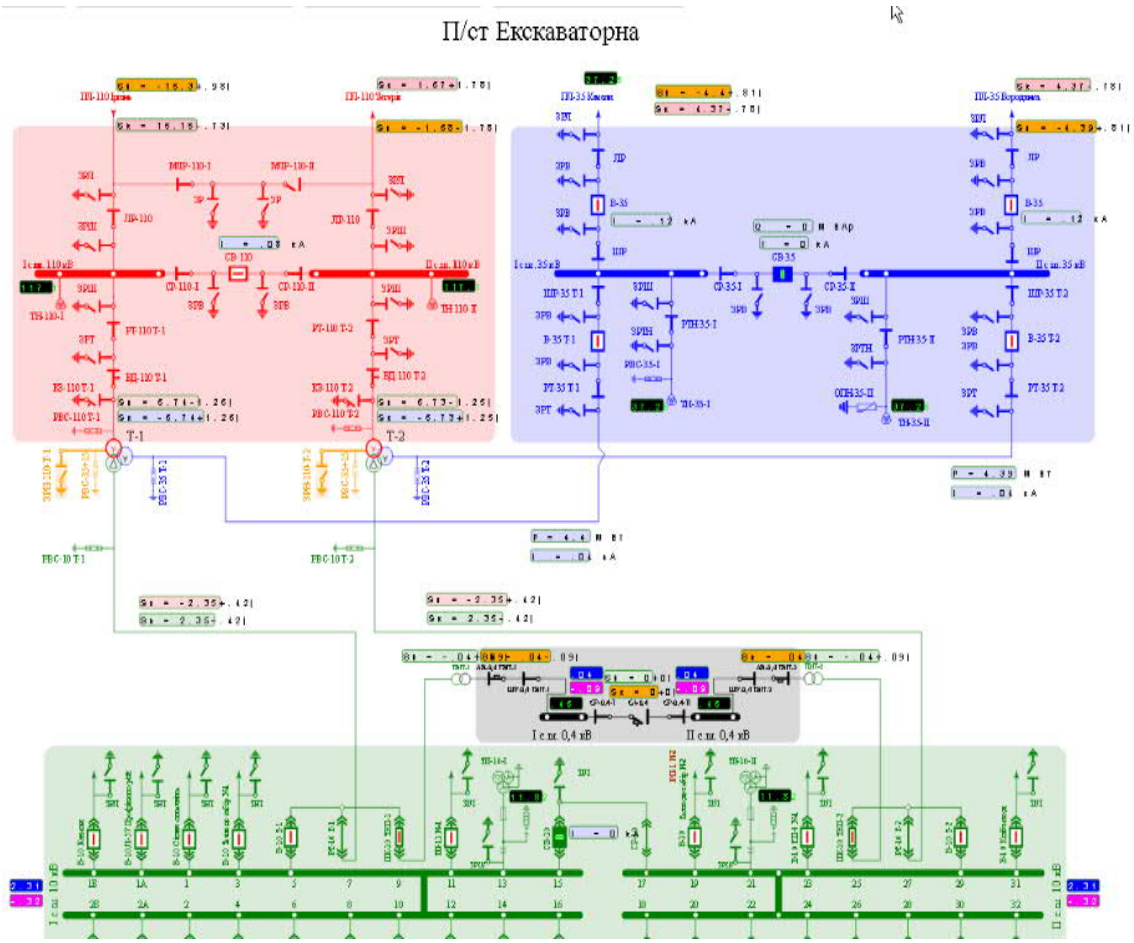


Рис 3.3. Приклад використання диспетчером відеограми SCADA-системи для керування режимом

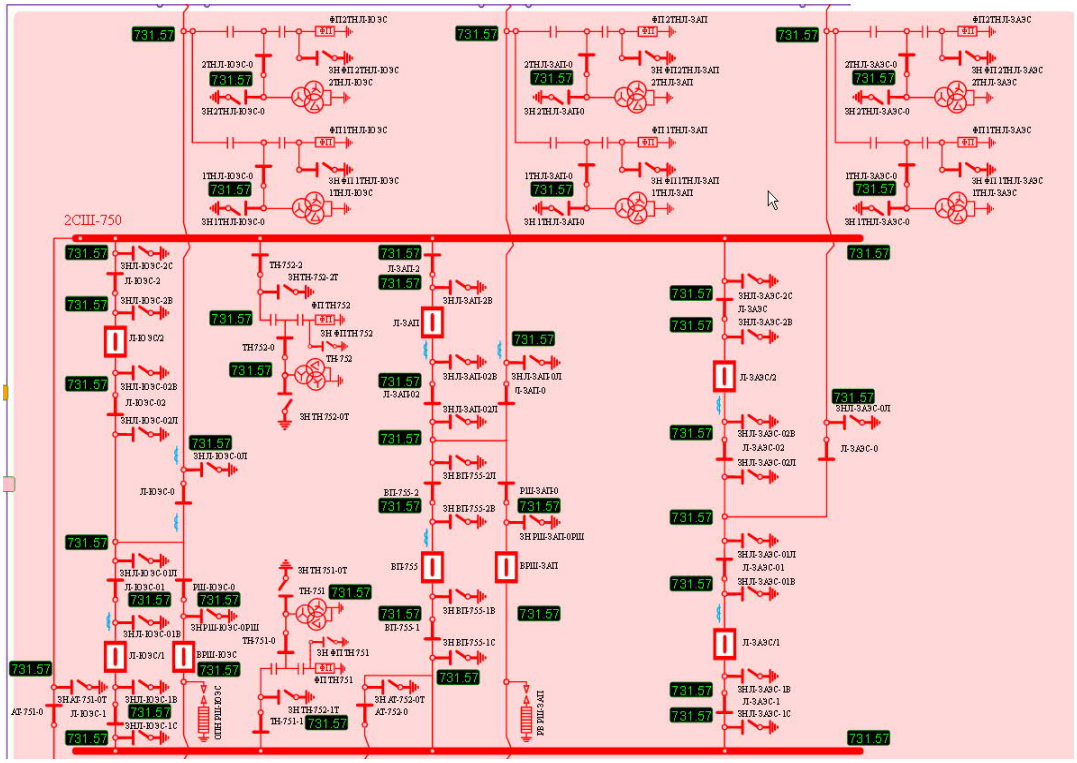


Рис 3.4. Фрагмент SCADA-системи високовольтної підстанції

На сьогодні суттєво розширилася множина методів розв’язання систем нелінійних рівнянь алгебри великої розмірності [192 - 209] для різних предметних областей дослідження. Розв’язання певного класу нагальних практичних електроенергетичних задач в даний час пов’язано, в основному, з використанням варіантів модифікацій методу Ньютона.

Відома велика кількість наукових досліджень і результатів з використанням не ньютонівських методів рішення систем нелінійних рівнянь великої розмірності [192 - 198]. І, дійсно, це є доволі продуктивною пропозицією. Більшість нових, не ньютонівських методів рішення систем нелінійних рівнянь алгебри великої розмірності пов'язані, в основному, з рішенням проблем в освоєнні космосу, виборі раціональних форм літальних апаратів, в практиці оптимального управління складних технічних систем і розробці різних високих технологій і важливих проблем фізики. Це говорить про те, що прорив в цій області дослідження пояснюється обов'язковим урахуванням ключових особливостей вирішуваних проблем.

У роботах [199 - 209], які стали з'являтися, починаючи з 80-х років минулого століття, пропонується використати модифікований метод рішення СЛАР, що поєднує в собі проекційні методи (метод біспряжених градієнтів і узагальнених мінімальних нев'язок) і еволюційні методи і оптимізаційні метод на основі принципу Парето. Ці методи широко використовуються в галузі сучасної електроніки, але в роботі не розглядалися.

Багато сучасних досліджень присвячено також розвитку методів декомпозиції та організації розпаралелювання алгоритмів рішення систем лінійних та нелінійних рівнянь великої розмірності з розрідженими матрицями. В них передбачається, що завдяки особливостям структури блочної матриці коефіцієнтів системи рівнянь обробка кожного блоку чи підсистеми рівнянь може виконуватися незалежно на декількох процесорних елементах. Для розв'язку систем нелінійних рівнянь великої розмірності використовуються багаторівневі паралельні обчислення [210 - 215].

У роботі досліджуються можливості багатоопорного методу (БОМ) розрахунку контурних струмів (РКС) з метою визначення доцільності використання для побудови протиаварійних комп’ютерних тренажерів.

Дотепер розроблені і апробовані на практиці впродовж тривалого часу методи, алгоритми розрахунку і програми орієнтовані здебільшого для використання на персональних комп’ютерах (ПК) або в локальних мережах (ЛМ) ПК [18, 216 - 232], проте дослідження можливостей використання цих алгоритмів і програм у віртуальних середовищах тільки починаються [29, 43, 60 - 63, 233 - 235].

У процесі розрахунку нормальних УР в якості математичної моделі найчастіше використовуються різні форми рівнянь вузлових напруг (РВН). Нині найбільше поширення отримали РВН у формі балансу потужностей, записані в полярній або декартовій (прямокутній) системі координат. Рішення РВН здійснюється ітераційними методами. РВН можуть мати безліч рішень або не мати жодного. Ітераційний процес може або сходитися до будь-якого з рішень, або мати характер, що розходиться, навіть за наявності хоч би одного рішення, тобто при рішенні нелінійних РВН має місце проблема збіжності ітераційного процесу, існування і єдності рішення. У класичній постановці завдання розрахунку нормальних УР розв'язати цю проблему не можливо [236, 237]. У зв'язку з цим велике значення має розробка нових підходів як до постановки завдання розрахунку УР, так і методів рішення РВН, що мають властивості глобальної збіжності (тобто майже з будь-яких початкових наближень) до одного рішення, адекватного реальному режиму електричної мережі.

Розрахунки аварійних УР найчастіше виконуються для цілей проектування ЕЕС і вибору уставок РЗА. Є промислові програми розрахунку на ПК періодичних складових струмів замикання і неповнофазних режимів. Програми розрахунку аварійних УР, як правило, вимагають спрощений опис навантажень вузлів. У зв'язку з цим розрахунки несиметричних режимів з подовжньою несиметрією (обриви фаз), а також розрахунки складних

ушкоджень з множинною одночасною подовжньо-поперечною несиметрією (замикання і обриви фаз), на жаль, стандартними методами розрахунку УР не можуть бути виконані. Необхідно розробляти інтегровані програмні комплекси, що поєднують можливості розрахунку нормальних і аварійних режимів.

Важливим є завдання аналізу властивостей електричних мереж, граничних режимів їх роботи. Гранична потужність джерел генерації і статична стійкість вузлів комплексного навантаження добре досліджені, є якісні критерії, методи, алгоритми і програмні засоби для їх розрахунку. Проте питання про оцінку граничної споживаної потужності вузлів навантаження залишається відкритим.

Баланс потужностей для будь-якої ЕЕС у будь-який момент часу t у загальному вигляді розраховується таким чином:

$$\sum_{i=1}^{i=n} \dot{S}_{iген.}(t) = \sum_{i=1}^{i=n} \dot{S}_{iпот.}(t) + \Delta\dot{S}_{мереж.}(t), \qquad (3.3)$$

де n – це кількість вузлів електричної мережі; $\dot{S}_{iген.}(t)$ - сума генерації всіх вузлів; $\dot{S}_{iпот.}(t)$ - сума потужності вузлів; $\Delta\dot{S}_{мереж.}(t)$ - втрати потужності.

Формування математичної моделі режиму роботи довільної мережі ЕЕС або ЕО полягає у наступному.

Розрахунок режиму напруги вузлів електричної мережі вважається коректним, якщо в будь-який момент часу зберігається баланс потужності та виконуються закони Кірхгофа..

Нехай струм $\dot{I}_{ji}$ будь-якої не трансформаторної гілки електричної мережі ЕЕС довільної конфігурації спрямований від вузла j до вузла i (Рис 3.5) і може бути розрахований згідно закону Ома як множення різниці напруги цих вузлів на провідність $\dot{Y}_{ji}$ цієї гілки:

$$\dot{I}_{ji} = (\dot{U}_j - \dot{U}_i) \cdot \dot{Y}_{ji}, \qquad (3.4)$$

$$\text{де } \dot{Y}_{ji} = g_{ji} + jb_{ji} = \frac{1}{Z_{ji}} = \frac{r}{r_{ji}^2 + x_{ji}^2} - j\frac{x}{r_{ji}^2 + x_{ji}^2},$$

де Z_{ji} - повний опір (комплексне число) лінії *ji*; $\dot{Y}_{ji}$- провідність (комплексне число) лінії *ji*.

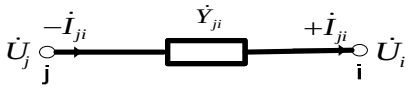


Рис 3.5. Приклад довільної гілки *ji* довільної ЕМ

Умовимося, що знак струму $\dot{I}_{ji}$ гілки *ji*, що виходить з вузла *j*, буде мати мінус, а той же струм $\dot{I}_{ji}$, що входить у вузол *i*, буде вже із знаком плюс.

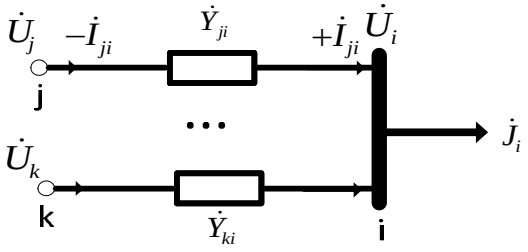


Рис 3.6. Визначення струму $\boldsymbol{J_i}$ вузла *i*

Підсумовуючи струми $\dot{I}_{ji}$ усіх прилеглих гілок до *i*-го вузла (Рис 3.6) і використовуючи (3.4), отримаємо наступну формулу 1-го закону Кірхгофа для визначення струму *i*-го вузла $\boldsymbol{J_i}$:

$$\dot{J}_i = -\dot{U}_i \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{j=k} \dot{Y}_{ji} + \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{j=k} \dot{U}_j \cdot \dot{Y}_{ji} \qquad (3.5)$$

де *k* – кількість прилеглих гілок до *i*-го вузла.

Для *j*-го вузла формула (3.5) має симетричний вигляд:

$$\dot{J}_j = -\dot{U}_j \cdot \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{i=k} \dot{Y}_{ij} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{i=k} \dot{U}_i \cdot \dot{Y}_{ij}.. \qquad (3.6)$$

Замінимо у формулі (3.6) величину струму вузла за допомогою заданої потужності і відомої (заданої) напруги:

$$\frac{\dot{S}_j}{\dot{U}_j} = -\dot{U}_j \cdot \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{i=k} \dot{Y}_{ij} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{i=k} \dot{U}_i \cdot \dot{Y}_{ij},, \qquad (3.7)$$

Таким чином, потужність любого вузла електричної мережі можна остаточно записати в балансовій формі:

$$\dot{S}_j = -|U|_j^2 \cdot \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{i=k} \dot{Y}_{ij} + \widehat{U}_j \cdot \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{i=k} \dot{U}_i \cdot \dot{Y}_{ij}.. \qquad (3.8)$$

У матричному вигляді формули (3.5) і (3.6) можна записати компактніше:

$$[\dot{J}] = [\dot{Y}] \cdot [\dot{U}], \qquad (3.9)$$

де $[\dot{Y}]$ - матриця провідності мережі; $[\dot{U}]$ - вектор-стовпець напруги вузлів мережі; $[\dot{J}]$ – вектор-стовпець струмів вузлів мережі.

Якщо відомі або задані потужності вузлів електричної мережі $\dot{S}_i$, то формулу (3.5) можна представити так:

$$\frac{\dot{S}_i}{\widehat{U}_i} = -\dot{U}_i \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{j=k} \dot{Y}_{ji} + \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{j=k} \dot{U}_j \cdot \dot{Y}_{ji} \qquad (3.10)$$

де $\widehat{U}_i$ - спряжена напруга вузла i.

Для розрахунків усталених електричних режимів в комп'ютерних диспетчерських тренажерах зазвичай використовуються системи нелінійних алгебраїчних рівнянь у формі балансу потужностей $[\dot{S}_s]$ вузлів. Транспонований вектор повних вузлових потужностей $[\dot{S}_s]^T$ вузлів ЕМ, виражений через вузлові струми $[\dot{I}_s]$ і напруги $\dot{U}_s$, можна записати так:

$$[\dot{S}_s]^T = [\dot{I}_s]^T [\widehat{U}_s]_d, \qquad (3.11)$$

де $[\widehat{U}_s]_d$ - діагональна матриця спряжених векторів напруги вузлів; $[\dot{I}_s]^T$ транспонований вектор-стовпець струмів вузлів.

Струми вузлів ЕМ можна розраховувати за допомогою лінійного алгебраїчного рівняння:

$$[\dot{I}_s] = [\dot{Y}_{ss}][\dot{U}_s],$$

де $[\dot{Y}_{ss}]$ - комплексна матриця відомих вузлових провідностей електричної мережі; $[\dot{U}_s]$ - вектор-стовпець невідомих комплексних напруг вузлів; $[\dot{I}_s]$ - вектор-стовпець комплексних відомих/заданих струмів вузлів.

Зазвичай формулу (3.10) використовують у вигляді системи нелінійних рівнянь:

$$\dot{S}_i = -|U_i|^2 \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{j=k} \dot{Y}_{ji} + \widehat{U}_i \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{j=k} \dot{U}_j \cdot \dot{Y}_{ji},, \qquad (3.12)$$

де $|U_i|^2$ - квадрат модуля напруги вузла i.

Подальші формули записані у формі алгебри комплексних чисел (декартові координати) з позначенням одним штрихом дійсної частини комплексного числа і двома штрихами - уявної частини.

Вектор напруги вузла в декартовій системі координат запишеться так: $\dot{U}_i = U_i^{'} + jU_i^{''}$, спряжений - $\widehat{\dot{U}}_i = U_i^{'} - jU_i^{''}$, прямий - в полярній $\dot{U}_i = V_i \cdot cos\,\delta_i + j(V_i \cdot sin\,\delta_i)$, а спряжений комплекс напруги $\widehat{U}_i = V_i \cdot cos\,\delta_i - j(V_i \cdot sin\,\delta_i)$, де $V_i = \sqrt{(U_i^{'})^2 + (U_i^{''})^2}$ - модуль вектору напруги i-го вузла.

Кут вектору напруги i-го вузла можна розрахувати (в радіанах) за формулою:

$$\delta_i = arctg\left(\frac{U_i^{''}}{U_i^{'}}\right), \qquad (3.13)$$

Для j-го вузла гілки j –i формула (3.12) має вигляд:

$$\dot{S}_j = -\left|U_j\right|^2 \cdot \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{i=k} \dot{Y}_{ij} + \widehat{U}_j \cdot \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{i=k} \dot{U}_i \cdot \dot{Y}_{ij}. \qquad (3.14)$$

В полярній системі координат (3.12) виглядає наступним чином:

$$\dot{S}_i = -V_i^2 \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{j=k} (g_{ji} + jb_{ji}) + V_i(cos\,\delta_i - j\,sin\,\delta_i) \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ i \approx j}}^{j=k} V_j(cos\,\delta_j + j\,sin\,\delta_j) \cdot (g_{ji} + jb_{ji}).$$

І після нескладних перетворень, отримаємо:

$$\dot{S}_i = -V_i^2 \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{j=k} (g_{ji} + jb_{ji}) + \\ + V_i \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{j=k} V_j (g_{ji} \cos \delta_{ij} + b_{ji} \sin \delta_{ij}) + j(b_{ji} \cos \delta_{ij} - g_{ji} \sin \delta_{ij}). \quad (3.15)$$

де $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$.

У декартовій системі координат потужність вузлів $\dot{S}_i$ є комплексним числом і не має похідних для декартових складових напруги вузлів. Тому зазвичай переходять до полярної системи подвійної розмірності з активною P_i і реактивною Q_i потужністю:

$$P_i = -V_i^2 \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{j=k} g_{ij} + V_i \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{j=k} V_j \left[g_{ij} (\cos \delta_i \cdot \cos \delta_j + \sin \delta_i \cdot \sin \delta_j) - \right. \\ \left. - b_{ij} (\cos \delta_i \cdot \sin \delta_j - \sin \delta_i \cdot \cos \delta_j) \right];$$

$$Q_i = -V_i^2 \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{j=k} b_{ij} + V_i \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{j=k} V_j [g_{ij} (\cos \delta_i \cdot \sin \delta_j - \sin \delta_i \cdot \cos \delta_j) + \\ + b_{ij} (\cos \delta_i \cdot \cos \delta_j + \sin \delta_i \cdot \sin \delta_j)].$$

Формули для активної і реактивної потужності можна записати компактніше:

$$P_i = -V_i^2 \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{j=k} g_{ij} + V_i \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{j=k} V_j (g_{ij} \cos \delta_{ij} + b_{ij} \sin \delta_{ij}), \quad (3.16)$$

$$Q_i = -V_i^2 \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{j=k} b_{ij} + V_i \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{j=k} V_j (b_{ij} \cos \delta_{ij} - g_{ij} \sin \delta_{ij}). \quad (3.17)$$

У заступних схемах ліній електропередачі і трансформаторів іноді присутні поперечні провідності, які потрібно враховувати в наведених вище формулах.

$$P_i = -V_i^2 \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{j=k} g_{ij} + V_i \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{j=k} V_j (g_{ij} \cos \delta_{ij} + b_{ij} \sin \delta_{ij}) - V_i^2 \cdot g_{i0}, \quad (3.18)$$

$$Q_i = -V_i^2 \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{j=k} b_{ij} + V_i \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{j=k} V_j (b_{ij} cos\,\delta_{ij} - g_{ij} sin\,\delta_{ij}) - V_i^2 \cdot b_{i0} \qquad (3.19)$$

де g_{i0} та b_{i0} – сума поперечних провідностей вузла, які додаються від заступних схем прилеглиг до вузла i ліній електропередачі та трансформаторів.

Система нелінійних алгебраїчних рівнянь (3.18) і (3.19), що описує режим роботи довільної електричної мережі, може бути записана у формі балансу потужностей для *i-x* вузлів у полярних координатах таким чином:

$$\begin{aligned} \Delta P_i = P_i + V_i^2 \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{j=k} g_{ij} - V_i \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{j=k} V_j (g_{ij} \cos\delta_{ij} + \\ + b_{ij} \sin\delta_{ij}) + V_i^2 \cdot g_{i0} = 0 \end{aligned}, \qquad (3.20)$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_i = Q_i + V_i^2 \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{j=k} b_{ij} - V_i \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{j=k} V_j (b_{ij} \cos\delta_{ij} + \\ - g_{ij} \sin\delta_{ij}) + V_i^2 \cdot b_{i0} = 0 \end{aligned}. \qquad (3.21)$$

У заступних схемах магістральних електричних мереж також присутні трансформаторні гілки. Розглянемо заступну схему такої трансформаторної гілки (Рис. 3.7).

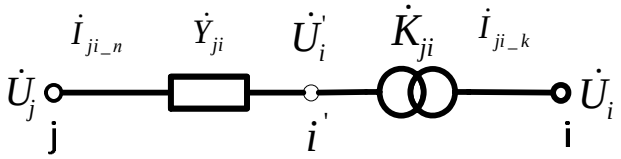


Рис. 3.7. Приклад трансформаторної гілки ji у випадку, коли опір трансформатора приведено до початку гілки

Опір заступної схеми гілки *j-i* приведений к початку гілки, використовується так званий «ідеальний» коефіцієнт трансформації трансформатора $\dot{K}_{ji}$.

На Рис. 3.7 $\dot{K}_{ji} = \frac{\dot{U}_i'}{\dot{U}_i}$ - комплексний коефіцієнт «ідеального» трансформатора.

Також відомо, що $\widehat{K}_{ji} = \frac{\dot{I}_{ji\_k}}{\dot{I}_{ji\_n}}$ і $\dot{K}_{ji} = \frac{\dot{U}_i'}{\dot{U}_j}$, тоді струм початку гілки $\dot{I}_{ji\_n} = \dot{U}_j \cdot \dot{Y}_{ji} - \dot{K}_{ji} \cdot \dot{Y}_{ji} \cdot \dot{U}_i$, а струм кінця гілки $\dot{I}_{ji\_k} = \dot{U}_j \cdot \widehat{K}_{ji} \cdot \dot{Y}_{ji} - K_{ji}^2 \cdot \dot{U}_i \cdot \dot{Y}_{ji}$.

Це дозволяє використовувати у формулах балансу потужності вузлів значення напруги $\dot{U}_i' = \dot{K}_{ji} \cdot \dot{U}_i$ замість $\dot{U}_i$.

Після деяких спрощень:

$$P_i = -K_{ij}^2 \cdot V_i^2 \cdot g_{ij} + V_i \cdot V_j \cdot [\cos\delta_{ij} \cdot (g_{ij} \cdot K_{ij}^{i} + b_{ij} \cdot K_{ij}^{''}) + \\ + \sin\delta_{ij} \cdot (b_{ij} \cdot K_{ij}^{i} - g_{ij} \cdot K_{ij}^{''})]$$

$$Q_i = -K_{ij}^2 \cdot V_i^2 \cdot b_{ij} + V_i \cdot V_j \cdot [\cos\delta_{ij} \cdot (b_{ij} \cdot K_{ij}^{i} - g_{ij} \cdot K_{ij}^{''}) - \\ - \sin\delta_{ij} \cdot (g_{ij} \cdot K_{ij}^{i} + b_{ij} \cdot K_{ij}^{''})]$$

Зауважимо, що застосування методу Ньютона-Рафсона до розрахунку режимів великих ЕЕС, математичні моделі яких зазвичай представлені у вигляді системи багатьох (близько 10000) рівнянь, є не завжди виправданим, оскільки час розв’язання подібних систем може значно перевищувати час, відведений оперативному персоналу на прийняття рішення [8, 19 - 22, 24, 25, 27, 172].

3.1.1 Введення і постановка задачі моделювання режимів роботи електричних мереж і систем

Методи розрахунку режимів роботи електричних мереж і енергосистем відіграють важливу роль у процесах експлуатації і розвитку енергетичного сектору як України, так і всіх без винятку розвинених країн світу.

Швидкодіючі методи розрахунку режимів роботи ЕЕС є основою побудови КТ і тренажерних систем для навчання і тренажерної підготовки оперативно-диспетчерського персоналу.

Перші програмні реалізації з'явились на початку 60 … 70 роках і базувались на використанні аналогових і великих цифрових обчислювальних машин.

Розрахунок усталеного режиму електричних мереж зводиться до рішення системи нелінійних рівнянь алгебри, складених на підставі законів Ома і Кірхгофа

$$\hat{U}_s\left(\sum_{f=1}^{Ns}\dot{U}_f\dot{Y}_{fs}-\dot{U}_s\sum_{f=1}^{Ns}\dot{Y}_{fs}\right)=\dot{S}_s, \qquad (3.22)$$

де s – поточний номер вузла мережі ($s = 1,\ldots, N$), Ns - кількість вузлів, прилеглих до вузла з номером s, $\dot{U}$s - комплексне значення напруги у вузлі s, $\dot{Y}_{fs}$ - провідність гілок мережі, $\hat{U}_s$ - зв'язана напруга у вузлі s, $\dot{S}_s$ - задані потужності у вузлах мережі.

Запис системи (3.22) в дійсних числах можна отримати, перейшовши до прямокутної системи координат:

$$P_s=-|u_s|^2\cdot\sum_{f=1}^{N}g_{sf}+\sum_{f=1}^{N}\left[\left(u'_s\cdot u'_f+u''_s\cdot u''_f\right)\cdot g_{sf}-\left(u'_s\cdot u''_f-u''_s\cdot u'_f\right)\cdot b_{sf}\right], \qquad (3.23)$$

$$Q_s=-|u_s|^2\cdot\sum_{f=1}^{N}b_{sf}+\sum_{f=1}^{N}\left[\left(u'_s\cdot u''_f-u''_s\cdot u'_f\right)\cdot g_{sf}+\left(u'_s\cdot u'_f-u''\cdot_s u''_f\right)\cdot b_{sf}\right], \qquad (3.24)$$

У (3.23), (3.24) P_s - активна потужність вузлів, Q_s - реактивна потужність вузлів, u_s - модуль напруги у вузлі s, g_{sf} - активна подовжня провідність гілок мережі, b_{sf} - реактивна подовжня провідність гілок мережі, u'_s і u''_s - відповідно активна і реактивна складова напруга у вузлах. В якості заданих служать параметри заступних схем електричної мережі: напруга балансуючого вузла, провідності гілок, коефіцієнти трансформації і потужності вузлів. В результаті рішення системи (3.23), (3.24) визначається напруга у вузлах мережі, які використовуються потім для обчислення потокорозподілу струмів і потужностей гілок, а також для розрахунку втрат активної і реактивної потужності в мережі.

Таким чином, обчислення усталених режимів зводиться до рішення систем рівнянь (3.23), (3.24). Ці рівняння квадратичні відносно невідомих. Характерною їх особливістю є велика розмірність й істотна нелінійність. Високі вимоги до швидкості отримання рішення таких рівнянь призводять до необхідності застосування ітераційних методів, що швидко сходяться,

заснованих на використанні похідних першого і другого порядків. В роботах [ ] розвивається один з підходів до побудови ітераційних схем нелінійної структури, що дозволяє ітераційній послідовності при прагненні до рішення досягати швидкість збіжності близько трьох, чотирьох, п'яти і вище порядків. Ідейною основою таких методів є факт існування деякої кривої, що проходить через поточну точку ітераційної послідовності і рішення системи рівнянь. На кожній ітерації конструюється деяка апроксимація параметричного представлення цієї кривої і уздовж апроксимації мінімізується сума квадратів усіх рівнянь для отримання чергового наближення. Відмітимо, що дотична до цієї кривої в поточній точці ітераційної послідовності співпадає з ньютонівським напрямом. Природно, що чим точніше будується апроксимація згаданою кривої, тим вище швидкість збіжності ітераційної послідовності до рішення. Специфіка обговорюваних рівнянь (3.23), (3.24) така, що для побудови апроксимацій якої завгодно міри точності не потрібно обчислювати похідні вище другого порядку.

Але існують дві важливі обставини: виродженість якобіану, що часто має місце, в периферійних по відношенню до точки рішення областях (через що неможливо будувати параметричне представлення кривої) і велика розмірність системи рівнянь (хоча якобіан має розріджену структуру). Є дещо вужчі за традиційних підходи до роботи з розрідженими матрицями великої розмірності. Для їх використання в даному завданні потрібно застосування в схемі чисельного методу матриць похідних саме в тих координатах, в яких зберігається розрідженість.

Обчислювальна схема методів на різних етапах використовує ортогональні координати, які так чи інакше призводять до заповнення усього якобіана або значної його частини. Нижче наводиться підхід до побудови такої обчислювальної схеми, яка дозволяє повною мірою скористатися інструментарієм для роботи з розрідженими матрицями. При цьому зберігається властивість методів обробляти випадки з виродженням якобіану і знаходити такі лінійні комбінації даної системи рівнянь, для яких вдається

будувати параметризації кривої спуску і здійснювати ефективні кроки ітераційного процесу.

3.1.2 Ідейна основа методу

Далі розглядатимемо систему рівнянь (3.23), (3.24) в наступному записі:

$$\Phi(x) = 0, \qquad (3.25)$$

де x - елемент евклідова простору E^n, $\Phi(x)$ - n-мірний вектор з компонентами $\Phi_i(x), i = 1,...,n.$.

Нехай $F(x) = \frac{1}{2}(\Phi(x), \Phi(x))$, I_n - одинична матриця порядку n, а S - така матриця, що

$$S^*S = I_{n-1},\ S^*\Phi(x_0) = 0, \qquad (3.26)$$

Тут і далі зірочка на місці верхнього індексу означає транспонування, а запис (x, y) - скалярний добуток двох векторів - $x, y \in E^n$.

У основу пропонованого методу покладений наступний факт. Нехай в точках

$$x \in X(x_0) = \{x : F(x) \le F(x_0)\}$$

матриця $\Phi'(x)$ не вироджена і в точці ; x_0 мають місце рівність (3.26). Якщо $x(\alpha)$ є параметризацією різноманіття

$$\{x : S^*\Phi(x) = 0, x \in X(x_0)\}, \qquad (3.27)$$

а $\alpha_* = \arg\min F[x(\alpha)]$, то $\Phi[x(\alpha_*)] = 0.$

За такою схемою і конструюється ітераційний процес: спочатку в поточній точці здійснюється побудова параметризації $x(\alpha)$ різноманіття (3.27), а потім чергове наближення визначається з умови мінімуму функції $F[x(\alpha)]$ по α.

Природно, що для побудови параметризації різноманіття (3.27) в точці x_0 потрібна невиродженість якобіана $\Phi'(x_0)$. У тих випадках, коли ця умова не виконується (а це відбувається досить часто, особливо в периферійних по відношенню до околиці рішення областях), будується матриця Q_mрозмірність

$n \times m$, де $n < m$, що має m ортогональних між собою стовпців. Після цього розглядається система

$$Q_m^* \Phi(x) = 0, \tag{3.28}$$

що складається з $n < m$ рівнянь, і для неї будується матриця S_m з наступними властивостями:

$$S_m^* S_m = I_{m-1}, S_m^* Q_m^* \Phi(x_0) = 0. \tag{3.29}$$

Специфіка вибраної матриці Q_m є такою, що виявляється можливою побудова параметризації $x(\alpha)$ для різноманіття:

$$\{x : S^* Q_m^* \Phi(x) = 0, x \in X(x_0)\}. \tag{3.30}$$

3.1.3 Побудова параметризації з невиродженим якобіаном

Розглянемо процедуру побудови параметризації $x(\alpha)$ різноманіття (3.27). Нехай $A = \Phi'(x_0)$. У процедурі використовується розкладання матриці A наступного виду. Якщо ранг матриці A рівний n, то $A = QR$, де Q - ортогональна матриця, а R - верхня трикутна. Якщо ранг A рівний $m < n$, то

$$A = QRP^*, \ R = \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \tag{3.31}$$

де R_1 - верхня трикутна невироджена матриця порядку m, а Q і P - ортогональні матриці.

Спочатку розглянемо той варіант побудови параметризації $x(\alpha)$ кривій (3.27), який відповідає випадку з невиродженою матрицею A рангу n.

Нехай P_1 - ортогональна матриця із стовпцями $p_1^1, ..., p_n^1$, у якої перший стовпець задовольняє умові

$$p_1^1 = p / \|p\|, Ap = -\Phi(x_0), \tag{3.32}$$

а матриця S_1 складена із стовпців $p_2^1, ..., p_n^1$ матриці P_1.

Тоді

$$p^* S_1 = 0. \tag{3.33}$$

Розглянемо параметризацію різноманіття (3.27) в околі точки x_0 у формі

$$x(\alpha) = x_0 + \alpha p_1^1 + S_1 u(\alpha), \tag{3.34}$$

де відображення $u(\alpha)$ таке, що

$$S^*\Phi\left[x_0 + \alpha p_1^1 + S_1 u(\alpha)\right] = 0. \qquad (3.35)$$

Похідна від лівої частини (3.35)по $u \in E^{n-1}$ в точці x_0 має вигляд

$$S^*\Phi'_u\left[x(0)\right] = S^* A S_1. \qquad (3.36)$$

3.1.4 Лема

1. Якщо точка розташована на різноманітті (3.27), то дотичний вектор до (3.27) в точці x співпадає по напряму з рішенням рівняння

$\Phi'(x)p = -\Phi(x).$

2. Якщо A - невироджена матриця, а матриці S і S_1 задовольняють відповідно до умов (3.26) і (3.33), то матриця (3.36) - невироджена.

Доказ. Якщо $p = -\Phi'^{-1}(x)\Phi(x)$, то перше твердження слідує з (3.34) і рівності

$$S^*\Phi'\left[x(\alpha)\right]p = -S^*\Phi'(x)\Phi'^{-1}(x)\Phi(x) = 0.$$

Припустимо тепер, що друге твердження не виконується. Тоді існує $\upsilon \in E^{n-1}, \upsilon \neq 0,$ для якого

$$S^* A S_i \upsilon = 0. \qquad (3.37)$$

Тоді $\gamma = AS_1\upsilon \neq 0$ і вектор y в силу умови (3.26) колінеарне вектору $\Phi(x_0) = 0.$ Тому для деякого $\gamma \neq 0$ $AS_1\upsilon = \gamma\Phi(x_0)$ і з (3.32) слідує

$$p = -\frac{1}{\gamma} S_1 \upsilon. \qquad (3.38)$$

Але (3.38) суперечить рівності (3.33) і, отже, невірно припущення (3.37). Лема доведена.

З леми виходить, що відображення $u(\alpha)$, яке задовольняє умові (3.35), існує і достатнє число разів безперервно диференціюється.

Оскільки з формули (3.34) витікає, що апроксимація четвертого порядку параметризації $x(\alpha)$ має вигляд

$$\bar{x}(\alpha) = x_0 + \alpha x'(0) + \frac{1}{2}\alpha^2 x''(0) + \frac{1}{2}\alpha^2 x''(0) + \frac{1}{6}\alpha^3 x^{(3)}(0) + \frac{1}{24}\alpha^4 x^{(4)}(0) =$$

$$= x_0 + \alpha\left[p_1^1 + S_1 u'(0)\right] + \frac{1}{2}\alpha^2 S_1 u''(0) + \frac{1}{6}\alpha^3 S_1 u^{(3)}(0) + \frac{1}{24}\alpha^4 S_1 u^{(4)}(0).$$

то для побудови цієї апроксимації необхідно уміти обчислювати похідні відображення $u(\alpha)$.

Похідна від (3.35) по α має вигляд

$$S^*\Phi'[x(\alpha)]\left[p_1^1 + S_1 u'(\alpha)\right] = 0. \qquad (3.39)$$

Отже, з (3.2) і (3.9) отримуємо

$$u'(0) = 0. \qquad (3.40)$$

Якщо e_j - j-й орт, а стовпцями матриці S являються вектори $s_1,...,s_{n-1}$, то компоненти вектору (3.39) виглядають таким чином:

$$\sum_{j=1}^{n} \left(\Phi'[x(\alpha)], p_1^1\right)(s_i, e_j) + \qquad (3.41)$$

$$\sum_{j=1}^{n} \left(\Phi''[x(\alpha)], p_1^1\right)(s_i, e_j) = 0, i = 1,...,n-1$$

Тому похідній по α від (3.41) будуть величини

$$\sum_{j=1}^{n} (\Phi''[x(\alpha)], [p_1^1 + S_1 u'(\alpha)], p_1^1 + S_1 u'(\alpha))(s_i, e_j) + \qquad (3.42)$$

$$+ \left(S_1^* \Phi'^*[x(\alpha)] s_i, u''(\alpha)\right) = 0, i = 1,...,n-1$$

Нехай надалі запис $R(x_0, p, s)$ означає вектор з компонентами $\left(\Phi_j''(x_0), p, s\right), j = 1,...,n$.

Тоді з (3.40) і (3.42) слідує

$$S^* A S_1 u''(0) = -S^* R\left(x_0, p_1^1, p_1^1\right). \qquad (3.43)$$

Для обчислення вектору $u^{(3)}(0)$ продиференціюємо (3.42) по α (враховуючи при цьому, що матриці $\Phi_j''(x_0)$ постійні, оскільки рівняння квадратичні):

$$3\sum_{j=1}^{n} \left(\Phi''j[x(\alpha)], S_1 u''(\alpha), p_1^1 + S_1 u'(\alpha)\right)(s_i, e_j) + \qquad (3.44)$$

$$+ \sum_{j=1}^{n} \left(\Phi'j[x(\alpha)], S_1 u^{(3)}(\alpha)\right)(s_i, e_j) = 0, i = 1,...,n-1$$

У матричній формі, з урахуванням рівності (3.40), (3.44) при $\alpha = 0$ записується так:

$$S^* A S_1 u^{(3)}(0) = -3S^* R\left(x_0, p_1^1, S_1 u''(0)\right) \qquad (3.45)$$

Похідними по α від виразів (3.44) будуть величини

$$4\sum_{j=1}^{n}\left(\Phi'' j[x(\alpha)], S_1 u^{(3)}(\alpha), p_1^1 + S_1 u'(\alpha)\right)\left(s_i, e_j\right) +$$

$$3\sum_{j=1}^{n}\left(\Phi'' j[x(\alpha)], S_1 u''(\alpha) + S_1 u''(\alpha)\right)\left(s_i, e_j\right) +$$

$$+\sum_{j=1}^{n}\left(\hat{O}' j[x(\alpha \qquad)], S_1 u^{(4)}(\alpha)\right)\left(s_i, e_j\right) = 0, \qquad i = 1,\ldots, n-1,$$

які можна представити і в матричній формі при $\alpha = 0$:

$$S^* A S_1 u^{(4)}(0) = -4S^* R\left(x_0, p_1^1, S_1 u^{(3)}(0)\right) - \qquad (3.46)$$

$$-3S^* R\left(x_0, S_1 u''(0), S_1 u''(0)\right).$$

Відмітимо, що якщо вектори

$$p_2' = S_1 u''(0), p_3' = S_1 u^{(3)}(0), p_4' = S_1 u^{(4)}(0) \qquad (3.47)$$

задовольняють рівнянням

$$Ap_2' = -R\left(x_0, p_1^1, p_1^1\right) \qquad (3.48)$$

$$Ap_3' = -3R\left(x_0, p_1^1, p_2'\right) \qquad (3.49)$$

$$Ap_4' = -4R\left(x_0, p_1^1, p_3'\right) - 3R\left(x_0, p_2', p_2'\right), \qquad (3.50)$$

то вони задовольняють і рівнянням (3.43), (3.45), (3.46).

3.1.5 Побудова параметризації з виродженим якобіаном

Якщо в процесі розкладання матриці $A = \Phi'(x_0)$ з'ясувалося, що її ранг m менше n, то форма розкладання має вигляд (3.51). Нехай в (3.51) стовпцями матриці Q являються вектори $q_i, i = 1,\ldots,n$, а стовпцями матриці P - вектори $p_i, i = 1,\ldots,n$.

Розіб'ємо матриці Q і P на блоки:

$$Q = [Q_m Q_{n-m}], Q_m = [q_1 \ldots q_m], Q_{n-m} = [q_{m+1} \ldots q_n], \qquad (3.51)$$

$$P = [P_m P_{n-m}], P_m = [p_1 \ldots p_m], P_{n-m} = [p_{m+1} \ldots p_n]. \qquad (3.52)$$

Тоді з (3.51) слідує

$$A = Q_m R_1 P^*{}_m \qquad (3.53)$$

Оскільки градієнт функції $F(x)$ в точці x_0 $F'(x_0) = A^* \Phi(x_0)$, то

$$F(x_0) = P_m R_1^* Q_m^* \Phi(x_0) \qquad (3.54)$$

Якщо вектор відхилу $\Phi(x_0)$ цілком належить підпростору, що задається векторами $Q_{n-m} = [q_{m+1} ... q_n]$, то $F'(x_0) = 0$ тому зрушуватися з точки x_0 по поверхні

$$\{x : Q_m^* \Phi(x) = 0\} \qquad (3.55)$$

зі зменшенням значення функції $F(x)$ буде складно. У зв'язку з цим надалі розглядається випадок, коли вектор $\Phi(x_0)$ не належить цілком підпростору Q_{n-m}, а $Q_m^* \Phi(x_0) \neq 0.$

Таким чином, можна поставити завдання по отриманню чергового наближення x_1, в якому виконується умова $Q_m^* \Phi(x_1) = 0.$ Для цього введемо матрицю $\overline{S}$ розмірності $m \times (n-1)$, що задовольняє умовам

$$\overline{S}^* \overline{S} = I_{m-1}, \overline{S}^* Q_m^* \Phi(x_0) = 0 \qquad (3.56)$$

і розглянемо поверхню

$$\left\{ x : \overline{S}^* Q_m^* \hat{O}(x) = 0 \right\}. \qquad (3.57)$$

З (3.51) і (3.53) витікає, що $R_1 = Q_m^* A P_m$. Оскільки R_1 - невироджена матриця, з рівняння

$$Q_m^* A P_m y = -Q_m^* \Phi(x_0) \qquad (3.58)$$

можна визначити вектор $y \in E^m$. Позначимо

$$p = P_m y, p_1^1 = p / \|p\| \qquad (3.59)$$

Нехай W - така ортогональна матриця порядку m, для якої справедлива рівність

$$P_m W^* = [\overline{P}_{m-1} p_1^1], \qquad (3.60)$$

де матриця $\overline{P}_{m-1}$ складається з перших (m-1) стовпців матриці $P_m W^*$. Відмітимо, що $P_{m-1}^* \overline{P}_{m-1} = I_{m-1}$, а для

$$\bar{W}^* = W^* \begin{bmatrix} I_{m-1} \\ 0...0 \end{bmatrix} \overline{P}_{m-1} = P_m \overline{W}^*. \qquad (3.61)$$

Невиродженість матриці B дозволяє параметризувати поверхню (3.57) і переміщатися по деякій кривій, не покидаючи поверхні. Щоб виділити цю

криву на різноманітті (3.57), що має розмірність (*n-m+1*), розглянемо систему рівнянь

$$\tilde{\Phi}(x)=\begin{bmatrix} Q_m^*\Phi(x) \\ P_{n-m}^*(x-x_0)\end{bmatrix}=0. \qquad (3.62)$$

Якщо S - матриця з (3.56), то аналогом матриці S з (3.26), (3.27) для системи (3.62) буде матриця

$$S=\begin{bmatrix} \overline{S} & 0 \\ 0 & I_{n-m}\end{bmatrix}, \qquad (3.63)$$

а різноманіття (3.27) для системи (3.62) задається рівняннями $\overline{S}^*Q_m^*\Phi(x)=0, P_{n-m}^*(x-x_0)=0$. Відмітимо, що

$$\tilde{\hat{O}}'(x)=\begin{bmatrix} Q_m^*\hat{O}'(x_0) \\ P_{n-m}^*\end{bmatrix}=\begin{bmatrix} R_1P_m^* \\ P_{n-m}^*\end{bmatrix}=\begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & I_{n-m}\end{bmatrix}p^*, \qquad (3.64)$$

Поступаючи так само, як і при побудові параметризації (3.34), визначимо вектор p з формул (3.58), (3.59), які в даному випадку аналогічні формулі $\overline{\Phi}'(x_0)p=-\overline{\Phi}(x_0)$.

Визначимо також ортогональну матрицю P_1 у якої перший стовпець $p_1^1=p/\|p\|$. Так само як і в (3.33), вважатимемо, що S_1 складена з стовпців $p_2^1,....p_n^1$ матриці P.

Відповідно до леми 3.1.4 матриця

$$S^*\overline{\Phi}_u'[x(0)]=S^*\begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & I_{n-m}\end{bmatrix}p^*S_1^*$$

невироджена і елементи параметризації (3.34) можна обчислювати по формулах, аналогічних формулах (3.48) -(3.50):

$$R_1\gamma_m=-Q_m^*R(x_0,p_1^1,p_1^1),\ p_2'=P_m\gamma_m \qquad (3.65)$$

$$R_1\gamma_m=-3Q_m^*R(x_0,p_1^1,p_2'),\ p_3'=P_m\gamma_m \qquad (3.66)$$

$$R_1\gamma_m=-4Q_m^*R(x_0,p_1^1,p_3')-3Q_m^*R(x_0,p_2',p_2'),\ p_4'=P_m\gamma_m \qquad (3.67)$$

Вид правих частин в (3.65) - (3.67) обумовлений тим, що розглядається система рівнянь (3.62) і що входить в праві частини рівнянь (3.66) - (3.68)

вектор $R(x_0, p, s)$ в цьому випадку має компоненти $(\tilde{\Phi}_j''(x_0)p, s), j = 1,...,n$. Проте для $j = m+1,...,n$ $\tilde{\Phi}_j''(x_0) = 0$, а для $j = 1,...,m$

$$(\tilde{\Phi}_j''(x_0)p, s) = \sum_{i=1}^{n} (\tilde{\Phi}_i''(x_0)p, s)(q_j, e_j) = (R(x_0, p, s), q_j) \qquad (3.68)$$

де q_j - стовпець матриці Q.

3.1.6 Обчислювальна схема методу

Нехай чергове наближення до рішення рівняння (3.25) вже побудовано. Для реалізації алгоритму потрібні будуть звернення до процедури R, що уміє обчислювати вектор $R(x_k, p, s)$ з компонентами

$$(\Phi''i(x_k)p, s), i = 1,...,n; p, s \in E^n.$$

Крок 1. У точці x_k обчислюється матриця $A = \Phi'(x_k)$. Потім здійснюється розкладання (3.31) матриці A. Якщо вона невироджена, переходимо до кроку 2. Якщо вироджена, переходимо до кроку 3.

Крок 2. Обчислюємо вектори p_1^1, p_2', p_3', p_4' по формулах (3.32), (3.48) - (3.50) із застосуванням процедури R і переходимо до кроку 4.

Крок 3. У розкладанні (3.31) виділяємо матриці Q_m і P_m. Потім за формулами (3.58), (3.59), будуємо вектор p_1^1, а процедуру R і формулу (3.68) використовуємо для формування правих частин в рівняннях (3.65), (3.67), (3.68). Обчислюємо вектори p_2', p_3', p_4'.

Крок 4. Формуємо схему

$$x(\alpha) = x_k + \alpha p_1^1 + \frac{1}{2}\alpha^2 p_2' + \frac{1}{6}\alpha^3 p_3' + \frac{1}{24}\alpha^4 p_4', \qquad (3.69)$$

обчислюємо величину α_k з умови $F[x(\alpha_k)] = \min_{\alpha} F[x(\alpha)]$ і вважаємо $x_{k+1} = x(\alpha_k)$.

Пропонований метод орієнтований на рішення систем рівнянь, в яких нелінійність відносно змінних зосереджена в квадратичних членах. Таким чином, другі похідні від кожного рівняння постійні, і це дасть можливість при побудові апроксимації параметризації $x(\alpha) = x_k + \alpha p_1^1 + S_1 u(\alpha)$ і обчисленні векторів $p_3' = S_1 u^{(3)}(0), p_4' = S_1 u^{(4)}(0)$ обмежуватися другими похідними. Тому пропонована ітераційна схема четвертого порядку нелінійності непридатна

для вирішення систем нелінійних рівнянь загального вигляду. Проте якщо в що розглядається ітераційній схемі обмежитися членами другого порядку нелінійності, то її можна застосувати для вирішення нелінійних рівнянь довільного виду.

Це означає, що якщо в приведеному алгоритмі обчислювати лише вектори $p_1^{'}$ і p_2', а замість (3.69) вважати $x(\alpha)=x_k+\alpha p_1^1+\frac{1}{2}\alpha^2 p_2'$, то схема придатна для вирішення не лише квадратичних рівнянь.

3.1.7 Властивості методу

Зробимо деякі припущення про властивості рівняння (3.69). Нехай для деякого x_0 множина

$X(x_0)=\{x: F(x)\le F(x_0)$ компактна і для $x\in X(x_0)$ виконується нерівність

$$\left\|\Phi'^{*}(x)\Phi(x)\right\|\ge \overline{m}\left\|\Phi(x)\right\|, \overline{m}\rangle 0. \qquad (3.70)$$

Для генерованої методом (3.69) ітераційної послідовності x_k справедливі наступні твердження.

1. Якщо для точок $x\in X(x_0)$ виконується нерівність (3.70), то $\|\Phi(x_k)\|\to 0$ при $k\to\infty$.

2. Якщо в точці x_*, де $\Phi(x_*)=0$, матриця $\Phi'(x_*)$ невироджена, то для послідовності x_k має місце оцінка

$$\left\|x_{k+1}-x_*\right\|\le C\left\|x_k-x_*\right\|^5.$$

Доказ. Доказ першого твердження детально викладено в [85]. Приведемо схему доказу другого твердження. Нехай для точки x_k з околиці рішення x_* побудована параметризація $x(\alpha)$ різноманіття (3.27). Тоді для

$\alpha_*=\arg\min F[x(\alpha)]$ $\qquad$ $x(\alpha_*)=x_*$.

Крім того, існують такі $\xi_i\in[0,\alpha_*], i=1,...,n$, що для $(\gamma,e_j)=(x^{(5)}(\xi_i),e_j)$ і для $\alpha=\alpha_*$ має місце рівність

$$x(\gamma,\alpha)=x_k+\alpha p_1^1+\frac{1}{2}\alpha^2 p_2'+\frac{1}{3!}\alpha^3 p_3'+\frac{1}{4!}\alpha^4 p_4'+\frac{1}{5!}\alpha^5\gamma=x_*.$$

Якщо при різних y і x_k обчислювати величину $\alpha = \arg\min F[x(\gamma,\alpha)]$, то отримаємо функцію $\alpha(\gamma, x_k)$, для якої в [85] була показана справедливість оцінок

$$|\alpha(\gamma, x_k)| \le C_1 \|x_k - x_*\| \tag{3.71}$$

$$|\alpha(0, x_k) - \alpha(\gamma, x_k)| \le C_2 \|x_k - x_*\|^5 \tag{3.72}$$

Тому з виразу

$$\|x_{k+1} - x_*\| = \|x(0,\alpha_k) - x(\gamma,\alpha_*)\| = \|x(0,\alpha_k) - x(0,\alpha_*) + x(0,\alpha_*) - x(\gamma,\alpha_*)\| \le$$

$$\le C_3 |\alpha(0, x_k) - \alpha(\gamma, x_k)| + C_4 |\alpha(\gamma, x_k)|^5$$

і оцінок (3.71), (3.72), слідує справедливість другого твердження теореми.

3.1.8 Дослідження та побудова обчислювальної схеми методу розрахунку систем нелінійних рівнянь усталених режимів

Особливість рівнянь, що описують усталені режими використовувалася для формування похідних різних порядків і інших даних, необхідних для побудови обчислювальної схеми методу. Ця ж специфіка дозволила успішно використати технологію розріджених матриць для розрахунку напруги в мережі з великою кількістю вузлів. Що стосується самої структури побудови чергового наближення, початої вивчатися ще в роботі [238], то вона застосована для вирішення довільних систем нелінійних рівнянь.

Рівняння для напруги в усталених режимах електричної мережі зазвичай записуються в двох формах. У роботі [238] вивчалася система нелінійних рівнянь

$$\left(z_s^2 + y_s^2\right)\sum_{j=1}^{N} g_{sj} - \sum_{j=1}^{N}\left[\left(z_s \cdot z_j + y_s \cdot y_j\right)\cdot g_{sj} - \left(z_s \cdot y_j - y_s \cdot z_j\right)\cdot b_{sj}\right] + P_s = 0 \tag{3.73}$$

$$\left(z_s^2 + y_s^2\right)\sum_{j=1}^{N} g_{sj} - \sum_{j=1}^{N}\left[\left(z_s \cdot y_j - y_s \cdot z_j\right)\cdot g_{sj} + \left(z_s \cdot z_j + y_s \cdot y_j\right)\cdot b_{sj}\right] + Q_s = 0 \tag{3.74}$$

$$s = 1,\ldots,N,$$

форма яких обумовлена вибором прямокутної системи координат при переході від запису в комплексних числах до дійсного представлення змінних. У (3.73), (3.74) і далі P_s - активна потужність вузлів, Q_s - реактивна потужність

вузлів, g_{sj} - активна подовжня провідність, b_{sj} - реактивна подовжня провідність гілок мережі, z_s і y_s - відповідно активна і реактивна складові напруги у вузлі з номером s.

Інша форма запису пов'язана з тригонометричним представленням дійсною і уявною частин комплексних чисел

$$z_s^2 \cdot \sum_{j=1}^{N} g_{sj} - \sum_{j=1}^{N} z_s \cdot z_j \left[\cos\left(y_s - y_j\right) \cdot g_{sj} + \sin\left(y_s - y_j\right) \cdot b_{sj}\right] + P_s = 0 \qquad (3.75)$$

$$z_s^2 \cdot \sum_{j=1}^{N} b_{sj} - \sum_{j=1}^{N} z_s \cdot z_j \left[-\sin\left(y_s - y_j\right) \cdot g_{sj} + \cos\left(y_s - y_j\right) \cdot b_{sj}\right] + Q_s = 0 \qquad (3.76)$$

$$s = 1,...,N$$

Для зручності і наочності перетворимо записи (3.73)-(3.76) до векторно-матричному виду. З цією метою введемо наступні позначення. b_{s0} і g_{s0} - вектори з компонентами

$$b_{s0} = \begin{bmatrix} b_{s1} \\ ... \\ b_{sN} \end{bmatrix}, \qquad g_{s0} = \begin{bmatrix} g_{s1} \\ ... \\ g_{sN} \end{bmatrix},$$

серед яких компонента з номером s завжди дорівнює нулю, а матриці G_0 і B_0 порядку N мають вигляд:

$$G_0 = \begin{bmatrix} g_{1_0}^* \\ ... \\ g_{N_0}^* \end{bmatrix}, \qquad B_0 = \begin{bmatrix} b_{1\,0}^* \\ ... \\ b_{N_0}^* \end{bmatrix}$$

Тут і далі зірочка на місці верхнього індексу означає транспонування. Крім того,

$$A_1' = \left[-Q_0 B_0\right], \qquad A_1'' = \left[-B_0 - G_0\right] \qquad (3.77)$$

$$A_2' = A_1'', \; A_2'' = \left[G_0 - B_0\right]. \qquad (3.78)$$

Далі вважатимемо, що

$$z^* = \left(z_1...z_N\right), y^* = \left(y_1...y_N\right), x^* = \left(z^* y^*\right), p^* = \left(P_1...P_N\right), q^* = \left(Q_1...Q_N\right),$$

$$I(z) = \begin{bmatrix} z_1...0 \\ ... \\ 0...z_N \end{bmatrix}, \qquad E(z,y) = \begin{bmatrix} z_1^2 + y_1^2 & ... & 0 \\ ... & ... & ... \\ 0 & ... & z_N^2 + y_N^2 \end{bmatrix} \qquad (3.79)$$

Якщо e_j - j-й орт, а для векторів c_b і c_g справедлива рівність

$$(c_g, e_s) = \sum_{j=1}^{N} g_{sj}, \qquad (c_b, e_s) = \sum_{j=1}^{N} b_{sj},$$

то рівняння (3.73) - (3.76) можна представити в такій формі:

$$E(z,y)\cdot c_g + I(z)\cdot A_1'\cdot x + I(y)\cdot A_1''\cdot x + p = 0, \tag{3.80}$$

$$E(z,y)\cdot c\cdot b + I(z)\cdot A_2'\cdot x + I(y)\cdot A_2''\cdot x + q = 0. \tag{3.81}$$

З урахуванням позначень

$$D(z,y) = \begin{bmatrix} E(z,y) & 0 \\ 0 & E(z,y) \end{bmatrix}, D(z) = \begin{bmatrix} I(z) & 0 \\ 0 & I(z) \end{bmatrix}$$

$$c = \begin{bmatrix} c_g \\ c_b \end{bmatrix}, A' = \begin{bmatrix} A_1' \\ A_2'' \end{bmatrix}, A'' = \begin{bmatrix} A_1'' \\ A_2'' \end{bmatrix}, \qquad \bar{p} = \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix}$$

рівняння (3.80)-(3.81) записуються так:

$$D(z,y)\cdot c + [D(z)\cdot A' + D(y)\cdot A'']\cdot x + \bar{p} = 0 \tag{3.82}$$

Аналогічним чином представимо рівняння (3.75) - (3.76). При справедливості введених раніше позначень нехай додатково

$$S(y) = \begin{bmatrix} \sin y_1 \\ \dots \\ \sin y_N \end{bmatrix}, C(y) = \begin{bmatrix} \cos y_1 \\ \dots \\ \cos y_N \end{bmatrix}, I(z^2) = \begin{bmatrix} z_1^2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & z_N^2 \end{bmatrix}$$

$$D(z^2) = \begin{bmatrix} I(z^2) & 0 \\ 0 & I(z^2) \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} G_0 & -B_0 \\ B_0 & G_0 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} B_0 & G_0 \\ -G_0 & B_0 \end{bmatrix}, X(y) = \begin{bmatrix} C(y) \\ S(y) \end{bmatrix}.$$

Тоді рівняння (3.75) - (3.76) можна перетворити до виду

$$D(z^2)c - D(z)[D(C(y))\cdot A_1 + D(S(y))\cdot A_2]D(z)\cdot X(y) + \bar{p} = 0 \tag{3.83}$$

Будемо, як і в [239], означати ліву частину рівняння типу (3.82) або (3.83) вектором $\Phi(x)$, а кількість рівнянь і змінних - числом n. Тоді $\Phi_{j(x)}$ - компоненти вектору $\Phi(x)$ $j = 1,\dots,n$.

З вираження (3.82) легко бачити, що змінні, які входять в цю систему рівнянь не утворюють поєднань вище другого порядку. Ця властивість використовувалася в роботі [239] при побудові кривої спуску четвертого порядку. Оскільки рівняння, що входять в систему (3.82), мають постійні матриці других похідних, вдається будувати апроксимації кривої спуску будь-

якої міри точності, не обчислюючи похідних вище другого порядку. Нагадаємо, що про це повідомлялося в [239].

Якщо в поточній точці x_k якобіан $A = \Phi'(x_k)$ не вироджений, то елементи апроксимації четвертого порядку $\bar{x}(\alpha)$ кривої спуску $x(\alpha)$, що має вигляд

$$\bar{x}(\alpha) = x_k + \alpha p_1 + \frac{1}{2}\alpha^2 p_2 + \frac{1}{6}\alpha^3 p_3 + \frac{1}{24}\alpha^4 p_4 \qquad (3.84)$$

обчислюються з наступних рівнянь:

$$Ap = -\Phi(x_k),\ p_1 = p/\|p\|,\ Ap_2 = -R(x_k, p_1, p_1) \qquad (3.85)$$

$$Ap_4 = -4R(x_k, p_1, p_3) - 3R(x_k, p_2, p_2),\ Ap_3 = -3R(x_k, p_1, p_2), \qquad (3.86)$$

де $R(x_k, p_i, p_s)$ - вектор з компонентами $(\Phi_j''(x_k)p_j, p_s)$.

3.1.9 Проблеми використання технології розріджених матриць і прийоми по забезпеченню невиродженості якобіану

Якщо якобіан A не вироджений, то для вирішення рівнянь (3.85) - (3.86) існує ефективний спосіб, що полягає в розкладанні A на елементарні матриці і що допускає представлення матриць A і A^{-1} у вигляді добутку цих елементарних матриць [238, 239]. У [239] таке розкладання називається подвійною факторизацією. Стосовно того завдання, що розглядається, то основною перевагою згаданого розкладання є можливість роботи з розрідженою структурою матриці A, оскільки елементи розкладання також матимуть розріджену структуру. Проте однією з особливостей систем рівнянь типу (3.82) або (3.83) (як, втім, і багатьох інших систем нелінійних рівнянь) являється той факт, що невиродженість якобіана має місце лише в досить малій околиці рішення. У периферійних по відношенню до околиці рішення областях якобіан часто вироджується або буває близький до виродженого.

Природно, що в цьому випадку згадане розкладання не працює або процес його обчислення стає нестійким. У роботі [239] для рішення завдань з виродженим якобіаном використовувалося ортогональне розкладання матриці A, яке дозволяло визначити підпростір невиродженості і ефективно будувати криву спуску на основі отриманої інформації. Це розкладання має вигляд [239]

$$A = P \cdot R \cdot Q \; R = \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad (3.87)$$

де P і Q - ортогональні матриці, а - невироджена, верхня трикутна матриця. Якщо ранг R_1 рівний n, то і A виявляється невиродженою. Ранг матриці A визначається в процесі розкладання, яке полягає спочатку в приведенні A до трикутного виду [239] ортогональними перетвореннями Хаусхолдера або Гівенса, а потім (якщо А вироджена) в приведенні до виду, який має матриця R в (3.87).

До теперішнього часу в технології операцій з розрідженими матрицями досить розвинений апарат ортогональних перетворень для рішення завдань найменших квадратів, проте він не завжди підходить до випадку розгляду систем нелінійних рівнянь (3.82), (3.83). Річ у тому, що дуже жорсткі обмеження на час обчислювального процесу і пам'ять, що відводиться для цього, не дозволяють використати ортогональні перетворення, що призводять до такого заповнення матриці,, яке перевищує деяке критичне значення. Ці обмеження пов'язані з наявністю певного класу обчислювальної техніки на диспетчерських пунктах різного рівня, де вирішуються рівняння типу (3.82) або (3.83). У міру поповнення парку комп'ютерів сучаснішими моделями згадані обмеження ослаблятимуться. Існуючі межі на пам'ять, що відводиться, припускають пошук інших підходів до рішення поставленої задачі.

Якщо пошук таких підходів обмежити рамками лінійної алгебри, то знову вимушені будемо зупинитися на виборі ортогонального розкладання матриці A, яке, як було показано в [239], дозволяє у разі виродження A ефективно будувати апроксимації кривої спуску будь-якої точності. Проте завдання лінійної алгебри, що полягають в рішенні рівнянь (3.85), (3.86), не є самоціллю - це підзадачі, які вирішуються у рамках загальнішого завдання. Останню обставину можна використати для втручання в процес рішення підзадачі для забезпечення тих властивостей, які повинні мати дані в постановці лінійної алгебри.

Прикладом такого підходу, тільки в області безумовної мінімізації гладких функцій, може служити набір засобів по забезпеченню невиродженості матриці других похідних. При пошуку мінімуму гладкої функції $f(x)$, $x \in E^n$ виникає необхідність на кожній ітерації вирішувати підзадачу пошуку мінімуму позитивно певної квадратичної форми

$$\bar{f}(x) = f(x_k) + (f'(x_k), x - x_k) + \frac{1}{2}(f''(x_k)(x - x_k), x - x_k), \qquad (3.88)$$

яка зводиться до рішення лінійного рівняння з матрицею $A = f'(x_k)$::

$$Ap = -f'(x_k) \qquad (3.89)$$

Коли матриця $f'(x_k)$в якій-небудь точці x_k стає виродженою або з негативними власними числами, спроби вирішувати рівняння (3.89) втрачають сенс, оскільки квадратична форма (3.88) в цьому випадку може не мати мінімуму. Один з традиційних способів рішення рівняння (3.89) - метод Холеського. В той же час великою популярністю користується модифікований метод Холеського [239], який в цілях підвищення стійкості обчислення розкладання здійснює добавки до діагональних елементів матриці A, і отримує вже фактично розкладання матриці $A + \bar{\Omega}$. Нехай тепер у симетричної діагональної матриці Ω є нульовий $i - é$ елемент. Тоді відображення

$$x = \psi(y) = x_k + y + \frac{1}{2}(\Omega_y, y) \cdot e_i \qquad (3.90)$$

є дифеоморфізмом, причому зворотне відображення має вигляд $\psi^{-1}(x) = (x - x_k) - \frac{1}{2}(\Omega(x - x_k), x - x_k) \cdot e_i$.

Таким чином, змінні y можуть служити координатами, і в цих координатах матриця других похідних функції f в точці $\psi^{-1}(x_r)$ виглядає як

$$f''_{yy}(x_k) = f''_{xx}(x_k) + \Omega(f'(x_k), e_i).$$

Отже, якщо $(f'(x_k), e_i) \neq 0$, а, те модифіковане розкладання Холесского було застосоване саме до матриці других похідних, але тільки вже в інших координатах. Детальний виклад різних варіантів викривлення координат для забезпечення опуклості функції, що мінімізується, здійснений в [239].

Наведений приклад демонструє, як зміну початкових даних в постановці підзадачі, тобто фактичний вихід за рамки лінійної алгебри, вдається підтримати за рахунок зовнішнього завдання.

Тепер повернемося до системи нелінійних рівнянь $\Phi(x)=0$. Якщо в точці x_0 якобіан $\Phi'(x_0)=0$ вироджений, то його невиродженість неможливо забезпечити нелінійним перетворенням координат $x=\psi(y)$ по аналогії з перетворенням (3.90) для забезпечення позитивної визначеності матриці других похідних. Не можна цього зробити і перетворенням координат $\gamma=\varphi(z)$ в просторі образів, якщо $\gamma=\Phi(x)$..

Тут пропонуємо такий варіант: в точці x_0, де $\Phi(x_0)\neq 0$, в рівняння $\tilde{\Phi}(x)=0$ вносяться зміни, що спотворюють їх лише в деякій околиці x_0. Поза цією околицею початкова система рівнянь і спотворена система $\tilde{O}(x)=0$ повністю співпадають. Якщо рішення системи $\tilde{\Phi}(x)=0$ знаходиться за межами околиці точки x_0, то обидві системи мають однакові рішення. Тому пошук цих рішень можна починати з точки x_0, де за допомогою спотворень забезпечена невиродженість якобіана для системи $\tilde{O}(x)=0$.

Оскільки завдання полягає в зміні градієнта одного або декількох рівнянь $\hat{O}_i(x)=0$ в точці x_0, то пропонується робити заміну рівняння $\hat{O}_i(x)=0$ рівнянням

$$\tilde{\Phi}_i(x)=\Phi_i(x)+d_i(x), \tag{3.91}$$

де

$$d_i(x)=\left[\frac{1}{2}\beta_i(\Omega(x-y_0),x-y_0)+b\right]^{-1}. \tag{3.92}$$

У (3.92) $\beta_i>0,\ b\neq 0,\ \Omega_i$ - симетрична не негативна певна матриця, а точка y_0 вибирається з досить малої околиці x_0. При видаленні x від точки $y_0 d_i\to 0$ і рівняння $\tilde{\hat{O}}_i(x)=0$ матиме ті ж корені, що і рівняння $\hat{O}_i(x)=0$. Процес

фіксації елементів, $\beta_i, b, \Omega_i, y_0$ на якихось конкретних значеннях у функції (3.6) тісно пов'язаний з процесом розкладання матриці A.

Процес подвійної факторизації полягає в побудові таких матриць $L^{(i)}, R^{(i)}$, які

$$L^{(n)}...L^{(1)}A \cdot R^{(1)}...R^{(n)} = I_{n,}\ A^{(i)} = L^{(i)} \cdot A^{(i-1)} \cdot R^{(i)}. \qquad (3.93)$$

Перерахунок елементів матриць здійснюється по формулах [239]:

$$L_u^{(i)} = \frac{1}{a_{ii}^{(i-1)}},\ L_{si}^{i} = -\frac{a_{si}^{(i-1)}}{a_{ii}^{(i-1)}},\ s = i+1,...,n$$

$$R_{ij}^{i} = -\frac{a_{ij}^{(i-1)}}{a_{ii}^{(i-1)}},\ j = i+1,...,n$$

Якщо в процесі розкладання виявляється, що $\left|a_{ii}^{(i-1)}\right| < \varepsilon$, до діагонального елементу a_{ii} матриці A_{li} додається величина Δ_i Далі вважаємо

$$d_i\left(x^i\right) = \left[\frac{1}{2}\beta_i\omega_i\left(x^i - y^i\right)^2 + b\right]^{-1},$$

де числа β, $\omega_i, y^i = x^i + r_i$ задаються заздалегідь, а величина b визначається з рівняння:

$$\Delta_i = d_i'\left(x^i\right) = -\beta_i\omega_i\left(x^i - y^i\right)\cdot\left[\frac{1}{2}\beta_i\omega_i\left(x^i - y^i\right)^2 + b\right]^{-2}.$$

Якщо матриця A була вироджена, то в результаті такої процедури буде отримано розкладання матриці $\tilde{A} = A + \Omega,$, де Ω - діагональна матриця з елементами Δ_i в тих позиціях, в яких була здійснена добавка, при цьому матриця $\tilde{\tilde{A}}$ буде вже невиродженою.

Тепер розглянемо метод рішення систем квадратичних рівнянь типу (3.82) з використанням тільки що викладених процедур. Якщо в точці $\tilde{x}_k$ якобіан виявився невиродженим і в розкладанні (3.93) не потрібно було робити ніяких добавок, то вирішуються рівняння (3.85), (3.86), формується крива (3.84) і уздовж неї мінімізується сума квадратів рівнянь. Якщо в процесі розкладання (3.93) були здійснені добавки Δ_i, то для i матимемо рівняння

(3.91). Вектор p_1 обчислюється по формулах (3.85), а ось при формуванні вектору $R(x_k, p_1, p_1)$ і вектору $R(x_k, p_1, p_2)$ необхідно врахувати, що для тих L_u, де зроблена добавка, матриця других похідних має вигляд

$$\tilde{\Phi}_i(x_k) = \Phi_i''(x_k) + d_i''(x_k) \tag{3.94}$$

У (3.94) матриця $d_i''(x_k)$ має один ненульовий елемент в позиції (i,i):

$$\beta_i\omega_i\left[\frac{3}{2}\left(x^i - y^i\right)^2 - b\right]\cdot\left[\frac{1}{2}\beta_i\omega_i\left(x^i - y^i\right)^2 + b\right]^{-3} \tag{3.95}$$

Для обчислення вектору p_3 формується рівняння, де в правій частині вектор R_Φ має ненульові елементи тільки в позиціях з такими номерами, в яких здійснювалася добавка. Ці елементи мають вигляд $d_i^{(3)}(x_k)(p_1, e_i)^3$, де

$$d_i^{(3)}(x_k) = 3\beta_i^2\omega_i^2\left(x^i - y^i\right)\left[2b - \beta_i\omega_i\left(x^i - y^i\right)^2\right]\times \tag{3.96}$$

$$\times\left[\frac{1}{2}\beta_i\omega_i\left(x^i - y^i\right)^2 + b\right]^{-4}.$$

Після обчислення векторів p_1, p_2, p_3 формується крива спуску

$$\bar{x}(\alpha) = x_k + \alpha p_1 + \frac{1}{2}\alpha^2 p_2 + \frac{1}{6}\alpha^3 p_3, \tag{3.97}$$

уздовж якої мінімізується сума квадратів рівнянь $F(x) = (\Phi(x), \Phi(x)) + \sum_i d_i^2(x)$.

3.1.10 Параметричний метод розрахунку параметрів усталених режимів роботи електричних мереж

У [240], [241] досліджувалися чисельні методи рішення систем нелінійних рівнянь, що описують усталені режими електричних мереж:

$$\Phi(x, b) = 0 \tag{3.98}$$

Тут $x \in E''$, $\Phi(x,b) \in E''$ а вектор $b \in E''$. У (3.98) компоненти вектору b характеризують різні параметри електричної мережі, а вектор x - усталена напруга у вузлах мережі. При фіксованих компонентах вектору b для визначення напруги необхідно вирішувати рівняння (3.98) відносно x, чому і були присвячені роботи [240, 241]. При зміні параметрів електричної мережі процедура пошуку рішення рівняння (3.98) повторюється. Проте якщо число змінюваних параметрів не дуже велике, можливо, пошук нового рішення з

наявністю інформації про попереднє рішення супроводжуватиметься меншим об'ємом обчислень, чим процес рішення рівняння (3.98) з новим значенням параметрів b. Нижче розглядатимемо той варіант опису електричної мережі, який представлений системою квадратичних рівнянь (вирази (3.82) з [241]). Параметри, що характеризують елементи мережі і їх властивості, входять в розглянуті рівняння лінійно. Тому для других похідних від компонент вектору $\Phi(x,b)$ виконується рівність

$$\Phi''_{jbb}(x,b)=0, \qquad j=1,...,n$$

Припустимо, що в точці $x=x_0,\ b=b_0$ виконується умова

$$\Phi(x_0,b_0)=0, \tag{3.99}$$

а компоненти вектору b_1 характеризують нову електричну мережу, напруги в якій підлягають розрахунку. Це означає, що треба визначити точку x_1, для якої справедлива рівність

$$\Phi(x_1,b_1)=0 \tag{3.100}$$

Точки $X_0=[x_0b_0]$ і $X_1=[x_1b_1]$ з простору E^{n+m} лежать на кривій, усі точки якої задовольняють рівності (3.98). Тому, якщо в точці $X_0\in E^{n+m}$ побудувати параметризацію кривої (3.98) і зрушитися уздовж неї до точки X_1, отримаємо рішення рівняння (3.100). Постановки подібного сорту завдань по проблемах оцінки стану електричної мережі обговорювалися в [242].

Позначимо (як і в попередніх публікаціях) I_i - одиничну матрицю порядку i. Нехай матриця P складається з $(m-1)$ стовпців розмірності m і задовольняє умовам

$$P^*[b_1-b_0]=0,\ P^*P=I_{m-1}. \tag{3.101}$$

Тут і далі зірочка на місці верхнього індексу означає транспонування. Для точок $X=[xb]$ розглянемо систему з $(n+m-1)$ рівнянь

$$\tilde{\Phi}(x,b)=\begin{bmatrix}\Phi(x,b)\\ P^*(b-b_0)\end{bmatrix}=0, \tag{3.102}$$

які і визначають згадану вище криву. Дійсно,

$$\tilde{\Phi}(x_0, b_0) = 0,\ \tilde{\Phi}(x_1, b_1) = 0.$$

Обчислення вектору $p \in E^{n+m}$, дотичного до кривої (3.102) в точці $[x_0, b_0]$, можна здійснювати таким чином. Вважаємо

$$\bar{p}_b = b_1 - b_0,\ p_b = \bar{p}_b / \|p_b\|, \tag{3.103}$$

а вектор $p_x \in E^n$ визначуваний з рівняння

$$\Phi'_x(x_0, b_0) p_x = -\Phi'_b(x_0, b_0) p_b. \tag{3.104}$$

Для цього припускатимемо, що матриця $\Phi'_x(x_0, b_0)$ не вироджена.

Якщо

$$p = \begin{bmatrix} p_x \\ p_b \end{bmatrix}, \tag{3.105}$$

то

$$\tilde{\Phi}_X(X_0) p = \begin{bmatrix} \Phi'_x(x_0, b_0) & \Phi'_b(x_0, b_0) \\ 0 & P^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_x \\ p_b \end{bmatrix} = 0 \tag{3.106}$$

в силу рівності (3.101), (3.103), тому справедливо наступне твердження.

Вектор $p \in E^{n+m}$, який вираховується за формулами (3.103) – (3.105) є дотичним до різноманіття

$$\left\{ X : \Phi(\tilde{X}) = 0 \right\} \tag{3.107}$$

у точці $X_0 = [x_0 b_0]$.

Нехай тепер матриця S_x складається з $(n-1)$ стовпців розмірності n і задовольняє умовам

$$S_x^* p_x = 0,\ S_x^* S_x = I_{n-1}, \tag{3.108}$$

де вектор p_x, заданий рівністю (3.103), (3.104). Нехай також $S = \begin{bmatrix} S_x & S_c \\ 0 & S_b \end{bmatrix}$, де

стовпці матриці $\begin{bmatrix} S_c \\ S_b \end{bmatrix}$ разом із стовпцями матриці $\begin{bmatrix} p_x & S_x \\ p_b & 0 \end{bmatrix}$ складають ортогональний базис в E^{n+m}.

Розглянемо параметризацію кривої (3.107) у формі

$$X(\alpha) = X_0 + \alpha p + Su(\alpha),\ u \in E^{n+m-1}, \qquad (3.109)$$

де відображення $u(\alpha)$ таке, що виконується рівність

$$\tilde{\Phi}[X_0 + \alpha p + Su(\alpha)] = 0. \qquad (3.110)$$

Оскільки стовпці матриці S суть лінійна комбінація градієнтів рівнянь (3.102), тобто рядків матриці $\tilde{\Phi}'_X(X_0)$, то матриця

$$\tilde{\Phi}'_u(X_0) = \tilde{\Phi}'_X(X_0)S \qquad (3.111)$$

порядку $(m+n-1)$ є невиродженою. В цьому випадку відображення $u(\alpha)$, що задовольняє рівності (3.110), існує і достатнє число разів безперервне що диференціюється. Похідна по α від вираження (3.110) в точці $\alpha = 0$ має вигляд

$$\tilde{\Phi}'_X(X_0) \cdot [p + Su'(0)] = 0. \qquad (3.112)$$

З рівності (3.106) виходить, що (3.112) виглядає так: $\tilde{\Phi}'_X(X_0) \cdot Su'(0) = 0$. Це означає, що для вектору $u'(0)$ справедливо

$$u'(0) = 0. \qquad (3.113)$$

Таким чином,

$$X'(0) = p,\ x'(0) = p_x. \qquad (3.114)$$

Метою подальшого викладу буде обчислення апроксимації параметризації (3.109) в околі $\alpha = 0$ у вигляді

$$\begin{bmatrix} \bar{x}(\alpha) \\ \bar{b}(\alpha) \end{bmatrix} = X_0 + \alpha X'(0) + \frac{1}{2}\alpha^2 X''(0) + \frac{1}{6}\alpha^3 X^{(3)}(0) + \frac{1}{24}\alpha^4 X^{(4)}(0) \qquad (3.115)$$

Оскільки $X'(0) = p$, то необхідно визначити інші елементи апроксимації (3.115):

$$X''(0) = S \cdot u''(0),\ X^{(3)}(0) = S \cdot u^{(3)}(0),\ X^{(4)}(0) = S \cdot u^{(4)}(0) \qquad (3.116)$$

Для обчислення векторів (3.116) складаються рівняння, що виходять послідовним диференціюванням виразу (3.111) по α. Першою похідною від (3.110) являється вектор (3.112), компоненти якого мають вигляд

$$\left(\Phi_{jx}'(x_0, b_0), p_x + [S_x \quad S_c] \cdot u'(0)\right) + \left(\Phi_{jb}'(x_0, b_0), p_b\right) + [0 \quad S_b] \cdot u'(0) = 0 \qquad (3.117)$$

$$\left(p_j, p_b + \begin{bmatrix} 0 & S_b \end{bmatrix} \cdot u'(0)\right) = 0,\ j = 1,...,m-1. \tag{3.118}$$

Для побудови тієї частини апроксимації (3.115), яка розташована в координатах $x \in E^n$, введемо позначення:

$$\bar{p}_1 = p_{x,},\ \bar{p}_2 = \begin{bmatrix} S_x & S_c \end{bmatrix} \cdot u''(0),\ \bar{p}_3 = \begin{bmatrix} S_x & S_c \end{bmatrix} \cdot u^{(3)}(0),\ \bar{p}_4 = \begin{bmatrix} S_x & S_c \end{bmatrix} \cdot u^{(4)}(0).$$

Тоді

$$\bar{x}(\alpha) = x_0 + \alpha \cdot \bar{p}_1 + \frac{1}{2}\alpha^2 \cdot \bar{p}_2 + \frac{1}{6}\alpha^3 \cdot \bar{p}_3 + \frac{1}{24}\alpha^4 \cdot \bar{p}_4. \tag{3.119}$$

Вектори $\bar{p}_2, \bar{p}_3, \bar{p}_4$ обчислюються з рівнянь

$$\Phi'_x(x_0, b_0) \cdot \bar{p}_2 = -\begin{bmatrix} \left(\Phi''_{1_{xx}}(x_0, b_0)p_x, p_x\right) \\ ... \\ \left(\Phi''_{n_{xx}}(x_0, b_0)p_x, p_x\right) \end{bmatrix} - 2 \cdot \begin{bmatrix} \left(\Phi''_{1_{xb}}(x_0, b_0)p_b, p_x\right) \\ ... \\ \left(\Phi''_{n_{xb}}(x_0, b_0)p_b, p_x\right) \end{bmatrix} \tag{3.120}$$

$$\Phi'_x(x_0, b_0) \cdot \bar{p}_3 = -3 \cdot \begin{bmatrix} \left(\Phi''_{1_{xx}}(x_0, b_0)p_x, \bar{p}_2\right) \\ ... \\ \left(\Phi''_{n_{xx}}(x_0, b_0)p_x, \bar{p}_2\right) \end{bmatrix} - 3 \cdot \begin{bmatrix} \left(\Phi''_{1_{xb}}(x_0, b_0)p_b, \bar{p}_2\right) \\ ... \\ \left(\Phi''_{n_{xb}}(x_0, b_0)p_b, \bar{p}_2\right) \end{bmatrix} - \tag{3.121}$$

$$-3 \cdot \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial}{\partial x'}\Phi''_{1_{xb}}(x_0, b_0)p_b, p_x\right)(p_x, e_i) \\ ... \\ \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial}{\partial x'}\Phi''_{n_{xb}}(x_0, b_0)p_b, p_x\right)(p_x, e_i) \end{bmatrix},$$

$$\Phi'_x(x_0, b_0) \cdot \bar{p}_4 = -4 \cdot \begin{bmatrix} \left(\Phi''_{1_{xx}}(x_0, b_0)p_x, \bar{p}_3\right) \\ ... \\ \left(\Phi''_{n_{xx}}(x_0, b_0)p_x, \bar{p}_3\right) \end{bmatrix} - 3 \cdot \begin{bmatrix} \left(\Phi''_{1_{xb}}(x_0, b_0)\bar{p}_2, \bar{p}_2\right) \\ ... \\ \left(\Phi''_{n_{xb}}(x_0, b_0)p_b, \bar{p}_2\right) \end{bmatrix} - \tag{3.122}$$

$$-6 \cdot \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial}{\partial x'}\Phi''_{1_{xb}}(x_0, b_0)p_b, p_x\right) \cdot (\bar{p}_2, e_i) \\ ... \\ \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial}{\partial x'}\Phi''_{n_{xb}}(x_0, b_0)p_b, p_x\right) \cdot (\bar{p}_2, e_i) \end{bmatrix} -$$

$$-6 \cdot \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial}{\partial x'}\Phi''_{1_{xb}}(x_0, b_0)p_b, \bar{p}_2\right) \cdot (p_x, e_i) \\ ... \\ \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial}{\partial x'}\Phi''_{n_{xb}}(x_0, b_0)p_b, \bar{p}_2\right) \cdot (p_x, e_i) \end{bmatrix} - -4 \cdot \begin{bmatrix} \left(\Phi''_{1_{xb}}(x_0, b_0)p_b, \bar{p}_3\right) \\ ... \\ \left(\Phi''_{n_{xb}}(x_0, b_0)p_b, \bar{p}_3\right) \end{bmatrix}.$$

Оскільки $\Phi''_{jbb}(x, b) = 0$, $j = 1,...,n,$ то з урахуванням рівності (3.113) похідні по α від виразів (3.117), (3.118) виглядають так:

$$\left(\Phi''_{jxx}(x_0,b_0)p_x,p_x\right)+2\left(\Phi''_{jxb}(x_0,b_0)\cdot p_b,p_x\right)+ \tag{3.123}$$

$$+\left(\Phi_{jx}(x_0,b_0),[S_x \quad S_c]\cdot u''(0)\right)+ +\left(\Phi_{jb}(x_0,b_0),[0 \quad S_c]\cdot u''(0)\right)=0,$$

$$\left(p_j[0 \quad S_b]\cdot u''(0)\right)=0,\ j=1,...,m-1, \tag{3.124}$$

Якщо розбити вектор $u''(0)$ на частини $u''_1\in E^{n-1}$, $u''_2\in E^m$, то $u''(0)=[u''_1 \quad u''_2]$ і вектор $u''(0)=[u''_1 \quad 0]$ задовольняє рівнянням (3.124). Тому $p_2=[S_x \quad S_c]\cdot u''(0)=S_x\cdot u''_1$, а рівняння (3.123) в матричному записі мають вигляд

$$\Phi'_x(x_0,b_0)\overline{p}_2=-R_x(p_x,p_x)-2R_b(p_b,p_x) \tag{3.125}$$

У (3.125) в якості векторів $R_x(p_x,p_x)$ і $R_b(p_b,p_x)$ фігурують праві частини з (3.120). Для обчислення вектору $\overline{p}_3$ необхідно отримати похідну α від вираження (3.123). Щоб виписати ці формули, розглянемо похідні від величин

$$\left(\Phi''_{jxx}(x_0,b_0)q_x,q_x\right),\qquad \left(\Phi''_{jxb}(x_0,b_0)\cdot q_b,q_x\right),\quad q_x\in E^n \qquad q_b\in Em,$$

рахуючи вектори q_x і q_b фіксованими, справедливі рівності:

$$\Phi''_{jxx}(x_0,b_0)\cdot q_x=\sum_{i=1}^{n}\frac{\partial}{\partial x^i}\Phi'_{jx}(x_0,b_0)\cdot(q_x,e_i),$$

$$\Phi''_{jxb}(x_0,b_0)\cdot q_x=\sum_{i=1}^{n}\frac{\partial}{\partial x^i}\Phi'_{jb}(x_0,b_0)\cdot(q_x,e_i).$$

Позначимо далі $R^j_{xb}(p_b,q_x)$ вектор з компонентами

$$\frac{\partial}{\partial x^i}\hat{O}''_{jxb}(x_0,b_0)p_bq_b=0,\qquad i=1,...,n.$$

Оскільки рівняння (3.98) квадратичні по x, то $\frac{\partial}{\partial x^i}\hat{O}''_{jxx}(x,b)=0,\ i,j=1,...,n.$

Тому справедливі вирази для наступних похідних: $\left(\Phi''_{jxx}(x_0,b_0)\cdot q_x\cdot q_x\right)'_\alpha=\left(R^j_{xb}\cdot(p_b,q_x),q_x\right)$, $\left(\Phi''_{jb}(x_0,b_0)\cdot p_b\cdot q_x\right)'_\alpha=\left(R^j_{xb}\cdot(p_b,p_x),q_x\right)$.

Останні позначення дають можливість записати похідні по α від виразів (3.123), (3.124) в такій формі:

$$3\left(\Phi''_{jxx}(x_0,b_0)p_x,S_xu''_i\right)+3\left(R^{j}{}_{xb}(p_b,p_x),p_x\right)+ \tag{3.126}$$

$$+3\left(\Phi''_{jxb}(x_0,b_0)\cdot p_b,S_x\cdot u''_1\right)+$$

$$+3\left(\Phi''_{jxb}(x_0,b_0)\cdot[0 \quad S_b]\cdot u''_1(0),p_x\right)+$$

$$+\left(\Phi_j(x_0,b_0),[S_x \quad S_c]\cdot u^{(3)}(0)\right)+ +\left(\Phi'_{jb}(x_0,b_0),[0 \quad S_c]\cdot u^{(3)}(0)\right)=0,$$

$$j=1,...,m-1,$$

$$\left(p_j,[0 \quad S_b]\cdot u^{(3)}(0)\right)=0, \qquad (3.127)$$

Вважаючи, як і раніше,

$$u^{(3)}(0)=\begin{bmatrix}u_1^{(3)}\\ u_2^{(3)}\end{bmatrix},$$

з (3.127) отримуємо $u_2^{(3)}=0.$ Тому $\bar{p}_3=[S_x \quad S_c]\cdot u^{(3)}(0)=S_x\cdot u_j^{(3)}$, а рівняння (3.126) можна представити в матричному записі:

$$\Phi'_x(x_0,b_0)\bar{p}_3=-3R_x(p_x,\bar{p}_2)-3R_b(p_b,\bar{p}_2)-3R_{xb}(p_b,p_x,p_x) \qquad (3.128)$$

В (3.128) в якості вектору $R_{xb}(p_b,p_x,p_x)$ фігурує вираз

$$R_{xb}(p_b,p_x,p_x)=\begin{bmatrix}\left(R_{xb}^1(p_b,p_x),p_x\right)\\ ...\\ \left(R_{xb}^n(p_b,p_x),p_x\right)\end{bmatrix}, \qquad (3.129)$$

а детальніше права частина (3.128) розписана в (3.121). Для обчислення вектору $\bar{p}_4$ розглянемо похідні по α від виразу (3.126) :

$$6\cdot\left(R_{xb}^j(p_b,\bar{p}_2),p_x\right)+6\cdot\left(R_{xb}^j(p_b,p_x),\bar{p}_2\right)+$$

$$+4\cdot\left(\Phi''_{jxx}(x_0,b_0)\cdot p_x,\bar{p}_3\right)+$$

$$+3\cdot\left(\Phi''_{jxx}(x_0,b_0)\bar{p}_2,\bar{p}_2\right)+\left(\Phi'_{jx}(x_0,b_0),[S_x \quad S_c]\cdot u^{(4)}(0)\right)+$$

$$+3\cdot\left(\Phi''_{jxx}(x_0,b_0)\bar{p}_2,\bar{p}_2\right)+\left(\Phi'_{jx}(x_0,b_0),[S_x \quad S_c]\cdot u^{(4)}(0)\right)+$$

$$+\left(\hat{O}'_{jb}(x_0,b_0),[0 \ S_b]\cdot u^{(4)}(0)\right)=0, \qquad j=1,...,n.$$

Вважаючи, як і раніше,

$$u^{(4)}(0)=\begin{bmatrix}u_1^{(4)}\\ u_2^{(4)}\end{bmatrix},\ u_2^{(4)}=0,$$

перепишемо останні рівняння в матричному вигляді:

$$\Phi'_x(x_0,b_0)\bar{p}_4=-6R_{xb}(p_b,\bar{p}_2,p_x)-3R_{xb}(p_b,p_{x,}\bar{p}_2)- \qquad (3.130)$$

$$-4R_b(p_b,\bar{p}_3)-4R_x(p_x,\bar{p}_3)-3R_x(\bar{p}_3,\bar{p}_3)$$

Таким чином, лема доведена, а для рівнянь (3.120) - (3.122) отриманий компактніший запис у формі (3.125), (3.128), (3.130).

Існує таке $C > 0$ і такий окіл U_b точки b_0, що для будь-якої точки $b_1 \in U_b$ існує єдине рішення x_1 рівняння $\hat{O}(x, b_1) = 0$, а для апроксимації $\bar{x}(\alpha)$ точки x_1 у виді (3.115) має місце оцінка

$$\|x_1 - \bar{x}(\alpha)\| \le \frac{1}{5!} C \|b_1 - b_0\|^5. \qquad (3.131)$$

Для $b(\alpha) = b_0 + \alpha \cdot p_b$ і відображення $x(u, \alpha) = x_0 + \alpha \cdot p + S \cdot u$ і при $u = 0$, $\alpha = 0$ справедлива рівність $\Phi[x(0,0)b(0)] = 0.$

Оскільки матриця $\Phi'_u(X_0) = \Phi'_x(X_0) \cdot S$ не вироджена, то по теоремі про неявну функцію [239] існують такі відображення $u(\alpha)$ і околиця точки $\alpha = 0$ $U = \{\alpha : |\alpha| < r\}$, що для будь-кого $\alpha_0 \in \overline{U}\{\alpha : |\alpha| \le r\}$ рівняння $\Phi[x, b(\alpha_0)] = 0$ має єдине рішення $x(u(\alpha_0), \alpha_0).$

При $\alpha_0 = \|b_1 - b_0\|$ з рівності $b(\alpha_0) = b_0 + \alpha_0 \cdot p_b$ слідує $b(\alpha_0) = b_1$, $x(\alpha_0) = x_1$. З (3.115), (3.116) отримуємо

$$x_1 - \bar{x}(\alpha_0) = \frac{1}{5!} \alpha^5 \cdot S \cdot u^{(5)}(\alpha_{cp}),\ \alpha_{cp} \in \overline{U} \qquad (3.132)$$

Оскільки $u(\alpha)$ безперервно на $\overline{U}$ разом зі своїми похідними, принаймні до п'ятого порядку включно, то величина $\max\limits_{\alpha \in \overline{U}} \|S \cdot u^{(5)}(\alpha)\|$ обмежена згори (наприклад, числом С). Враховуючи, що $\alpha_0 = \|b_1 - b_0\|$, з (3.132) отримуємо справедливість оцінки (3.131).

Припустимо, що при якихось значеннях параметрів, наприклад при $b = b_0$ знайдено рішення рівняння (3.98): $x = x_0$. Інформація про значення векторів x_0 і b_0 дозволяє вичислити матрицю $\Phi'_x(x_0, b_0)$ і здійснити її розкладання, яке згодом (коли будуть відомі праві частини) дозволить вирішувати з цією матрицею лінійні рівняння. Можна також вичислити матриці:

$$\Phi''_{jxx}(x_0, b_0), \Phi''_{jxb}(x_0, b_0), \frac{\partial}{\partial x^i} \Phi''_{jxb}(x_0, b_0),\ i, j = 1, \ldots, n.$$

Відмітимо, що усі ці обчислення можна робити до того, як поступить інформація про нові значення параметрів b_1. Таким чином, економиться час,

необхідний для оперативного обчислення рішення x_1 рівняння $\Phi(x_0, b_1) = 0$, оскільки частина загального об'єму обчислень здійснюється заздалегідь.

Як тільки стає відомим значення b_1, по формулах (3.103)обчислюється вектор p_b, після чого вирішується рівняння (3.104) відносно вектору p_x. Потім послідовно обчислюються праві частини рівнянь (3.120) - (3.122) і вектори $\bar{p}_2, \bar{p}_3, \bar{p}_4$, після чого формується крива (3.119) і для $\alpha_0 = \|b_1 - b_0\|$ обчислюється значення $\bar{x}(\alpha_0)$. Оцінка (3.131) свідчить про те, що при близькості параметрів b_0 і b_1 вектор $\bar{x}(\alpha_0)$ досить добре апроксимуватиме точне рішення x_1.

3.1.11 Метод одночасного обчислення усталених режимів і мінімальних втрат в електричних мережах

Рішення систем нелінійних рівнянь для визначення напруги в усталених режимах у вузлах електричної мережі є традиційним завданням при оперативно-диспетчерському управлінні енергетичними системами. Рішення цього завдання в режимі реального часу повинне здійснюватися всякий раз, коли відбуваються зміни в енергетичній мережі, яким відповідають зміни різних коефіцієнтів в системі нелінійних рівнянь. При цьому частиною коефіцієнтів диспетчер може управляти, здійснюючи дистанційну зміну характеристик трансформаторних підстанцій. Вибір цих характеристик диспетчер намагається зробити з урахуванням мінімальних втрат електроенергії в мережі. Знайдені значення коефіцієнтів підставляються потім в систему нелінійних рівнянь, яка після цього вирішується для визначення напруги, що встановилася, у вузлах мережі.

Замість цієї багатоходової комбінації пропонується чисельний метод, який дозволить оперативно-диспетчерському персоналу одночасно визначити напругу і такі значення керованих параметрів, при яких втрати в мережі мінімальні.

Вважатимемо, що набір напруги задається компонентами вектору $x \in E^n$ де E^n - n- мірний простір Евкліда, а набір параметрів управління - вектором

$u \in E^m, m < n$. Тоді систему нелінійних рівнянь, яка задає напругу, що встановилася, при значеннях управлінь u, можна записати так:

$$\Phi(x,u) = \begin{bmatrix} \Phi_1(x,u) \\ \dots \\ \Phi_n(x,u) \end{bmatrix} = 0. \qquad (3.133)$$

Завдання полягає у визначенні таких векторів x_* і y_*, що $\Phi(x,u) = 0$, а в точці $[x_* u_*]$ досягає мінімуму деяка функція $f(x,u)$, що характеризує втрати електроенергії.

Нехай $z \in E^m$, $X = [xu] \in E^{n+m}$, а $X(z)$ - параметризація різноманіття

$$\varphi(y_0) = \{X : \Phi(X) = y_0, y_0 = \Phi(X_0)\} \qquad (3.134)$$

у околиці точки X_0 з E^{n+m}. Тоді шукана точка $X_* = [x_* u_*]$ повинна задовольняти рівнянням

$$\Phi(X) = 0, \qquad (3.135)$$

$$X'^*(z) f'_x(X) = 0. \qquad (3.136)$$

Тут і далі зірочка на місці верхнього індексу означає транспонування. Рівняння (3.135), (3.136) фактично є записом необхідних умов екстремуму функції $f(X)$ на поверхні $\varphi(0)$ у просторі E^{n+m}.

Для вирішення системи рівнянь (3.135), (3.136) потрібні конструктивні способи побудови похідних $X'(z)$ від параметризації $X(z)$. Припустимо, що матриця $\Phi'_x(X_0)$ невироджена, m стовпців матриці $\Phi'_u(X_0)$ лінійно незалежні, а

$$P_x = -\Phi'^{-1}_x(X_0)\Phi'_u(X_0), \qquad P_1 = \begin{bmatrix} P_x \\ I_m \end{bmatrix}, \qquad P_2 = \begin{bmatrix} I_n \\ 0 \end{bmatrix},$$

де I_i - одинична матриця порядку i. Надалі знадобиться використовувати властивість лінійної незалежності стовпців матриці $P = [P_1 P_2]$ порядку $(n+m)$. Щоб переконатися в цьому, розглянемо матрицю

$$P^* P = \begin{bmatrix} P_x^* P_x + i_m & P_x^* \\ P_x & I_n \end{bmatrix} \qquad (3.137)$$

Це невироджена матриця, оскільки зворотна до неї матриця

$$\left(P^* P\right)^{-1} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}$$

конструктивно обчислюється на основі блоків матриці (3.137):

$$A_{11} = \left[P_x^* P_x + I_m - P_x^* I_n P_x\right]^{-1} = I_m$$

$$A_{12} = -I_m P_x^* I_n = -P_x^*,$$

$$A_{21} = -P_x,$$

$$A_{22} = I_n + P_x P_x^*.$$

З невиродженості $\left(P^* P\right)$ виходить лінійна незалежність стовпців матриці P. Розглянемо параметризацію різноманіття (3.134) у виді

$$X(z) = X_0 + P_1 z + P_2 \upsilon(z), \upsilon \in E^n, \qquad (3.138)$$

де $\upsilon(z)$ - таке відображення, що

$$\Phi\left[X_0 + P_1 z + P_2 \upsilon(z)\right] = y_0. \qquad (3.139)$$

Похідна від (3.139) по υ виглядає так:

$\Phi'_x(X_0) P_2 = \Phi'_x(X_0)$.

Оскільки $\Phi'_x(X_0)$ невироджена, таке $\upsilon(z)$ існує і достатнє число разів безперервно диференціюється. Похідна від (3.139) по z являється матриця

$$\Phi'_x(X_0) X'(0) = \Phi'_x(X_0)\left[P_1 + P_2 \upsilon'(0)\right] = 0 \qquad (3.140)$$

Оскільки

$$\Phi'_x(X_0) P_1 = \Phi'_x(X_0) P_x + \Phi'_u(X_0) = 0$$

то

$$\upsilon'(0) = 0 \; X'(0) = P_1. \qquad (3.141)$$

Стовпці p_{1j}, матриці P_1 є дотичними векторами до поверхні (3.134) в точці X_0. Кожній точці X відповідає свій набір дотичних векторів $p_{1j}(X)$, $i = 1,...,m$ для яких справедлива рівність

$$\left(\Phi'_{jX}(X), p_{1j}(X)\right) = 0, j = 1,...,n. \qquad (3.142)$$

Похідна по X від (3.142) має вигляд

$$\left(\Phi''_{jXX}(X), p_{1j}(X) + p'^{*}_{1j}(X) \Phi'_{jX}(X)\right) = 0, j = 1,...,n,$$

звідки, позначивши

$$\Psi_i(X_0)=\begin{bmatrix} p_{1i}^{*}(X_0) & \Phi''_{1XX}(X_0) \\ \dots & \dots \\ p_{1j}^{*}(X_0) & \Phi''_{nXX}(X_0) \end{bmatrix},\ i=1,\dots,m, \tag{3.143}$$

отримаємо рівняння для визначення матриць $p'_{1j}(X_0)$:

$$\Phi'_X(X_0)p'_{1i}(X_0)=-\Psi_i(X_0),\ i=1,\dots,m, \tag{3.144}$$

Нехай e_{ji} - i-й орт з E^j. Оскільки

$$P_1=\begin{bmatrix} p_{x1}\dots p_{xm} \\ e_{m1}\dots e_{mm} \end{bmatrix},$$

то

$$p'_{1i}(X)=\begin{bmatrix} (p_{xi})'_x & (p_{xi})'_n \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \tag{3.145}$$

а з (3.144) отримуємо

$$\Phi'_X(X_0)\left[(p_{xi})'_x(p_{xi})'_n\right]=-\Psi_i(X_0),\ i=1,\dots,m. \tag{3.146}$$

Таким чином, матриця P_x, необхідна для визначення дотичної гіперплощини до поверхні (3.134) в точці X_0 відшукується з рівняння

$$\Phi'_x(X_0)P_x=-\Phi'_u(X_0), \tag{3.147}$$

а матриця (3.145) визначається за допомогою рівняння (3.146). Якщо матриця $P_1^*=\left[P_x^* I_m\right]$ потрібна для обчислення значень лівої частини рівняння $P_1^* f'_X(X)=0$ в системі (3.135), (3.136), то матриці (3.145) потрібні для обчислення якобіана цієї системи рівнянь. Вважаємо

$$Y=\Phi'^{*-1}_x(X_0)f'_x(X_0), \tag{3.148}$$

Тоді

$$f'^{*}_x(X_0)\left[(p_{xi})'_x(p_{xi})'_u\right]=-Y^*\Psi_i(X_0),$$

а оскільки

$$\Psi_i^*(X_0)Y=\sum_{j=1}^{n}\Phi''_{jXX}(X_0)p_{1i}(Y,e_{nj}),$$

то похідна по X від вектору $P_1^*(X)f'_X(X)$ в точці X_0 буде матриця

$$B = P_1^* f'_{XX}(X_0) + \begin{bmatrix} Y^*\Psi_1(x_0) \\ \ldots\ldots\ldots \\ Y^*\Psi_m(X_0) \end{bmatrix} = P_1^* f'_{XX}(X_0) + \sum_{j=1}^{n} P_1^* \Phi''_{jXX}(X_0)(Y, e_{nj}) \tag{3.149}$$

.

Отже, якобіан системи рівнянь (3.135), (3.136) в точці X_0 має вигляд

$$A = \begin{bmatrix} \Phi'_X(X_0) \\ B \end{bmatrix}. \tag{3.150}$$

Якщо вирішувати рівняння (3.135), (3.136) за ньютонівською схемою або за схемою [241, 242], виникає необхідність в рішенні системи лінійних рівнянь з матрицею (3.150). Обчисленню матриці A в точці X_0 передує звернення матриці $\Phi'_x(X_0)$ і обчислення вектору Y по формулі (3.148). Визначення матриці P_1 також припускає рішення рівняння (3.147). Після цього появляється можливість заповнення останніх m рядків якобіана по формулі (3.149).

Далі для знаходження ньютонівського напряму $\bar{p}$ вирішується рівняння

$$A\bar{p} = -\begin{bmatrix} \Phi(X_0) \\ P_x^*(X_0) f'(X_0) + f'_u(X_0) \end{bmatrix}, \tag{3.151}$$

Вибір довжини кроку α в схемі $X_1 = X_0 + \alpha\bar{p}$ зв'язують зазвичай з мінімізацією по α функції

$$F(\alpha) = \frac{1}{2}\left\|\Phi(X_0) + \alpha\bar{p}\right\|^2 + \frac{1}{2}\left\|P_1^*(X_0 + \alpha\bar{p}) f'_X(X_0 + \alpha\bar{p})\right\|^2. \tag{3.152}$$

Кожне обчислення значення функції (3.152) припускає обчислення матриці $P_1(X_0 + \alpha\bar{p})$, що тягне звернення матриці $\Phi'_x(X_0 + \alpha\bar{p})$. Цього можна уникнути, якщо заздалегідь вирішувати систему рівнянь (3.133) знаходження такого X_0, що $\Phi(X_0) = 0$. Тоді вектор $\bar{p}$ з рівняння (3.151) буде дотичним до поверхні $\varphi(0)$ у точці X_0 і величину α в схемі $X_1 = X_0 + \alpha\bar{p}$ можна вибирати з умови мінімуму по α функції $f(X_0 + \alpha\bar{p})$.

Якщо $\tilde{O}(X_0) = 0$, то вектор $\bar{p}$ з (3.151) дійсно буде дотичним до поверхні $\varphi(0)$. Для підтвердження цього приведемо деякі відомості про побудову методів [241], [242]. Нехай для матриці S виконується рівність

$$S^*S = I_{n+m-1}\ S^*\tilde{\Phi}(X_0) = 0\ \tilde{\Phi}(X_0) = \begin{bmatrix} \Phi(X_0) \\ P_1^*(X_0) f_x'(X_0) \end{bmatrix}.$$

Вектор $\bar{p}$ з (3.151) являється дотичним до кривої

$$\bar{\varphi} = \{X : S^*\tilde{\Phi}(X) = 0\} \qquad (3.153)$$

у точці X_0, оскільки $S^*A\bar{p} = 0$. В усіх точках кривою (3.153) зберігається напрям вектору $\tilde{\Phi}(X)$. Це означає, що будь-якому $X \in \bar{\varphi}$ відповідає число γ, для якого $\tilde{\Phi}(X_0) = \gamma\overline{\Phi}(X)$. Але з огляду на те, що $\hat{O}(X_0) = 0$, в усіх точках $X \in \bar{\varphi}$ маємо $\Phi(X) = 0$, тому крива $\bar{\varphi}$ лежить на поверхні , а $\bar{p}$ є дотичним вектором до $\varphi(0)$ в точці X_0.

Процес рішення системи (3.135), (3.136) пов'язаний з визначенням вектору $\bar{p}$ з рівняння (3.151), має один недолік. З (3.149) видно, що останні m рядків якобіана (3.150) мають явно заповнену структуру навіть у тому випадку, коли матриці $f'_{XX}(\cdot)$ і $\Phi''_{jXX}(\cdot)$ розріджені. Тому вирішувати систему (3.135), (3.136) для мереж з досить великою кількістю вузлів вказаним способом скрутно.

Приведемо варіант рішення даної задачі, який дає можливість повною мірою скористатися будь-якою технологією роботи з розрідженими матрицями.

При рішенні системи рівнянь $\Phi(x, u_0) = 0$ відносно x при фіксованому u_0 можна працювати з матрицею $\Phi'_x(\cdot)$, якщо вона має розріджену структуру. Визначивши x_0, для якого $\Phi(x_0, u_0) = 0$, можна побудувати параметризацію $X(z)$ поверхні $\varphi(0)$також користуючись матрицею $\Phi'_x(\cdot)$. Потім мінімізується функція f на поверхні $\varphi(0)$. Оскільки розмірність u, як правило, не дуже велика, при мінімізації f можна цілком розмістити в пам'яті матрицю f'_{uu} [243].

Для забезпечення цих процедур розглянемо процес нелінійної апроксимації параметризації (3.138). Якщо $X_i(z)$ - компоненти вектору $X(z)$, то

$$\Phi_j[X(z)] = 0,\ j = 1,...,n,$$

а також

$$[P_1 + P_2\upsilon'(0)]^* \Phi'_{jx}(X_0) = 0,$$

$$P_1^* \Phi''_{jXX}(X_0)P_1 + \sum_{i=1}^{n+m} X_i''(0)\left(\Phi'_{jX}(X_0), e_{n+m,i}\right) = 0 \qquad (3.154)$$

Враховуючи структуру матриці P_2, з (3.138) отримуємо $X_i''(z) = \upsilon_i'(z), i = 1,...,n$, $X_i''(z) = 0, i = n+1,...n+m$.

Вважаючи

$$U(e_{mi}, e_{mj}) = \begin{bmatrix} (\upsilon_1''(0)e_{mi}, e_{mj}) \\ \cdots\cdots\cdots\cdots \\ (\upsilon_n''(0)e_{mi}, e_{mj}) \end{bmatrix}, \qquad R(p_{1i}, p_{1j}) = \begin{bmatrix} (\Phi''_{1XX}(X_0)p_{1i}, p_{1j}) \\ \cdots\cdots\cdots\cdots \\ (\Phi''_{nXX}(X_0)p_{1i}, p_{1j}) \end{bmatrix},$$

з (3.154) можна отримати n рівнянь

$$(\hat{O}''_{jXX}(X_0)p_{1i}, p_{1k}) + \sum_{i=1}^{n}(X_i''(0)e_{ml}, e_{mk})(\hat{O}'_{jX}(X_0), e_{n+m,i}) = 0,$$

які в матричному виді можна записати так:

$$\Phi'_x(X_0)U(e_{mi}, e_{mj}) = -R(p_{1i}, p_{1j}) \qquad (3.155)$$

Для мінімізації функції f на поверхні $\varphi(0)$ потрібні похідні f по z. Градієнт функції f має вигляд

$$f'_z[X(0)] = P_1^* f'_X(X_0) = P_x^* f'_X(X_0) + f'_u(X_0), \qquad (3.156)$$

а для других похідних мають місце формули

$$(f''_{zz}[X(0)]e_{mi}, e_{mj}) = (f''_{XX}(X_0)p_{1i}, p_{1j}) + (U(e_{mi}, e_{mj}), f'_x(x_0)) \qquad (3.157)$$

Щоб при визначенні кожного елементу (3.157) матриці $f''_{zz}[X(0)]$ не обчислювати вектор $U(e_{mi}, e_{mj})$ з рівняння (3.155), використовується формула (3.148).

Обчислюється вектор $Y = \Phi'^{*-1}_x(X_0)f'_x(X_0)$, а потім покладається

$$(U(e_{mi}, e_{mj}), f'_x(X_0)) = (R(p_{1i}, p_{1j}), Y).$$

Таким чином, елемент у позиції i, j матриці других похідних функції $f[X(z)]$ обчислюється за формулою

$$\left(f''_{zz}[X(0)]e_{mi}, e_{mj}\right) = \left(f''_{XX}(X_0)p_{1i}, p_{1j}\right) + \left(R\left(p_{1i}, p_{1j}\right), Y\right) \qquad (3.158)$$

При заповненні матриці $A_z = f''_{zz}[X(0)]$ обчислюються лише елементи, що стоять на головній діагоналі і над нею. Нижня трикутна частина матриці покладається рівною верхньою. Для мінімізації функції f напрям спуску p_z обчислюється з рівняння

$$A_z p_z = -P_x^* f'_x(X_0) - f'_u(X_0) \qquad (3.159)$$

Переміщенню уздовж вектору p_z в координатах z відповідає рух уздовж деякої кривої в координатах X, що лежить на поверхні $\varphi(0)$. Розглянемо процес нелінійної апроксимації цієї кривої. Позначивши $\bar{\upsilon} = \upsilon(z_0 + \alpha p_z)$, $z_0 = 0$, відображення $\bar{X}(\alpha) = X_0 + \alpha P_1 p_z + P_2 \bar{\upsilon}(\alpha)$ можна розбити по координатах x і u таким чином: $x(\alpha) = x_0 + \alpha P_x p_z + \bar{\upsilon}(\alpha)$, $u(\alpha) = u_0 + \alpha p_z$.

Для відображень $x(\alpha), u(\alpha)$, виконується рівність $\Phi_j[x(\alpha), u(\alpha)] = 0,\ j = 1,\ldots,n$, похідні від яких по α при $\alpha = 0$ приймають такий вигляд:

$$\left(\Phi'_{jx}(X_0), x'(0)\right) + \left(\Phi'_{ju}(X_0), u'(0)\right) = 0,\ j = 1,\ldots,n,$$

$$\left(\Phi''_{jXX}(X_0)x'(0), x'(0)\right) + 2\left(\Phi''_{jxu}(X_0)u'(0), x'(0)\right) +$$

$$+ \left(\Phi''_{juu}(X_0)u'(0), u'(0)\right) + \left(\Phi'_{jx}(X_0), x''(0)\right) = 0,\ j = 1,\ldots,n \qquad (3.160)$$

Вважаючи $p_x = P_x p_z$, отримуємо з (3.160) рівняння для визначення вектору $x''(0) = \bar{\upsilon}''(0)$:

$$\Phi''_x(X_0)\bar{\upsilon}''(0) = -\begin{bmatrix} \left(\Phi''_{1xx}(X_0)p_x, p_x\right) \\ \ldots\ldots\ldots\ldots \\ \left(\Phi''_{nxx}(X_0)p_x, p_x\right) \end{bmatrix} -$$

$$-2\begin{bmatrix} \left(\Phi''_{1xu}(X_0)p_z, p_x\right) \\ \ldots\ldots\ldots\ldots \\ \left(\Phi''_{nxu}(X_0)p_z, p_x\right) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \left(\Phi''_{1uu}(X_0)p_z, p_z\right) \\ \ldots\ldots\ldots\ldots \\ \left(\Phi''_{nuu}(X_0)p_z, p_x\right) \end{bmatrix}. \qquad (3.161)$$

Щоб виписати похідні а від виразів (3.160) і побудувати потім апроксимацію відображення $x(\alpha)$ третього порядку, введемо деякі позначення:

$$F_j(X, p_x, p_x) = \left(\Phi''_{jxx}(X)p_x, p_x\right);$$

$$G_j(X, p_z, p_x) = \left(\Phi''_{jxu}(X)p_z, p_x\right);$$

$$S_j(X, p_z, p_z) = (\Phi''_{juu}(X)p_z, p_z).$$

Тоді виконується рівності

$$(G'_{ju}(X, p_z, p_x), p_z) = (S'_{jx}(X, p_z, p_z,), p_x), \quad (3.162)$$

$$(F'_{ju}(X, p_x, p_x), p_z) = (G'_{jx}(X, p_z, p_x,), p_x),$$

$$(F''_{juu}(X, p_x, p_x)p_z, p_z) = (G''_{jxu}(X, p_z, p_x)p_z, p_x) = (S''_{jxx}(X, p_z, p_z)p_x, p_x). \quad (3.163)$$

Специфіка даних рівнянь полягає в тому, що $F'_{jx}(X, p_x, p_x) = 0$, $S'_{ju}(X, p_z, p_z) = 0, j = 1,...,n$ для будь-яких векторів $p_x \in E^n$, $p_z \in E^m$. Це означає, що $\Phi_j(x,u)$ квадратичні по компонентам векторів x і u. З урахуванням цих умов похідні від (3.160) по α можна записати так:

$$3(\Phi''_{jxx}(X_0)x''(0), x'(0)) + 3(\Phi''_{jxu}(X_0)u'(0), x''(0)) +$$
$$+ (S'_{jx}(X_0, u'(0), u'(0)), x'(0)) + (F'_{ju}(X_0, x'(0), x'(0)), u'(0)) +$$
$$+ 2(G'_{ju}(X_0, u'(0), x'(0)), u'(0)) + 2(G'_{jx}(X_0, u'(0), x'(0)), x'(0)) +$$
$$+ (\Phi'_{jx}(X_0), x^{(3)}(0)) = 0, j = 1,...,n. \quad (3.164)$$

З (3.164) з урахуванням рівності (3.162) отримуємо наступне рівняння:

$$\Phi'_x(X_0)\bar{v}^{(3)}(0) = -3\begin{bmatrix} (\Phi''_{1xx}(X_0)p_x, p_x) \\ \cdots\cdots\cdots\cdots \\ (\Phi''_{nxx}(X_0)p_x, p_x) \end{bmatrix} -$$

$$-3\begin{bmatrix} (\Phi''_{1xu}(X_0)p_z, p_x) \\ \cdots\cdots\cdots\cdots \\ (\Phi''_{nxu}(X_0)p_z, p_x) \end{bmatrix} - 3\begin{bmatrix} (G'_{1x}(X_0, p_z, p_x), p_x) \\ \cdots\cdots\cdots\cdots \\ (G'_{nx}(X_0, p_z, p_x), p_x) \end{bmatrix} -$$

$$-3\begin{bmatrix} (G'_{1x}(X_0, p_z, p_x), p_z) \\ \cdots\cdots\cdots\cdots \\ (G'_{nu}(X_0, p_z, p_x), p_z) \end{bmatrix}. \quad (3.165)$$

Так само з урахуванням рівності (3.162), (3.163) отримуємо похідні по α від виразів (3.164):

$$3(\Phi''_{jxx}(X_0)x''(0), x''(0)) + 4(\Phi''_{jxx}(X_0)x'(0), x^{(3)}(0)) +$$
$$+ 4(\Phi''_{jxu}(X_0)u'(0), x^{(3)}(0)) + 12(F'_{ju}(X_0, x''(0), x'(0)), u'(0)) +$$
$$+ 6(G'_{ju}(X_0, u'(0), x''(0)), u'(0)) + 6(G''_{jxu}(X_0, u'(0), x'(0))u'(0), x'(0)) +$$
$$+ (\Phi'_{jx}(X_0), x^{(4)}(0)) = 0, j = 1,...,n,$$

звідки слідує рівняння

$$\Phi'_x(X_0)\overline{\upsilon}^{(4)}(0) = -3\begin{bmatrix}(\Phi''_{1xx}(X_0)\overline{\upsilon}''(0),\overline{\upsilon}''(0))\\ \cdots\cdots\cdots\cdots\\ (\Phi''_{nxx}(X_0)\overline{\upsilon}''(0),\overline{\upsilon}''(0))\end{bmatrix} -$$

$$-4\begin{bmatrix}(\Phi''_{1xx}(X_0)p_x,\overline{\upsilon}^{(3)}(0))\\ \cdots\cdots\cdots\cdots\\ \Phi''_{nxx}(X_0)p_x,\overline{\upsilon}^{(3)}(0)\end{bmatrix} - 4\begin{bmatrix}(\Phi''_{1xu}(X_0)p_z,\overline{\upsilon}^{(3)}(0))\\ \cdots\cdots\cdots\cdots\\ \Phi''_{nxu}(X_0)p_z,\overline{\upsilon}^{(3)}(0)\end{bmatrix} -$$

$$-12\begin{bmatrix}(F'_{1u}(X_0,\overline{\upsilon}'(0),p_x),p_z)\\ \cdots\cdots\cdots\cdots\\ (F'_{nu}(X_0,\overline{\upsilon}'(0),p_x),p_z)\end{bmatrix} - 6\begin{bmatrix}(G'_{1u}(X_0,p_z,\overline{\upsilon}''(0)),p_z)\\ \cdots\cdots\cdots\cdots\\ (G'_{nu}(X_0,p_z,\overline{\upsilon}''(0)),p_z)\end{bmatrix} -$$

$$-6\begin{bmatrix}(G''_{1xu}(X_0,p_z,p_x)p_z,p_x)\\ \cdots\cdots\cdots\cdots\\ (G''_{nxu}(X_0,p_z,p_x)p_z,p_x)\end{bmatrix}. \qquad (3.166)$$

Відмітимо, що функції Φ_j характеризують баланс потужності у відповідному вузлі, а матриці других похідних Φ''_j складаються з одного ненульового стовпця і одного ненульового рядка, тому легко обчислюються величини за участю цих похідних в правих частинах рівнянь (3.161), (3.165), (3.166). Те ж саме відноситься і до похідних більш високого порядку.

Процес визначення точки мінімуму функції $f(X)$ на поверхні полягає в наступному. При фіксованому u_0 вирішується система (3.133) і визначається точка x_0, для якої $\hat{O}(x_0,u_0)=0$. Після цього з рівняння (3.147) знаходиться матриця P_x і за формулою (3.148) обчислюється вектор Y. З участю матриці $P_1^* = \left[P_x^* I_m\right]$ по формулах (3.156), (3.157) обчислюються похідні функції f і вектор p_z з рівняння (3.159). Це дає можливість побудувати нелінійну апроксимацію кривої спуску $\overline{X}(\alpha)$, що лежить на поверхні $\varphi(0)$, для чого обчислюються вектори $\overline{\upsilon}''(0),\overline{\upsilon}^{(3)}(0),\overline{\upsilon}^{(4)}(0)$ з рівнянь (3.161), (3.165), (3.166). Чергове наближення X_1 відшукується шляхом переміщення з точки X_0 уздовж такої кривої:

$$\overline{X}(\alpha) = X_0 + \alpha P_1 p_z + \frac{1}{2}\alpha^2 P_2\overline{\upsilon}''(0) + \frac{1}{6}\alpha^3 P_2\overline{\upsilon}^{(3)}(0) + \frac{1}{24}\alpha^4 P_2\overline{\upsilon}^{(4)}(0).$$

Величина α вибирається з умови $\alpha_0 = \arg\min f\left[\overline{X}(\alpha)\right]$, а $X_1 = \overline{X}(\alpha_0)$.

Така схема відрізняється від описаної раніше процедури рішення системи (3.135), (3.136) тим, що на усіх етапах вирішуються лінійні рівняння з розрідженою матрицею $\Phi'_x(\cdot)$ і різними правими частинами. Тільки на етапі побудови вектору p_z вирішується лінійне рівняння (3.159) з матрицею A_z порядку m, яку, як правило, можна цілком розмістити в пам'яті комп'ютера. При рішенні ж рівнянь (3.135), (3.136) виникає необхідність працювати з якобіаном (3.150), останні m рядків якого розмірність $(m = n)$ далеко не завжди можна розмістити в комп'ютері цілком.

3.1.12 Дослідження нового варіанта ітераційного методу рішення усталених режимів роботи електричних мереж

Розглянемо новий ітераційний метод рішення систем нелінійних рівнянь для визначення усталених режимів роботи електричних мереж. Ітераційна схема отримання чергового наближення має нелінійну структуру. Доказана висока швидкість збіжності методу при рішенні таких задач. Теоретичні результати підтверджені обчислювальними експериментами.

Розглянуто новий ітераційний метод розв'язання систем нелінійних рівнянь для визначення параметрів усталених режимів електричних мереж. Ітераційна схема одержання наступного наближення має нелінійну структуру. Доведено високу швидкість збіжності методу під час розв'язання таких завдань. Теоретичні результати знайшли підтвердження під час проведення обчислювальних експериментів.

Розрахунок усталених режимів роботи електричних мереж є одним з найбільш важливих задач оперативного управління режимами мережевих підприємств і енергооб'єднань. Алгоритми розрахунку усталених режимів входять до складу більше складних алгоритмів рішення широкого класу електроенергетичних завдань. Необхідність рішення завдань еквівалентування, оптимізації режимів, визначення статичної і динамічної стійкості і розрахунку струмів короткого замикання виникає в роботі

диспетчерів, служб релейного захисту і автоматики, служб перспективного розвитку та інше.

Класичний розгляд завдання усталеного режиму трифазної електричної мережі, що представляється однолінійною заступною схемою і рівняннями для фазних змінних в комплексній формі, полягає у визначенні напруги у вузлах і потоків потужності в гілках електричної мережі. Початковою інформацією для рішення цього завдання є конфігурація ЕМ, параметри заступних схем елементів ЕМ і напруга опорних (балансуючих/генеруючих) вузлів.

Залежно від умов регулювання напруги і потужності вузлів передбачена можливість виділити наступні типи вузлів електричної мережі: нерегульовані вузли (у них задається активна і реактивна потужності, які можуть вважатися постійними або варіюватися в залежності від зміни модуля напруги відповідно до заданих статичних характеристик) навантажень; вузли із заданим модулем напруги (у них задаються активна потужність, модуль напруги і діапазон регулювання реактивної потужності); балансуючий вузол або група вузлів, для яких необхідно задати модуль напруги і фазу.

Лінії електропередач представляються П-подібними заступними схемами з урахуванням поперечної провідності, двохобмотувальні трансформатори - Г-подібними заступнии схемами з комплексними коефіцієнтами трансформації. Опір трансформатора має бути приведений до вищої напруги. Трьохобмотувальні трансформатори представлені Т-подібними схемами, при цьому опір кожної обмотки визначається відносно її номінальної напруги. Якщо для трансформатора в початкових даних визначені номер і крок відгалуження, то в розрахунках бере участь реальна активна складова комплексного коефіцієнту трансформації.

Розглянемо електричну мережу, що складається з s вузлів, а x_s і y_s - відповідно активна і реактивна складова напруга для усіх $s-x$ вузлів, окрім одного або більше, названого такими, що балансують задану потужність вузлів, Значення напруги вузлів в усталеному режимі електричної мережі

задаються наступною системою нелінійних рівнянь алгебри, складених на підставі закону Ома для окремих елементів і рівнянь першого і другого законів Кірхгофа для вузлів і контурів мережі [240, 241]:

$$\left(x_s^2 + y_s^2\right)\sum_i g_{si} - \sum_{i \neq s}\left[\left(x_s x_i + y_s y_i\right)g_{si} - \left(x_s y_i - - y_s x_i\right)b_{si}\right] + P_s = 0, \qquad (3.167)$$

$$s = 1,...,N$$

$$\left(x_s^2 + y_s^2\right)\sum_i b_{si} - \sum_{i \neq s}\left[\left(x_s y_i + y_s x_i\right)g_{si} + + y_s y_i\right)b_{si}\right] + Q_s = 0, \qquad (3.168)$$

$$s = 1,...,N$$

Тут P_s і Q_s - відповідно активна і реактивна потужності вузлів; g_{si} і b_{si} - відповідно подовжня активна і реактивна провідності гілок мережі.

Для дослідження методів рішення системи рівнянь (3.167), (3.168) перетворимо її запис до векторно-матричного виду.

$$g_{s0} = \begin{bmatrix} g_{si} \\ \dots \\ 0 \\ \dots \\ g_{sN} \end{bmatrix}, \; b_{s0} = \begin{bmatrix} b_{si} \\ \dots \\ 0 \\ \dots \\ b_{sN} \end{bmatrix} \qquad (3.169)$$

Хай g_{s0} і b_{s0} - вектори, у яких компонентами з номером s є нулі, а компонентами з номерами $i \neq s$ - числа g_{si} і b_{si}. Оскільки рівняння (3.167), (3.168) можна переписати у виді

$$\left(x_s^2 + y_s^2\right)\sum_i g_{si} - x_s \sum_{i \neq s}\left[x_i g_{si} - y_i b_{si}\right] - y_s \sum_{i \neq s}\left[y_i g_{si} +\right.$$

$$\left. + x_i b_{si}\right] + P_s = 0, \;\; s = 1,...,N \qquad (3.170)$$

$$\left(x_s^2 + y_s^2\right)\sum_i b_{si} - x_s \sum_{i \neq s}\left[y_i g_{si} + x_i b_{si}\right] - y_s \sum_{i \neq s}\left[y_i b_{si} -\right.$$

$$\left. - x_i g_{si}\right] + Q_s = 0, \;\; s = 1,...,N, \qquad (3.171)$$

та з урахуванням позначення (3.169) ці рівняння перетворюються таким чином:

$$\left(x_s^2 + y_s^2\right)\sum_i g_{si} + x_s\left(\begin{bmatrix} -g_{s0} \\ b_{s0} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}\right) +$$

$$+ y_s\left(\begin{bmatrix} g_{s0} \\ -b_{s0} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}\right) + P_s = 0,\ s = 1,...,N \qquad (3.172)$$

$$\left(x_s^2 + y_s^2\right)\sum_i b_{si} + x_s\left(\begin{bmatrix} -b_{s0} \\ -g_{s0} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}\right) +$$

$$+ y_s\left(\begin{bmatrix} g_{s0} \\ -b_{s0} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}\right) + Q_s = 0,\ s = 1,...,N \qquad (3.173)$$

Відмітимо, що в скалярних добутках у виразах (3.172), (3.173) використані вектори розмірності. Число даних рівнянь також дорівнює 2N, тому у рамках цієї розмірності введемо кілька нових позначень. Нехай $X = [xy] \in E^{-2N}$, де E^{-2N} $2N$ - мірна евклідова простір; $E(x)$ - діагональна матриця з елементами $\left(x_1^2 + y_1^2\right), \left(x_1^2 + y_1^2\right),..., \left(x_N^2 + y_N^2\right), \left(x_N^2 + y_N^2\right)$ по головній діагоналі. Символом P_Q позначимо вектор з E^{-2N} з компонентами $P_1, Q_1,..., P_N, Q_N$, а символом c позначимо вектор з компонентами

$$\sum_i g_{si}, \sum_i b_{si},..., \sum_i g_{si}, \sum_i b_{si}, c \in E^{2N}.$$

Нехай також $I(x)$ і $I(y)$ - діагональні матриці порядку $2N$ наступного виду:

$$I(x) = diag[x_1 x_1 x_2 x_2 ... x_N x_N], \qquad (3.174)$$

$$I(Y) = diag[y_1 y_1 y_2 y_2 ... y_N y_N]. \qquad (3.175)$$

Позначимо транспонування зірочкою у верхньому індексі і введемо матриці порядку $2N$

$$A_1 = \begin{bmatrix} -g_{10}^* & b_{10}^* \\ -b_{10}^* & -g_{10}^* \\ ... & ... \\ -g_{N0}^* & -b_{N0}^* \\ -b_{N0}^* & -g_{N0}^* \end{bmatrix},\ A2 = \begin{bmatrix} -b_{10}^* & g_{10}^* \\ -g_{10}^* & -b_{10}^* \\ ... & ... \\ -b_{N0}^* & -g_{N0}^* \\ -g_{N0}^* & -b_{N0}^* \end{bmatrix}. \qquad (3.176)$$

З урахуванням позначень (3.174) - (3.176) вирази (3.172), (3.173) можна представити як єдиний векторно-матричну запис:

$$E(x)c + P_Q + [I(x)A_1 + I(y)A_2]X = 0. \qquad (3.177)$$

Таким чином, обчислення значень напруги $X = [xy]$ для усталеного режиму електричної мережі, що має N вузлів, зводиться до рішення системи з $2N$ нелінійних рівнянь виду (3.177).

Вимоги до управління електричними мережами в реальному часі накладають дуже жорсткі обмеження на термін отримання рішення, тому система рівнянь (3.177) вирішується методом Ньютона. Ітераційна послідовність наближень до рішення системи (3.177), генерована методом Ньютона, має квадратичну швидкість збіжності. Цей показник швидкості отримання рішення частенько не задовольняє вимогам реальних умов функціонування автоматизованих систем управління експлуатацією енергосистем.

Розглянемо метод, що володіє набагато більше високою швидкістю збіжності, чим традиційний метод Ньютона. Перевага пропонованого методу обумовлює специфіку рівнянь, що описують усталений режим роботи електричних мереж. Так, змінні, що входять в (3.177), утворюють поєднання не вище другої міри, тобто формула (3.177) є системою квадратичних рівнянь. Для її вирішення використовується підхід, описаний в роботах [242, 243]. Цей підхід полягає в побудові на кожній ітерації кривої, уздовж якої надалі для отримання наступного наближення проводиться мінімізація суми квадратів нев'язок. Дотичний напрям до згаданої кривої співпадає з ньютонівським напрямом і підхід, використовуваний в цьому сенсі, є деяким узагальненням методу Ньютона. Специфіка рівнянь (3.177) використовується для отримання апроксимації будь-якої міри точності при обмеженні перших і других похідних від рівнянь, що входять в систему (3.177).

Розглянемо алгоритм, що здійснює в процесі рішення рівнянь (3.177) апроксимацію кривої четвертого порядку. Нехай

$$\Phi(X) = E(X)c + P_Q + [I(x)A_1 + I(y)A_2]X$$

і побудовано поточне наближення до рішення X_k.

1. Побудувати якобіан $A = \hat{O}'(X_k)$. вирішити систему лінійних рівнянь

$$A_p = -\Phi(X_k) \qquad (3.178)$$

відносно вектору p і вичислити вектор $p_1 = p/\|p\|$.

2. Обчислити вектор

$$R(X_k, p_1, p_1) = \begin{bmatrix} (\Phi_1''(X_k)p_1, p_1) \\ \dots \\ (\Phi_{2N}''(X_k)p_1, p_1) \end{bmatrix},$$

де $\Phi_1''(X_k)$ означає матрицю других похідних від i-ї компоненти вектору $\Phi(X)$ в точці X_k, а потім визначити вектор p_2 з лінійного рівняння

$$Ap_2 = -R(X_k, p_1, p_1) \qquad (3.179)$$

3. Обчислити вектор

$$R(X_k, p_1, p_1) = \begin{bmatrix} (\Phi_1''(X_k)p_1, p_2) \\ \dots \\ (\Phi_{2N}''(X_k)p_1, p_2) \end{bmatrix}$$

і визначити вектор p_3 з рівняння

$$Ap_3 = -3R(X_k, p_1, p_2) \qquad (3.180)$$

4. Вичислити вектори

$$R(X_k, p_1, p_3) = \begin{bmatrix} (\Phi_1''(X_k)p_1, p_3) \\ \dots \\ (\Phi_{2N}''(X_k)p_1, p_3) \end{bmatrix}, \quad R(X_k, p_2, p_2) = \begin{bmatrix} (\Phi_1''(X_k)p_2, p_2) \\ \dots \\ (\Phi_{2N}''(X_k)p_2, p_2) \end{bmatrix}$$

і визначити вектор p_4 з рівняння

$$Ap_4 = -4R(X_k, p_1, p_3) - 3R(X_k, p_2, p_2) \qquad (3.181)$$

5. Сформувати параметричне представлення кривої

$$X(\alpha) = X_k + \alpha p_1 + \frac{1}{2}\alpha^2 p_2 + \frac{1}{6}\alpha^3 p_3 + \frac{1}{24}\alpha^4 p_4$$

і здійснити мінімізацію α функції одній змінній $F[X(\alpha)]$ для визначення величини α_k:

$$F[X(\alpha)] = \min F[X(\alpha)].$$

Тут $F(X) = \frac{1}{2}(\Phi(X), \Phi(X))$. У якості чергового наближення до рішення використана точка $X_{k+1} = X(\alpha_k)$.

Представлення рівнянь (3.167), (3.168) у вигляді виразу (3.177) дозволяє у векторно-матричній формі записати якобіан $\Phi(X)$. Нехай e_j - координатний орт з E^{2N}, а $\alpha_{ij} = \left(A_i^* e_j, X\right)$ $i = 1,2,\ j = 1,...,2N$.

Введемо наступні матриці порядку $2N$:.

$$B_1(X) = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & ... & 0 & \alpha_{21} & ... & 0 \\ \alpha_{21} & ... & 0 & \alpha_{22} & ... & 0 \\ ... & ... & ... & ... & ... & ... \\ 0 & ... & \alpha_{1,2N-1} & 0 & ... & \alpha_{2,2N-1} \\ 0 & ... & \alpha_{1,2N} & 0 & ... & \alpha_{2,2N} \end{bmatrix}$$

$$B_2(X) = \begin{bmatrix} 2x_1P_1 & ... & 0 & 2y_1P_1 & ... & 0 \\ 2x_1Q_1 & ... & 0 & 2y_1Q_1 & ... & 0 \\ ... & ... & ... & ... & ... & ... \\ 0 & ... & 2x_NP_N & 0 & ... & 2y_NP_N \\ 0 & ... & 2x_NQ_N & 0 & ... & 2y_NQ_N \end{bmatrix}$$

Враховуючи, що $X_k = [x_k, y_k]$, отримаємо

$$\Phi'(X_k) = B(X_k) + B(X_k) + I(x_k)A_1 + I(y_k)A_2 \qquad (3.182)$$

Таким чином, якобіан (3.182) можна формувати на основі величин P_i, Q_j, що зберігаються в пам'яті, елементів матриць (3.176) і компонент вектору X_k.

Компоненти векторів (3.169) відрізняються наявністю у якобіана (3.182) розрідженої структури для будь-кого значення вектору X. Це означає, що число ненульових елементів в матриці (3.182) в порівнянні з величиною $(2N)^2$ невелике, тому технологію розріджених матриць [244, 245] можна використати для рішення на кожній ітерації методу лінійних рівнянь (3.178) - (3.181).

Відносно властивостей збіжності ітераційної послідовності X_k, генерованій пропонованим методом, справедливі наступні твердження

Теорема. Якщо для точок $X \in M(X_0) = \{X : F(X) \le F(X_0)\}$

виконується нерівність

$\left\|\Phi'^*(X)\Phi(X)\right\| \ge \overline{m}\left\|\Phi(X)\right\|\overline{m} > 0,$ то $\left\|\Phi(X_k)\right\| \to 0$ при $k \to \infty$.

Якщо в точці X_* де $\Phi(X_*)=0$, матриця $\hat{O}'(X_*)$ невироджена, то для послідовності X_k справедлива оцінка

$$\|X_{k+1}-X_*\| \le C\|X_k-X_*\|^5.$$

3.1.13 Дослідження та аналіз деяких особливостей чисельного розрахунку напруги при моделюванні усталених режимів електроенергетичних систем

Розглянуто прийоми, які дозволяють на алгоритмічному рівні скоротити обсяг обчислень для чисельного розв'язування системи нелінійних рівнянь щодо визначення напруги у вузлах електричної мережі. В обчислювальних процедурах, які складають основу прийомів, що запрограмовані, максимально використовується специфіка нелінійних рівнянь.

Завдання за визначенням напруг у вузлах усталених режимів роботи електричної мережі в умовах оперативно-диспетчерського управління в енергетиці реалізуються, як правило, в режимі реального часу. Ці завдання зводяться до процедури рішення нелінійних систем рівнянь [246]. Для скорочення обсягу обчислень необхідно враховувати специфіку даного завдання. Якщо x_s, y_s - відповідно активна і реактивна складові напруги у вузлі з номером s, то пара нелінійних рівнянь для цього вузла має вигляд

$$\left(x_s^2+y_s^2\right)\sum_i g_{si} - \sum_{i\ne s}\left[\left(x_s x_i - y_s y_i\right)g_{si} - \right. \qquad (3.183)$$

$$\left. -\left(x_s y_i - y_s x_i\right)b_{si}\right] + P_s = 0, s = 1,\ldots,N$$

$$\left(x_s^2+y_s^2\right)\sum_i b_{si} - \sum_{i\ne s}\left[\left(x_s y_i - y_s x_i\right)g_{si} + \right. \qquad (3.184)$$

$$\left. +\left(x_s x_i + y_s y_i\right)b_{si}\right] + Q_s = 0, s = 1,\ldots,N$$

Тут P_s, Q_s - відповідно активна і реактивна потужності вузлів; g_{si}, b_{si} - відповідно активна и реактивна провідності гілок мережі.

Розглянемо випадки, коли в деяких вузлах модулі напруги - відомі величини. Якщо такими вузлами є вузли з номерами s, то згадана умова зводиться до рівнянь

$$x_s^2 + y_s^2 = R_s^2, s = 1,\ldots,m. \qquad (3.185)$$

У цих випадках у відповідних вузлах рівняння (3.184) замінюють рівняннями (3.185), а рівняння (3.183) набирають вигляду

$$R_s^2 \sum_i g_{si} - \sum_{i \neq s} \left[(x_s x_i - y_s y_i) g_{si} - (x_s y_i - y_s x_i) b_{si} \right] + P_s = 0, s = 1,..., m \qquad (3.186)$$

Таким чином, у вузлах з відомим модулем напруги замість пари рівнянь (3.183), (3.184) шукана напруга буде задана рівняннями (3.185), (3.186), в інших вузлах пари (3.183), (3.184) зберігаються.

Подібну систему рівнянь можна вирішувати будь-яким ітераційним методом і якщо N - число вузлів, то в усіх цих методах в просторі змінних $X = [x_1 ... x_N, y_1 ... y_N]$ будується ітераційна послідовність X_k, в граничних точках якої знаходяться рішення даної системи нелінійних рівнянь.

Оскільки завдання за визначенням напруги усталених режимів повинне вирішуватися в режимі реального часу, як рішення приймається та точка ітераційної послідовності, яка відповідає останньому наближенню, отриманому у відведений для вирішення завдання інтервал часу. В процесі рішення спостерігається спадання суми квадратів нев'язок усіх рівнянь, проте для нев'язок якої-небудь окремої групи рівнянь, наприклад (3.185), релаксаційність не обов'язкова. Внаслідок цього в якому-небудь вузлі з номером s нев'язка $\left| x_s^2 + y_s^2 - R_s^2 \right|$ може приймати істотні значення. Остання обставина є серйозною перешкодою для використання наближеного рішення, оскільки модуль напруги у вузлі s має дорівнювати величині R_s.

Таким чином, виникає необхідність в параметризації усіх залежностей типу (3.185):

$$x_s(\varphi_s) = R_s \cos\varphi_s, \qquad (3.187)$$

$$y_s(\varphi_s) = R_s \sin\varphi_s, s = 1,..., m. \qquad (3.188)$$

Підставимо функції $x_s(\varphi_s)$ і $y_s(\varphi_s)$ в рівняння (3.186) і в ті рівняння (3.183), (3.184), які містять x_s і y_s. Виключивши з даної системи рівняння виду (3.185), отримаємо систему $\Phi(X) = 0$. Розіб'ємо змінні X на дві групи: X_1 і X_2

. Нехай до групи X_2 входять x_s і y_s, що відповідають вузлам з фіксованим модулем. Вважаючи $\overline{\varphi} = [\varphi_1 ... \varphi_m]$, отримуємо запис системи рівнянь у виді

$$\Phi[X_1 X_2(\overline{\varphi})] = 0. \qquad (3.189)$$

Якщо вирішувати рівняння (3.189) по змінних X_1, $\overline{\varphi}$, то для будь-якої точки ітераційної послідовності $X_k = [X_{1k}, X_2(\overline{\varphi}_k)]$ змінні X_2 задовольнятимуть співвідношенням (3.185). Цей метод впродовж всього процесу отримання наближеного рішення гарантує набуття фіксованого значення модулів напруг у вузлах мережі і дозволяє використати набори напруги без додаткового коригування.

Якщо за допомогою формул (3.187), (3.188) перейти до полярних координат по усьому набору змінних, то загубляться деякі переваги, пов'язані з квадратністю рівнянь здебільшого змінних. Зважаючи на цю квадратність для забезпечення високої швидкості збіжності ітераційного методу можна обмежитися обчисленнями похідних не вище другого порядку.

Алгоритм рішення рівняння (3.189) має наступний вигляд.

1. Вичислити в точці $[X_{1k}, X_2(\overline{\varphi}_k)]$ якобіан A рівнянь (3.189) і вирішити лінійне рівняння $A\overline{p}_1 = -\overline{s}$,

$\overline{s} = \Phi(X_{1k}, X_2(\overline{\varphi}_k)) / \|\Phi(X_{1k}, X_2(\overline{\varphi}_k))\|$ відносно $\overline{p}_1$.

2. Визначити вектор

$$r_1 = \begin{bmatrix} (\hat{O}_1''(\cdot)\overline{p}_1, \overline{p}_1) \\ \cdots\cdots\cdots\cdots \\ (\hat{O}''_{n-m}(\cdot)\overline{p}_1, \overline{p}_1) \end{bmatrix}, \qquad (3.190)$$

де $\Phi_i(\cdot) = \Phi_i(X_{1k}, X_2(\overline{\varphi}_k))$, і вирішити рівняння $A\overline{p}_2 = -\overline{r}_1$ відносно $\overline{p}_2$.

3. Визначити вектори

$$r_2 = \begin{bmatrix} (\Phi_1''(\cdot)\overline{p}_2, \overline{p}_1) \\ \cdots\cdots\cdots\cdots \\ (\Phi''_{n-m}(\cdot)\overline{p}_2, \overline{p}_1) \end{bmatrix}, r_3 = \begin{bmatrix} (F_1'(\overline{p}_1)\overline{p}_1, \overline{p}_1) \\ \cdots\cdots\cdots\cdots \\ (F''_{n-m}(\overline{p}_1)\overline{p}_1, \overline{p}_1) \end{bmatrix}, \qquad (3.191)$$

де $F_j(p) = (\Phi_j'(\cdot), p)$. Вирішити рівняння $A\overline{p}_3 = -3r_2 - r_3$ відносно $\overline{p}_3$.

4. Обчислити вектори

$$r_4 = \begin{bmatrix} (\Phi_1''(\cdot)\bar{p}_3, \bar{p}_1) \\ \ldots\ldots\ldots\ldots \\ (\Phi_{n-m}''(\cdot)\bar{p}_3, \bar{p}_1) \end{bmatrix}, \quad r_5 = \begin{bmatrix} (\Phi_1''(\cdot)\bar{p}_2, \bar{p}_2) \\ \ldots\ldots\ldots\ldots \\ (\Phi_{n-m}''(\cdot)\bar{p}_2, \bar{p}_2) \end{bmatrix} \tag{3.192}$$

$$r_6 = \begin{bmatrix} (\bar{F}_1'(\bar{p}_2)\bar{p}_1, \bar{p}_1) \\ \ldots\ldots\ldots\ldots \\ (\bar{F}_{n-m}''(\bar{p}_2)\bar{p}_1, \bar{p}_1) \end{bmatrix}, \quad r_7 = \begin{bmatrix} (\bar{F}_1'(\bar{p}_1)\bar{p}_1, \bar{p}_1) \\ \ldots\ldots\ldots\ldots \\ (\bar{F}_{n-m}''(\bar{p}_1)\bar{p}_1, \bar{p}_1) \end{bmatrix}, \tag{3.193}$$

де $\bar{F}_i(\bar{p}_1) = (F_j'(\bar{p}_1), \bar{p}_1)$. Вирішити рівняння $A\bar{p}_4 = -4r_4 - 3r_3 - 4r_6 - r$ відносно $\bar{p}_4$.

5. Сформувати криву

$$X(\alpha) = \begin{bmatrix} X_1(\alpha) \\ X_1[\bar{\varphi}(\alpha)] \end{bmatrix},$$

$$X_1(\alpha) = X_{1k} + \alpha\bar{p}_{11} + \frac{1}{2}\alpha^2\bar{p}_{21} + \frac{1}{6}\alpha^3\bar{p}_{31} + \frac{1}{24}\alpha^4\bar{p}_{41},$$

$$\bar{\varphi}(\alpha) = \bar{\varphi}_k + \alpha\bar{p}_{12} + \frac{1}{2}\alpha^2\bar{p}_{22} + \frac{1}{6}\alpha^3\bar{p}_{32} + \frac{1}{24}\alpha^4\bar{p}_{42}.$$

і покласти $X_{k-1} = X(\alpha_k)$, де $\alpha_k = \operatorname{argmin} f \cdot [X(\alpha)]$, $f[X] = \frac{1}{2}\|\Phi(X_1, X_2(\bar{\varphi}))\|^2$.

Приведений варіант алгоритму дозволяє зберегти швидкість збіжності п'ятого порядку, отриману в роботах [23, 247] для систем квадратичних рівнянь

$$\|X_{k+1} - X_*\| \le C\|X_k - X_*\|^5.$$

Розглянемо ще один прийом, який скорочує загальний об'єм обчислень в процесі визначення напруги вузлів електричної мережі, пов'язаний з процедурою перерахунку цих напруг у вузлах мережі при зміні деякого числа параметрів системи. Ці параметри характеризуються коефіцієнтами g_{si} і b_{si} в рівняннях (3.183), (3.184). Припустимо, що при деяких значеннях коефіцієнтів рішення $X_0 = [x_1^0 \ldots x_N^0 y_1^0 \ldots y_N^0]$ рівнянь (3.183), (3.184) знайдено. Після цього в електричній мережі відбуваються зміни, що стосуються частини параметрів і призводять до зміни m коефіцієнтів g_{si}, b_{si}. Об'єднаємо ці коефіцієнти у вигляді компонентів вектору $\bar{\varphi} \in E^m$, а їх колишні значення позначимо $\bar{\varphi}_0$. Тут

E^m - m- мірний евклідовий простір. Тоді для знайденого набору напруги X_0 і вектору $\overline{\varphi}_0$ справедлива рівність

$$\Phi[X_0, \overline{\varphi}_0] = 0, \Phi \in E^n, n = 2N .$$

Після зміни параметрів мережі вектор $\overline{\varphi}$ набуває значення $\overline{\varphi}_1$ і виникає необхідність вирішити рівняння

$$\Phi(X, \overline{\varphi}_1) = 0 \qquad (3.194)$$

відносно X з новим набором коефіцієнтів.

Розглянемо процедуру рішення (3.194), в якій максимально використовується інформація про попереднє рішення X_0. .Якщо X_1 є рішенням рівняння (3.194), то точки $[X_0, \overline{\varphi}_0]$ і $[X_1, \overline{\varphi}_1]$ з простору E^{n+m} лежать на кривій, усі точки якої задовольняють рівності

$$\Phi(X, \overline{\varphi}) = 0. \qquad (3.195)$$

Процедура полягає в побудові параметризації цієї кривої в околиці точки $[X_0, \overline{\varphi}_0]$ і подальшому зрушенні уздовж неї до точки $[X_1, \overline{\varphi}_1]$.

Нехай $\overline{p}_\varphi = \overline{\varphi}_1 - \overline{\varphi}_0$, $p_\varphi = \overline{p}_\varphi / \|p_\varphi\|$, $\overline{\varphi}(\psi) = \overline{\varphi}_0 + \psi p_\varphi$, де ψ - число. Тоді $\overline{\varphi}(0) = \overline{\varphi}_0$ і в просторі змінних $\overline{X} = [X\psi] \in E^{n+1}$ існує різноманіття

$$\{[X_\psi] : \Phi(X, \overline{\varphi}) = 0\}. \qquad (3.196)$$

Оскільки

$$\Phi'_{\overline{x}}(X_0, \overline{\varphi}_0) = [\Phi'_x(X_0, \overline{\varphi}_0)\Phi'_{\overline{\varphi}}(X_0, \overline{\varphi}_0)p_\varphi],$$

де $\Phi'_x(X_0, \overline{\varphi}_0)p_x = -\Phi'_{\overline{\varphi}}(X_0, \overline{\varphi}_0)p_\varphi$, вектор $p = \begin{bmatrix} p_x \\ 1 \end{bmatrix}$ являється дотичним до різноманіття (3.196) в точці $[X_0 0]$. Умовою існування p_x являється невиродженість матриці $\Phi'_x(X_0, \overline{\varphi}_0)$.

Нехай матриця S_x задовольняє умовам

$p_x^* S_x = 0$, $S_x^* S_x = I_{n-1}$, де I_i - одинична матриця порядку i, а зірочка на місці верх його індексу означає транспонування.

Стовпці матриці є

$$\begin{bmatrix} p_x & S_x & p_x \\ 1 & 0 & -\|p_x\|^2 \end{bmatrix}$$

порядку $(n+1)$ взаємно ортогональні. Позначимо

$$S = \begin{bmatrix} S_x & p_x \\ 0 & -\|p_x\|^2 \end{bmatrix}.$$

Розглянемо параметризацію кривої (3.196) в виді

$$\overline{X}(\alpha) = \begin{bmatrix} X_0 \\ 0 \end{bmatrix} + \alpha p + Su(\alpha), u \in E^n \qquad (3.197)$$

де $u(\alpha)$ - таке відображення з компонентами $u_i(\alpha)$, що

$$\Phi\left[X_0 + \alpha p_x + [S_x p_x]u(\alpha), \alpha - \|p_x\|^2 u_n(\alpha)\right] = 0. \qquad (3.198)$$

Похідною від вираження (3.198) по u є невироджена матриця порядку n : $\Phi'_{\overline{X}}(X_0, \overline{\varphi}_0)S$. Тому таке відображення $u(\alpha)$ існує і достатнє число разів безперервно диференціюється.

Побудуємо апроксимацію параметризації (3.197) такого виду:

$$X(\alpha) = X_0 + \alpha X'(0) + \frac{1}{2}\alpha^2 X''(0) + \frac{1}{6}\alpha^3 X^{(3)}(0) + \frac{1}{24}\alpha^{(4)} X^{(4)}(0),$$

$$\Psi(\alpha) = \alpha\psi'(0) + \frac{1}{2}\alpha^2\psi''(0) + \frac{1}{6}\alpha^3\psi^{(3)}(0) + \frac{1}{24}\alpha^{(4)}\psi^{(4)}(0).$$

З (3.197) витікає, що

$$X'(0) = p_x + [S_x p_x]u'(0), \qquad \psi'(0) = 1 - \|p_x\|^2 u'_n(0),$$

$$X''(0) = [S_x p_x]u''(0), \qquad \psi''(0) = -\|p_x\|^2 u''_n(0),$$

$$X^{(3)}(0) = [S_x p_x]u^{(3)}(0), \qquad \psi^{(3)}(0) = -\|p_x\|^2 u^{(3)}{}_n(0),$$

$$X^{(4)}(0) = [S_x p_x]u^{(4)}(0), \qquad \psi^{(4)}(0) = -\|p_x\|^2 u^{(4)}{}_n(0).$$

Похідні відображення $u(\alpha)$ визначаються з рівнянь, що отримуються в результаті послідовного диференціювання по α виразу (3.198). Першими похідними по α від компонент вектору (3.198) будуть вирази

$$\left(\Phi'_{jX}(\cdot), p_x + [S_x p_x]u'(0)\right) + \left(\Phi'_{j\overline{\varphi}}(\cdot), p_\varphi\right) \times \left(1 - \|p_x\|^2 u'_n(0)\right) = 0,\ j = 1,\ldots,n \qquad (3.199)$$

Таким чином, $u'(0) = 0$. Оскільки $\Phi''_{j\overline{\varphi}\overline{\varphi}}(\cdot) = 0$, похідною по α від (3.199) буде вираз

$$\left(\Phi''_{jXX}(\cdot)p_x, p_x\right)+\left(\Phi'_{jX}(\cdot),[S_x p_x]u''(0)\right)+2\left(\Phi''_{jX\overline{\varphi}}(\cdot)p_\varphi, p_x\right)-\left(\Phi'_{j\overline{\varphi}}(\cdot), p_\varphi\right)\|p_x \quad (3.200)$$

.

Вважаючи $u''(0)=\begin{bmatrix} u_1'' \\ u_n''(0)\end{bmatrix}$, $u_n''(0)=0$, $\overline{p}_2 = S_x u_1''$ запишемо рівняння (3.200) в матричному вигляді:

$$\Phi'(X_0,\overline{\varphi}_0)\overline{p}_2 = -\begin{bmatrix}\left(\Phi''_{1XX}(\cdot)p_x, p_x\right)\\ \ldots\ldots\ldots\ldots\\ \left(\Phi''_{nXX}(\cdot)p_x, p_x\right)\end{bmatrix}-2\begin{bmatrix}\left(\Phi''_{1X\overline{\varphi}}(\cdot)p_\varphi, p_x\right)\\ \ldots\ldots\ldots\ldots\\ \left(\Phi''_{nX\overline{\varphi}}(\cdot)p_\varphi, p_x\right)\end{bmatrix}. \quad (3.201)$$

Перш ніж розписати похідні від виразів (3.200), введемо позначення для запису третіх похідних. Нехай

$$F_j(\overline{\varphi})=\left(\Phi''_{jXX}(X_0,\overline{\varphi})p_x, p_x\right),$$

$$G_j(X)=\left(\Phi''_{jX\overline{\varphi}}(X,\overline{\varphi}_0)p_\varphi, p_x\right).$$

Тоді $\left(F'_{j\overline{\varphi}}(\overline{\varphi}_0), p_\varphi\right)=\left(G'_{jX}(X_0), p_x\right)$, а похідна по α від (3.200) має вигляд

$$3\left(\Phi''_{jXX}(\cdot)[S_x, p_x]u''(0), p_x\right)+$$

$$+3\left(\Phi''_{jX\overline{\varphi}}(\cdot)p_\varphi, [S_x, p_x]u''(0)\right), \left(1-\|p_x\|^2 u_n'(0)\right)+$$

$$+3\left(F'_{j\overline{\varphi}}(\overline{\varphi}_0), p_\varphi\right)\left(1-\|p_x\|^2 u_n'(0)\right)+\left(\Phi''_{jX}(\cdot),[S_x, p_x]u^{(3)}(0)\right)=0,\ j=1,\ldots,n. \quad (3.202)$$

Вважаючи $u^{(3)}(0)=\begin{bmatrix} u_1^{(3)} \\ u_n^{(3)}(0)\end{bmatrix}$, $u_n^{(3)}(0)=0$, $\overline{p}_3 = S_x u_1^{(3)}$ можна записати рівняння (3.200) в матричному вигляді:

$$\Phi'_X(X_0,\overline{\varphi}_0)\overline{p}_3 = -3\begin{bmatrix}\left(\Phi''_{1XX}(\cdot)p_x, \overline{p}_2\right)\\ \ldots\ldots\ldots\ldots\\ \left(\Phi''_{nXX}(\cdot)p_x, \overline{p}_2\right)\end{bmatrix}-3\begin{bmatrix}\left(\Phi''_{1X\overline{\varphi}}(\cdot)p_\varphi, \overline{p}_2\right)\\ \ldots\ldots\ldots\ldots\\ \left(\Phi''_{nX\overline{\varphi}}(\cdot)p_\varphi, \overline{p}_2\right)\end{bmatrix}-3\begin{bmatrix}\left(F'_{1\overline{\varphi}}(\overline{\varphi}_0), p_\varphi\right)\\ \ldots\ldots\ldots\ldots\\ \left(F'_{n\overline{\varphi}}(\overline{\varphi}_0), p_\varphi\right)\end{bmatrix}. \quad (3.203)$$

Після ще одного диференціювання отримуємо наступне рівняння для вектору $\overline{p}_4=[S_x p_x]u^{(4)}(0)$:

$$\Phi'_X(X_0,\overline{\varphi}_0)\overline{p}_4 = -4\begin{bmatrix}\left(\Phi''_{1XX}(\cdot)\overline{p}_3, \overline{p}_x\right)\\ \ldots\ldots\ldots\ldots\\ \left(\Phi''_{nXX}(\cdot)\overline{p}_3, \overline{p}_x\right)\end{bmatrix}-4\begin{bmatrix}\left(\Phi''_{1X\overline{\varphi}}(\cdot)\overline{p}_\varphi, \overline{p}_3\right)\\ \ldots\ldots\ldots\ldots\\ \left(\Phi''_{nX\overline{\varphi}}(\cdot)\overline{p}_\varphi, \overline{p}_3\right)\end{bmatrix}-$$

$$-3\begin{bmatrix}\left(\Phi''_{1XX}(\cdot)\overline{p}_2, \overline{p}_2\right)\\ \ldots\ldots\ldots\ldots\\ \left(\Phi''_{nXX}(\cdot)\overline{p}_2, \overline{p}_2\right)\end{bmatrix}-12\begin{bmatrix}\left(G''_{1X}(X_0)\overline{p}_2\right)\\ \ldots\ldots\ldots\ldots\\ \left(G''_{nX}(X_0)\overline{p}_2\right)\end{bmatrix}.$$

Таким чином, якщо значення параметрів позначене символом $\overline{\varphi}_0$ знайдено рішення X_0 рівнянь (3.183), (3.184), то подальші дії повинні полягати в наступному.

1. Обчислити якобіан $\Phi'_X(X_0,\overline{\varphi}_0)$ і використовувати один з вибраних способів його розкладання для вирішення лінійних рівнянь, що включають матрицю $\Phi'_X(X_0,\overline{\varphi}_0)$.

2. Після отримання інформації про нові значення параметрів $\overline{\varphi}_1$ вичислити вектор $p_\varphi = (\overline{\varphi}_1 - \overline{\varphi}_0)/\|\overline{\varphi}_1 - \overline{\varphi}_0\|$ і вирішити рівняння $\Phi'_X(X_0,\overline{\varphi}_0)p_x = -\Phi'_{\overline{\varphi}}(X_0,\overline{\varphi}_0)p_\varphi$, відносно p_x.

3. Послідовно вичислити праві частини рівнянь (3.201) - (3.202) і вирішити ці рівняння відносно векторів $\overline{p}_2, \overline{p}_3, \overline{p}_4$.

4. Сформувати криву

$$X(\alpha) = X_0 + \alpha p_x + \frac{1}{2}\alpha^2\overline{p}_2 + \frac{1}{6}\alpha^3\overline{p}_3 + \frac{1}{24}\alpha^4\overline{p}_4$$

і вичислити точку $X_1 = X(\alpha_0)$, $\alpha_0 = \|\overline{\varphi}_1 - \overline{\varphi}_0\|$. Точка X_1 є наближене рішення рівняння

$$\Phi(X,\overline{\varphi}_1) = 0, \qquad (3.204)$$

при цьому для точки $\overline{\varphi}_1$ з досить малого околу точки $\overline{\varphi}_0 \in E^m$ справедлива оцінка

$$\|X_1 - X_*\| \le C = \|\overline{\varphi}_1 - \overline{\varphi}_0\|^5, \qquad (3.205)$$

де точка X_* є точним рішенням рівняння (3.204). З нерівності (3.205) виходить, що при малих значеннях величини $\|\overline{\varphi}_1 - \overline{\varphi}_0\|$ точка X_1 є хорошим наближенням до рішення X_*. Пропонований алгоритм обчислення x_1 може бути використаний для визначення початкового наближення, з якого потрібне починати ітераційний процес рішення рівняння (3.204).

3.1.14 Стратегії поведінки ітераційних методів за умови виродження якобіану

Нехай E^n n- мірний простір Евкліда, а відображення $y = \Phi(x)$ кожній точці $x \in E^n$ ставить у відповідність точку у $y \in E^n$. Завдання ітераційного

методу полягає в побудові такої послідовності точок $\{x_k\}$, щоб в граничних точках x_* цієї послідовності виконувалась рівність $\Phi(x_*)=0$.

Припустимо, що в точці x_k вектор $\Phi(x_k)\neq 0$, а система координат у просторі змінних y вибрана так, що координатна вісь з номером n спрямована уздовж вектору $\hat{O}(x_k)$. Тоді вектор $y=\Phi(x_k)$ має всі координати нульові, крім останньої, тобто $\Phi_n(x_k)\neq 0$, а

$$\Phi_i(x_k)=0, i=1,...,n-1. \qquad (3.206)$$

Переміщати точку x з позиції x_k до чергового наближення бажано так, щоб зберегти ті рівності (3.206), що вже виконуються в x_k. Якщо відображення $x(\alpha)$ є в околу точки x_k параметричним поданням такого багатовиду

$$\{x:\Phi_j(x)=0, i=1,...,n-1\}, \qquad (3.207)$$

то відшукування рішень зводиться до визначення коренів α одного рівняння $\hat{O}_n[x(\alpha)]=0$. Тоді точки $x(\alpha_*)$ будуть рішенням рівнянь $\Phi_i(x)=0, i=1,...,n$,

Тепер викладемо те ж саме трохи інакше. Нехай S - матриця, що складається з $(n-1)$ стовпців, для якої виконується рівність

$$S^*S=I_{n-1}, S^*\Phi(x_k)=0, \qquad (3.208)$$

де I_{n-1} одинична матриця порядку $(n-1)$, а зірочка на місці верхнього індексу означає транспонування.

Тоді стовпці, $s_1,...,s_{n-1}$ матриці S і вектор $s_n=\Phi(x_k)/\|\Phi(x_k)\|$ задають координати, в яких перші $(n-1)$ компонент вектору $\hat{O}(x_k)$ дорівнюють нулю. Щоб переміщати x з позиції x_k зі збереженням умови $S^*\Phi(x)=0$, що вже виконується в x_k, необхідно не покидати багатовид

$$M=\{x:S^*\Phi(x)=0\}. \qquad (3.209)$$

Якщо в точці x_k побудувати параметризацію $x(\alpha_*)$ багатовиду (3.209) і мінімізувати по α функцію $F[x(\alpha)]$, де $F(x)=\frac{1}{2}\|\Phi(x)\|^2$, то отримаємо точки $x_*=x(\alpha_*)$, що є рішенням рівнянь $\Phi(x)=0$.

Тепер відмітимо, що в усіх точках кривої (3.209) вектори $\Phi(x)$ мають один і той же напрям, рівний напряму вектору $\hat{O}(x_k)$. Вектори $\Phi(x)$ на кривій (3.209) змінюються тільки по довжині. Той факт, що в точках $x \in M$ вектори $\Phi(x)$ мають однаковий напрям, задається матрицею S. Проте цю умову можна сформулювати по-іншому. Розглянемо в просторі точок $[xz] \in E^{n+1}$ наступний багатовид:

$$M = \{[xz] : \Phi(x) + z\Phi(x_k)\}. \qquad (3.210)$$

Якщо $z_0 = -1$, то точка $[x_k z_0] \in M$. У просторі змінних x багатовиди (3.209) і (3.210) співпадають, будучи деякою кривою, в усіх точках x якої вектори $\Phi(x)$ паралельні вектору $\hat{O}(x_k)$.

Нехай $[x(\alpha)z(\alpha)]$ - параметризація кривої (3.210). Якщо α_* - таке число, що $z(\alpha_*) = 0$, то $x(\alpha_*)$ є рішенням рівняння $\hat{O}(x) = 0$. Звідси витікає, що побудова чергового наближення може виконуватися шляхом апроксимації кривої $x(\alpha)$ і одиничного кроку по α уздовж цієї апроксимації.

Так, щоб зафіксувати конкретну стратегію побудови чергового наближення, треба вибрати: порядок апроксимації кривих (3.209) або (3.210); засоби лінійної алгебри, використовувані для побудови апроксимації кривої $x(\alpha)$; спосіб одновимірної мінімізації.

Відмітимо, що лінійна апроксимація кривої (3.209) або (3.210) приведе до одного з варіантів методу Ньютона, оскільки дотична до кривої $x(\alpha)$ співпадає з ньютонівським напрямом. Ясно також, що для побудови апроксимації потрібно невиродженість якобіану, через що у разі його виродженості стратегія вибору чергового наближення міняється. Реалізація такої стратегії залежить від вибраних засобів лінійної алгебри, використовуваних для факторизації якобіана, оскільки визначення рангу матриці здійснюється в кожному розкладанні по-своєму.

Стратегії поведінки наведених нижче ітераційних методів орієнтовані на випадки виродження якобіана в точках x_k, де $\Phi(x_k) \neq 0$.

3.2 Дослідження методів прискорення моделювання режимів роботи великих ЕЕС

У електротехніці відомі два широко використовуваних основних методів розрахунку режимів роботи складних електричних мереж: вузлових потенціалів і контурних струмів. Зазначені методи відрізняються способом формування систем нелінійних рівнянь, що описують режими роботи ЕМ.

Нині більшість промислових комплексів розрахунку і аналізу усталених режимів і перехідних процесів складних ЕМ заснована на використанні методу вузлових потенціалів, схем автоматизації розрахунків ньютонівського типу з побудовою відповідних матриць провідності і Якобі.

Аналіз публікацій з питань розрахунку режимів роботи великих електроенергетичних систем (ЕЕС) показав, що наразі не існує надійних методів, що гарантують збіжність і високу швидкодію розрахунку систем нелінійних рівнянь, які описують режими роботи таких ЕЕС. Тому дослідження параметрів, що впливають на збіжність ітераційних процесів рішення систем нелінійних рівнянь, є дуже актуальним завданням моделювання режимів роботи великих ЕЕС.

У роботі розглянуто алгоритм методу розрахунку струмів контурів (МРСК) ЕМ великої розмірності за допомогою контурної розрахункової моделі.

Питанням дослідження і практичного застосування алгоритму МРСК для розрахунку режимів роботи великих ЕЕС присвячена велика кількість досліджень і публікацій. У роботі [239] викладені три порівняно універсальних методу розрахунку режимів, в основу яких покладено використання коефіцієнтів розподілу, опорів впливу і розрізання контурів для приведення замкнутої мережі до еквівалентної розімкненої.

МРСК в порівнянні з методом розрахунку вузлових потенціалів дозволяє значно скоротити число рівнянь системи, що описують довільну електричну мережу. До недоліків МРСК можна віднести лише деяку складність реалізації алгоритмів побудови системи автоматизації розрахунків.

У загальному вигляді число контурів N_k довільної електричної мережі може бути обчислено за формулою:

$$N_k = N_i - N_s + N_o ,$$

де N_i - кількість гілок (ребер); N_s - кількість вузлів навантажень; N_o - кількість вузлів (вершин графа) з відомою (опорною/заданою) напругою.

Алгоритми і методи розрахунків режимів мереж базуються на низці важливих допущень, які необхідно тут відмітити. Як початкові параметри електричної мережі використовуються так звані заступні схеми елементів ЕМ, до яких відносяться лінії електропередачі (ЛЕП), трансформатори, генератори, навантаження вузлів тощо. В якості початкової інформації мають бути задані конфігурація мережі (список вузлів і перелік гілок - ЛЕП, трансформаторів, вимикачів і тому подібне), хоч би одна опорна (задана/відома) напруга у балансуючому вузлі, параметри ліній електропередачі (як правило, використовуються П-подібні схеми) і трансформаторів (використовуються Г-подібні схеми).

Задана генерація (нерегульована) може бути представлена у вигляді постійної величини $\dot{S}_{гзад} = -P_i + jQ_i$, потужність у вузлах навантажень - $\dot{S}_{нзад} = P - jQ_i$. При розрахунку навантаження враховуються статичні характеристики по напрузі у вигляді поліномів.

Значення напруги і струмів у вузлах електричної мережі, частота змінного струму, потужності генераторів і споживачів електричної енергії називають параметрами режиму і є метою моделювання режимів ЕМ. Залежно від постановки і цілей завдання розрахунку режимів використовуються різні допущення, наприклад, поєднання балансуючого і одного з опорних вузлів, тип заступної схеми тощо.

Розрахунок режиму, як правило, складається з двох основних розрахункових модулів: попередніх обчислень і ітераційного розрахунку режиму.

На першому етапі будують модель схеми автоматизації розрахунків на базі

заданої конфігурації електричної мережі. У розрахунковій заступній схемі електричної мережі виділяють незалежні контури (хорди) і дерева, використовуючи відповідні автоматичні алгоритм. Основна ідея методу розрізання контурів полягає в еквівалентній заміні початкової замкнутої електричної мережі на розімкнену, режим якої повністю співпадає з режимом початкової мережі.

До складу кожного незалежного контуру входить тільки одна хорда. Усі інші замкнуті контури є залежними і можуть бути отримані шляхом перекомпонування незалежних контурів. Додатнім напрямом обходу контуру приймається напрям, який відповідає позитивному напряму відповідної хорди, - від початкового вузла гілки до кінцевого вузла.

Варіанти розділення схеми на дерево і хорди електричної мережі є умовними і залежать від заданої в початкових даних послідовності номерів вузлів і гілок. До складу переліку попередніх обчислень входить також визначення так званої поперечної провідності вузлів, утворених ЛЕП, трансформаторами і реакторами (шунтами).

Ітераційний розрахунок режиму, у свою чергу, теж складається з двох етапів: внутрішнього (ВНІП) і зовнішнього (ЗОІП). Для розрахунку режимів електричних мереж використовуємо підхід, заснований на еквівалентній заміні струмів усіх хорд схеми електричної мережі на пари фіктивних струмів у вузлах, до яких примикає ця хорда. Наприклад, для *i*-го вузла:

$$\dot{I}_i^{(i)} = \dot{S}_{i3za} \Big/ \hat{U}_i^{(i)} - |U|_i^{(i)2} \cdot \dot{Y}_{io} \pm \sum_{k=1}^{K} \dot{I}_{xk}^{(i)} , \qquad (3.211)$$

де $\dot{I}_i^{(i)}$ - струм *i* -го вузла на *i*-ї ітерації; $\dot{S}_{iзад}$ - задана потужність *i* -го вузла; $\widehat{U}_i^{(i)}$ - зв'язана напруга *i* -го вузла на *i*-ї ітерації; $|U|_i^{(i)2}$ - квадрат модуля напруги *i*-го вузла на *i*-ї ітерації; $\dot{Y}_{i0}$ - сума поперечної заданої провідності від прилеглих ЛЕП, трансформаторів і шунтів; $\sum_{\kappa=1}^{\kappa=K} \dot{I}_{x\kappa}^{(i)}$ – алгебраїчна сума струмів прилеглих *к*-х хорд на *i*-ї ітерації.

Різниця векторів напруги в цих вузлах в розімкненій схемі мережі

дорівнює падінню напруги на цій хорді:

$$\Delta\dot{U}_{ij} = \dot{U}_i - \dot{U}_j = \dot{I}_{ij} Z_{ij}, \tag{3.212}$$

де $\dot{U}_i$ - напруга i -го вузла хорди; $\dot{U}_j$ - напруга j -го вузла хорди; $\dot{I}_{ij}$ - струм хорди; Z_{ij} - опір хорди.

Алгоритм визначення режимних параметрів методом розрізання контурів полягає в наступному:

1. Формується розрахункова схема електричної мережі і будується модель автоматизації розрахунків.

2. У схемі електричної мережі для кожного k -го незалежного контуру обчислюємо власну провідність.

3. Вважаємо, що на 0-й ітерації напруги у вузлах мережі, окрім балансуючого, дорівнюють номінальній напрузі, а струми усіх хорд дорівнюють нулю:

$$\dot{U}_i = \dot{U}_{ном}, \tag{3.213}$$

$$\dot{I}_{xk}^{(0)} = 0, \tag{3.214}$$

$$\dot{I}_i^{(0)} = \dot{S}_{iзза} \Big/ \hat{U}_i^{(0)} - |U|_i^{(0)2} \cdot \dot{Y}_{io}, \tag{3.215}$$

$$\Delta\dot{S}_i^{(0)} = \dot{S}_{iзза}, \tag{3.216}$$

де i - індекс поточного незалежного вузла розрахункової схеми; k - індекс поточної хорди; $\dot{I}_k^{(0)}$ - струм k-ї хорди на 0-й ітерації; $\dot{I}_i^{(0)}$ - струм i -го вузла на 0-й ітерації; $\dot{S}_{iзад}$ - задана потужність i -го вузла; $\hat{U}_i^{(0)}$ - зв'язана напруга i -го вузла на 0-й ітерації; $\Delta\dot{S}_i^{(0)}$ - відхил потужності на 0-й ітерації.

4. Використовуючи поточні значення напруги вузлів мережі і струмів хорд, визначаємо значення струмів вузлів розрахункової схеми. Струми вузлів, до яких примикають хорди, складаються із струмів розрахункових навантажень цих вузлів і алгебраїчної суми струмів приєднаних хорд:

$$\begin{aligned} \dot{I}_i^{(i+1)} &= \dot{I}_i^{(i)} + k_2 \left(\dot{S}_{iзза} - \dot{S}_i^{(i)} \right) \Big/ \hat{U}_i^{(i)} \pm \sum \dot{I}_{xk}^{(i)} = \\ &= \dot{I}_i^{(i)} + k_2 \left(\Delta\dot{S}_i^{(i)} \right) \Big/ \hat{U}_i^{(i)} \pm \sum \dot{I}_{xk}^{(i)}, \end{aligned} \tag{3.217}$$

де *k2* - коефіцієнт прискорення зовнішнього ітераційного процесу; $\dot{S}_{iзад}$ - задана потужність *i* -го вузла; $\dot{S}_i^{(i)}$ - розрахункова потужність навантаження *i* - го вузла схеми на *i*-ї ітерації; $\widehat{U}_i^{(i)}$ - зв'язаний комплекс вектору напруги *i* -го вузла схеми на *i*-ї ітерації; $\Delta\dot{S}_i^{(i)}$ - відхил потужності *i* -го вузла схеми на *i*-ї ітерації; $\dot{I}_{xk}^{(i)}$ - струм *к*-ї хорди, прилеглої до *i*-го вузла.

Комплексне значення струму $\dot{I}_i = I_i^{'} + jI_i^{''}$ для *i*-го вузла (3.216) можна легко записати для дійсної $I_i^{'}$ і уявної частин $I_i^{''}$.

Нехай $\Delta\dot{S}_i^{(i)} = \Delta S_i^{'(i)} + j\Delta S_i^{''(i)}$, $\widehat{U}_i^{(i)} = U_i^{'(i)} - jU_i^{''(i)}$, $\dot{I}_{xk}^{(i)} = I_{xk}^{'(i)} + jI_{xk}^{''(i)}$. Тоді (3.217) можна розділити на два рівняння (3.218) і (3.219) з дійсними числами.

$$I_i^{'(i+1)} = I_i^{'(i)} + t1 \div \left(U_i^{'(i)} \cdot \Delta S_i^{'(i)} - U_i^{''(i)} \cdot \Delta S_i^{''(i)} \Big/ |U|_i^2\right) \pm \sum I_{xk}^{'(i)} \quad (3.218)$$

$$I_i^{''(i+1)} = I_i^{''(i)} + t1 \div \left(U_i^{''(i)} \cdot \Delta S_i^{'(i)} + U_i^{'(i)} \cdot \Delta S_i^{''(i)} \Big/ |U|_i^2\right) \pm \sum I_{xk}^{''(i)} \quad (3.219)$$

Якщо для усіх вузлів величини відхилів потужності не перевищують задану величину точності розрахунків по потужності, то передають управління до п.9.

5. Скануючи схему електричної мережі в напрямі від вузлів нижніх ярусів до кореня дерева схеми із заданою (опорною) напругою, на підставі 1-го закону Кірхгофа, визначаємо струми гілок дерева - розімкненій частині схеми, з якої були видалені хорди.

6. Визначаємо значення напруги у вузлах схеми в напрямі від вузла з відомою напругою до найбільш віддалених вузлів.

7. Перевіряємо наявність контурів в схемі. Якщо контур є, то передають управління до п.8, якщо ні, то до п.4.

8. Для кожної *к*-ї хорди визначаємо величину струму *к*-ї хорди:

$$\dot{I}_{xk}^{(i+1)} = \dot{I}_{xk}^{(i)} + k1 \cdot \left(\frac{\dot{U}_i^{(I)} - \dot{U}_j^{(I)} - \dot{I}_{ij}^{(i)} \cdot Z_{ij}}{Z_{xk}} \right) = \dot{I}_{xk}^{(i)} + k1 \cdot \Delta\dot{U}_{ij} \cdot \dot{Y}_{xk} \quad (3.220)$$

де Z_{xk} - власний опір *k* -го контуру; k1 - коефіцієнт прискорення внутрішнього ітераційного процесу (ВНУП).

Якщо для усіх хорд величини відхилів напруги $|\Delta U|_{ij}^{(i)}$ не перевищують задану величину точності розрахунків по напрузі ε_u:

$$max\{ |\Delta U|_{ij}^{(i)} \} \le \varepsilon_u, \quad (3.221)$$

то поточний режим розімкненої схеми слід вважати повністю еквівалентним режиму початкової замкнутої ЕМ. У цьому випадку управління передають до п. 9 алгоритму. Інакше виконують п. 4.

9. Закінчення розрахунку, запис у базу даних і аналіз результатів розрахунку.

Якщо в мережі немає контурів, то пункт 7 не виконуємо.

Алгоритм визначення оптимальних значень коефіцієнтів прискорення ітераційних процесів формується наступним чином.

Окрім цього, розроблено новий алгоритм визначення оптимальних значень коефіцієнтів прискорення ітераційних процесів розрахунку режимів роботи ЕМ за допомогою запропонованого багатоопорного методу розрахунку струмів контурів.

Досліджені найбільш важливі фактори впливу (коефіцієнти прискорення) на збіжність та швидкість ітераційних методів моделювання режимів роботи великих ЕЕС.

В роботі розглянуто низку прикладів, у яких досліджується вплив трьох важливих факторів: коефіцієнта прискорення внутрішнього ітераційного процесу K_1, який сприяє приведенню ЕМ до замкнутого виду та знаходиться у діапазоні від 0 до 1, коефіцієнта прискорення зовнішнього ітераційного процесу K_2, який сприяє уточненню струмів вузлів і знаходиться у діапазоні від 0 до 1, та кількість ітерацій внутрішнього ітераційного процесу K_3, який

може знаходитися у діапазоні від 5 – 75, на цільову функцію Y у вигляді кількості ітерацій розрахунку режимів роботи великої кількості тестових електричних мережі із об'ємами від 14 до 15000 вузлів.

Запропоновано використати планування за схемою повного факторного експерименту (ПФЕ), який реалізує всі можливі комбінації факторів на всіх обраних для дослідження рівнях. Необхідна кількість дослідів N у випадку, коли змінні варіюються на двох рівнях, визначається наступним чином:

$$N = 2^k,$$

де k – кількість факторів.

Рівні факторів являють собою межі досліджуваної області за даним параметром.

Перехід від системи координат k_1, k_2, k_3 до нової безрозмірної системи координат x_1, x_2, x_3 виконано шляхом лінійного перетворення координат:

$$x_j = \frac{k_j - k_j^0}{\Delta k_j}, \qquad j = \overline{1,3};$$

де $k_j^0 = \frac{k_j^{\max} + k_j^{\min}}{2}$ – основний рівень фактору k_j, $\Delta z_j = \frac{k_j^{\max} - k_j^{\min}}{2}$ – інтервал варіювання, $k_j^{\max}$ та $k_j^{\min}$ – відповідно верхній та нижній рівні фактору k_j.

Апріорний аналіз функцій відгуку показав, що зміну кількості ітерацій Y доцільно описати рівнянням регресії наступного виду:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + \\ + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3. \qquad (3.222)$$

Коефіцієнти рівняння регресії (3.222) у загальному вигляді визначаються за методом найменших квадратів наступним чином:

$$B = \left(X^T X\right)^{-1} X^T Y$$

Отже, будь-який коефіцієнт рівняння регресії b_j визначається скалярним добутком стовпця y на відповідний стовпець x_j, поділений на кількість дослідів у матриці планування експериментів N:

$$b_j = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_{ji} y_i \ .$$

Ефект взаємодії визначається аналогічно лінійним ефектам. Так, розрахунок b_{ji} виконується за формулою:

$$bij = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \left(x_j x_i\right)_i y_i \ .$$

Аналогічно обчислюються інші коефіцієнти рівняння регресії.

В Таблиця 3.1 наведена структура плану ПФЕ для тестової ЕМ із 14 вузлів, відомою в літературі під назвою 14-bus TEST IEEE.

Користуючись наведеними в Таблиця 3.1 даними, можна знайти такі коефіцієнти рівняння регресії

$$\hat{y} = 22.125 + 1.375x_1 - 1.375x_2 - 7.125x_3 + \\ + 2.375x_1x_2 - 1.875x_1x_3 - 3.125x_2x_3 - 2.375x_1x_2x_3$$

Таблиця 3.1

План ПФЕ для тестової ЕМ із 14 вузлів

№ досліду	Фактори у натуральному масштабі			Фактори у безрозмірній системі координат			Y (кількість ітерацій)
	k_1	k_2	k_3	x_1	x_2	x_3	
1	0.3	0.5	5	-1	-1	-1	29
2	0.7	0.5	5	+1	-1	-1	26
3	0.3	0.9	5	-1	+1	-1	23
4	0.7	0.9	5	+1	+1	-1	39
5	0.3	0.5	25	-1	-1	+1	20
6	0.7	0.5	25	+1	-1	+1	19
7	0.3	0.9	25	-1	+1	+1	11
8	0.7	0.9	25	+1	+1	+1	10

Середнє квадратичне відхилення σ експериментальних Y і розрахункових $\hat{y}$ значень становить $1{,}34 \cdot 10^{-16}$. Таким чином, рівняння регресії з достатнім ступенем точності описує тестову ЕМ. Поверхня відгуку знайденого рівняння показана на Рис. 3.8.

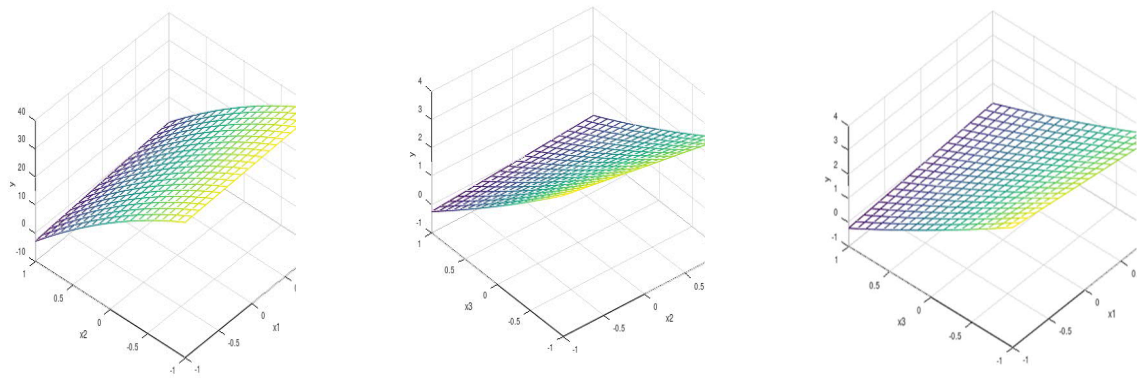


Рис. 3.8. Поверхня відгуку тестової ЕМ IEEE TEST із 14 вузлів

Мінімальна кількість ітерацій з урахуванням обмежень становить $\hat{y}_{min}$=19 при k_1=0.7, k_2=0.06, k_3=21.48.

Збільшення кількості вузлів до 870, гілок – до 1041, контурів – до 196 і дерев до 845 при середньому навантаженні не змінює порядок середньої квадратичної похибки: σ = 3,24·10^{-16}, але мінімальна кількість ітерацій збільшується до 264.

Рівняння регресії має вигляд:

$$\hat{y} = 204.38 + 10.62x_1 - 69.12x_2 + 7.12x_3 + \\ + 7.12x_1x_2 + 2.88x_1x_3 + 4.62x_2x_3 + 5.38x_1x_2x_3.$$

Пошук мінімуму функції Y виконано симплексним методом.

Якщо за показник якості обрати час розрахунку схеми, то мінімальний час з урахуванням обмежень становитиме 1,3 секунди при k_1=0.3, k_2=0.21, k_3=16.

$$\hat{y} = 1.63 - 0.13x_1 - 0.41x_2 + 0.12x_3 + \\ + 0.17x_1x_2 + 0.17x_1x_3 + 0.1x_2x_3 - 0.2x_1x_2x_3.$$

Використання ПФЕ дозволяє забезпечити оптимальні швидкісні характеристики не тільки багатоопорного методу розрахунку струмів контурів, а і методу Ньютона-Рафсона.

В Таблиця 3.2 наведена порівняльна таблиця досліджуваних методів моделювання режимів робот великих ЕЕС. Розрахунки режимів виконувалися з використанням чотирипроцесорних серверів HPE Proliant DL580 Gen10 із

процесорами типу Xeon14C 2.2GHz(19,25Mb) і оперативною пам’яттю DDR4-2666 ECC Reg.

Таблиця 3.2

Порівняльна таблиця досліджуваних методів

№	Найменування ЕЕС	Кількість вузлів ЕМ	Кількість контурів ЕМ	Час розрахунку, сек.			
				Локальне середовище		Розподілене середовище	
				Метод Ньютона-Рафсона	БОМ розрахунку струмів контурів	Метод Ньютона-Рафсона	БОМ розрахунку струмів контурів
1	Західна	2010	617	1.023	0.311	0.211	0.131
2	Південно Західна	1804	303	0.905	0.315	0.301	0.127
3	Південна	1506	356	0.801	0.243	0.154	0.065
4	Центральна	2503	471	1.084	0.312	0.231	0.099
5	Північна	5007	905	1.326	0.431	0.324	0.107
6	Кримська	1650	383	0.852	0.274	0.256	0.093
7	Донбаська	2118	475	0.954	0.312	0.197	0.089
8	ОЕС України	3158	628	2.671	1.191	0.354	0.959

3.3 Багатоопорний метод розрахунку контурних струмів для веб-орієнтованих тренажерних систем

Завдання моделювання режимів роботи ЕЕС є NP - важкими, містять величезне число невідомих і обмежень, і тому вони довго вирішувані.

Для оцінки алгоритмічної складності алгоритму зазвичай використовується асимптотична поведінка функції. Функція f(n), що оцінює алгоритмічну складність записується за допомогою нотації Ландау:

$$f(n) = O(g(n)),$$

де n - кількість вхідних елементів, а g(n) - функція, до якої асимптотично наближається $C \cdot f(x)$ при $n \to \infty$, де C = const.

С точки зору оцінки складності, алгоритм можна умовно поділити на дві частини: поділ графу на дерева і прохід по деревам.

Оскільки ці частини виконуються послідовно, загальна функція складності становитиме суму складності частин:

$$f_{\text{загальна}} = f_{\text{поділу}}(x) + f_{\text{проходів}}(x).$$

Існує значна кількість алгоритмів розбиття графів на дерева, проте вони базуються на двох основних методах обходу графів: “в ширину” та “в глибину”. В роботі використовується варіант метода “в ширину”, тому:

$$f_{\text{розбиття}}\left(n_{\text{вузлів}}, n_{\text{вершин}}\right) = O\left(n_{\text{вузлів}} + C_0 \cdot n_{\text{вершин}}\right)$$

$$f_{\text{проходів}}\left(n_{\text{вузлів}}, n_{\text{хорд}}, n_{\text{дерев}}\right) = O\left(\mathrm{C}_1 \cdot n_{\text{вузлів}} + C_2 \cdot n_{\text{хорд}} + C_3 \cdot n_{\text{дерев}}\right).$$

Проте, при програмній реалізації така оцінка є малоефективною, тому що інструкції будь-якою мовою програмування не транслюються в абсолютній відповідності у машинний код. Усі сучасні компілятори мають вбудовані алгоритми оптимізації, що змінюють сирцевий код мов програмування при компіляції. Навіть для однієї й тієї ж мови програмування, машинний код може суттєво відрізнятись в залежності від компілятора. Гарним прикладом є три найпопулярніші компілятори для мови C, що конкурують між собою та генерують різний код: Clang (MacOS), GCC (Linux) та VC (Windows).

Наприклад, потрібно діагоналізувати наступну матрицю (A) за допомогою методу Гауса:

$$A = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 2 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 1 & 2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 2 \end{bmatrix}$$

Алгоритмічна складність такого алгоритму оцінюється як $O(n^3)$, проте наївна реалізація методу з додаванням цілочисельних добутків рядків матриці між собою без ділення та лише діагональними елементами як ведучими призведе до експоненційного зростання бітової складності (бітову складність отримуємо як О велике функції атомарних операцій від кількості бітів), а саме до зростання за формулою $\sum_{k=0}^{n} 2^{2^{k-1}}$.

Якщо ж застосувати метод Монтанте (варіацію методу Гауса, що також оперує цілими числами), який так само має кубічну теоретичну алгоритмічну складність, на практиці його бітова складність складатиме $O(n^5)$.

До того ж, архітектура окремого процесора визначає різні швидкості для різних побітових операцій, що впливатиме на реальний час роботи алгоритму. Наприклад, швидкість виконання операції зсуву на різних процесорах може відрізнятися до 8 разів.

Часткова векторизація за рахунок технології багатонитковості також може змінювати результати, в залежності від процесору. Ступінь векторизації визначається в тому числі обраним методом розбиття графу на дерева, наприклад, метод “в глибину” набагато важче векторизувати ніж метод “в ширину”.

Сучасні процесори також намагаються зробити передбачення, роблячи частину обчислень наперед. Іноді це призводить до пришвидшення виконання алгоритму, а іноді до уповільнення. Це неможливо передбачити наперед, проте ця особливість надає перевагу алгоритмам, що не містять умовних операторів (if/else). Навіть якщо бітова складність алгоритму з умовами є низькою, на практиці він може виконуватись повільніше за алгоритм, що має більшу бітову складність проте не містить умов.

Через зазначені причини, на етапі реалізації алгоритму не рекомендується розраховувати на вищезгадану оцінку складності, а натомість використовувати агреговані часові результати конкретної імплементації, зібрані з підмножини обчислювальних машин, на яких виконуватиметься алгоритм.

Математичні моделі для розрахунку режимів ЕЕС можуть бути представлені у вигляді великих систем нелінійних рівнянь, окремі підсистеми яких зазвичай слабо пов'язані між собою, причому, таких підсистем буває досить багато [9, 24, 26, 28, 56, 136, 153, 187- 189, 248 - 260].

Одним з можливих підходів для вирішення таких завдань є розділення загальної системи на частини. У зв'язку з цим особливу актуальність

набувають декомпозиційні підходи - способи розбиття великих систем на підсистеми [16, 29, 53, 54, 60, 63].

Взагалі існує два основних методу розрахунку режимів роботи електричних мереж: метод вузлових потенціалів і метод контурних токів. У [130] цей метод названо методом розрізання контурів. Нині добре вивчені недоліки і переваги обох методів.

Важливою особливістю БОМ РКС є те, що для розрахунку режиму довільної електричної мережі завжди використовується тільки одне автоматично виділене дерево мережі без контурів і з одним джерелом енергії в якості балансуючого активну і реактивну потужність вузлів цього дерева і інших зв’язаних з ним довільних дерев (Рис 3. **9**).

Струми хорд заміняються двома струмами прилеглих вузлів відповідної гілки: із знаком плюс додається до одного вузла хорди і мінус – до другого. У моделях автоматизації моделювання можуть існувати хорди двох типів. Ті, що утворюють незалежні контури в окремих деревах, - будемо називати їх нормальними хордами, і хорди, які об’єднують різні дерева, які будемо називати виродженими. Останні об’єднують джерела енергії в різних деревах. В якості таких хорд можуть бути лінії електропередачі, трансформатори і вимикачі. Для всіх гілок застосовується закон Ома.

У матричному вигляді режим роботи дерева мережі можна представити таким чином:

$$\left[\dot{U}_s\right]=\left[\dot{Y}_{ss}\right]^{-1}\cdot\left[\dot{J}_s\right]. \qquad (3.223)$$

Напруга вузлів $\left[\dot{U}_s\right]$ для відомих струмів вузлів $\left[\dot{J}_s\right]$ може розраховуватися шляхом множення оберненої матриці провідності $\left[\dot{Y}_{ss}\right]^{-1}$ на заданий вектор - стовпець струмів вузлів.

Для дерева частіше зручніше і простіше, коли струми гілок визначаються шляхом згортки струмів від нижніх ярусів (розрахунок струморозподілу - від нижніх до верхніх ярусів визначення струмів гілок) і

подальшим розрахунком напруги вузлів – від вузла з відомою напругою верхнього ярусу до вузлів нижнього ярусу.

Важливою особливістю реалізації методу БОМ РКС є використання розробленої автором нової універсальної схеми автоматизації розрахунків у вигляді системи впорядкованих класів адрес вузлів і гілок дерева по ярусах "вшир", але на відміну від існуючих схем автоматизації, кожен вузол має тільки одну гілку, що живить (струмом або потужністю) цей вузол.

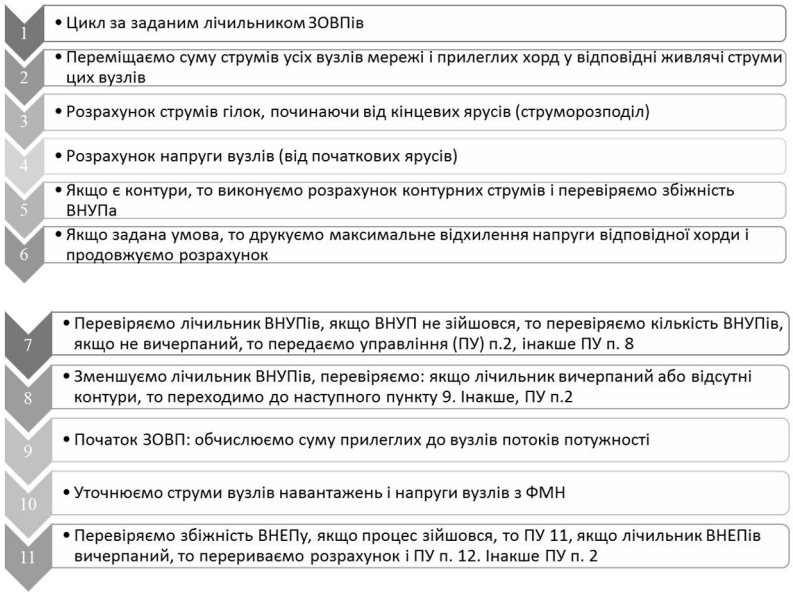
Рис 3. 9. Ілюстрація БОМ РКС на прикладі 7 вузлової електричної мережі і структура матриці Якобі

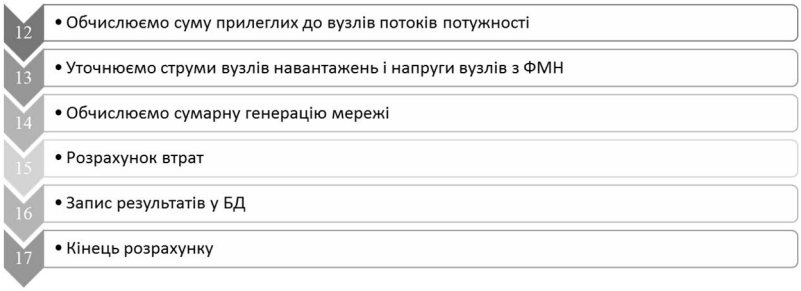
Також необхідно відмітити, що адреса кожного вузла і гілки загальної схеми стає складеною і завжди однозначно визначається, окрім їх номерів, IP-адресом комп'ютера, ім'ям БД (SID), ім'ям користувача БД і паролем для читання або запису результатів моделювання.

Моделюючий комплекс складається з двох частин: попередніх обчислень і розрахунку режиму. У розрахунку режиму використовується два цикли: ВНУП - внутрішній ітераційний процес, на якому розімкнена мережа перетворюється до замкнутого початкового виду, і ЗОВП – зовнішній – для уточнення струмів вузлів.

У разі зміни конфігурації мережі, а також навантаження або генерації вузлів використовується алгоритм попередніх обчислень:

Алгоритм розрахунку режиму БОМ РКС має наступний вигляд:





Приведений вище алгоритм багатоопорного методу розрахунку контурних струмів був використаний для створення двох програмних комплексів на мовах високого рівня - Java для промислового варіанту використання (приблизно 9 тисяч рядків коду) і Python (близько 15 тисяч рядків) – для дослідницьких цілей.

Застосування Python обумовлене необхідністю подальших чисельних досліджень проблеми гарантії збіжності ітераційних методів моделювання нормальних і аварійних режимів роботи великих ЕЕС, пошуку і розробки нових методів їх моделювання. Важливою перевагою Python є дуже великий набір вже існуючих пакетів прикладних програм і бібліотек для наукових чисельних досліджень і візуалізації результатів моделювання, недоліком - робота в режимі інтерпретатора.

На відміну від класичного способу застосування програмних комплексів з початковими даними файлової структури, розташованих тільки на одному ПК, передбачена можливість використання програм моделювання на будь-яких віддалених ПК з використанням також віддалених БД для зберігання результатів. Для вибору потрібних для розрахунку таблиць з початковими даними, розташованих на окремій БД, використовується спеціальне діалогове вікно (Connection Dialog), приведене на Рис 3.10.

В якості основної робочої БД для зберігання результатів моделювання режимів використовується ORACLE, хоча також є доступний варіант реалізації з використанням об'єктно-реляційної БД PostgreSQL. Передбачена можливість для вбудовування у БД моделюючого програмного комплексу у вигляді вбудованої процедури на Java. Це збільшує швидкість реакції тренажерної системи на асинхронні збурення в електричних мережах в процесі

тренажерного заняття. Запуск процедури розрахунку режиму зініціюється завжди у разі будь-якої зміни конфігурації або заданих параметрів розрахункової схеми ЕЕС. Контроль збіжності і аналіз ітераційного процесу розрахунку режиму здійснюється візуально (Рис. 3.11).

Розроблені програмні комплекси можуть використовуватися для моделювання великих ЕЕС та ЕО, що містять більше 20 тисяч вузлів, мають гнучкий зручний інтерфейс і орієнтовані на використання розподілених реляційних БД для зберігання інформації про параметри енергетичного обладнання і режимів роботи окремих адміністративно-територіальних електроенергетичних підприємств, паралельно працюючих у складі ОЕС України.

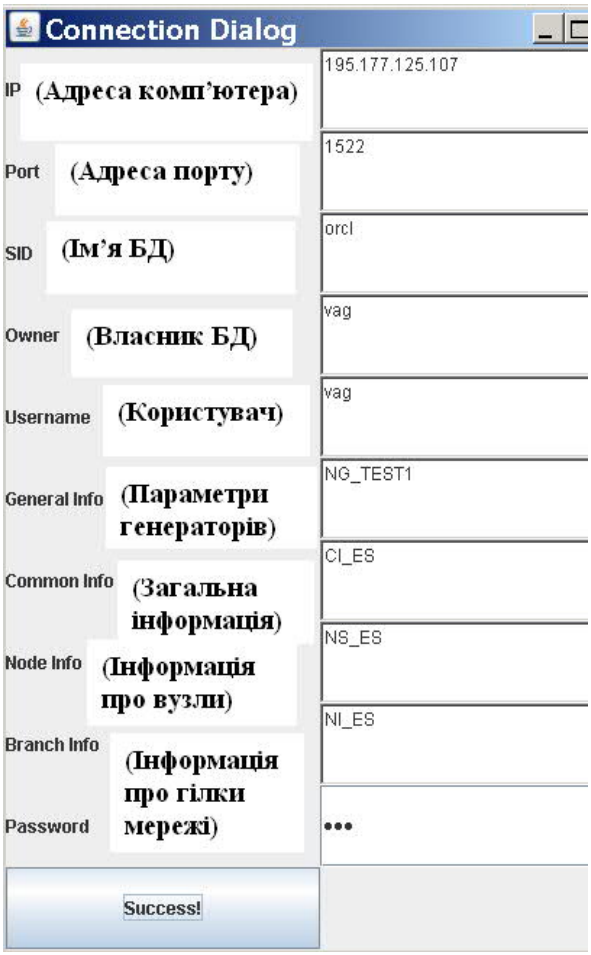


Рис 3.10. Приклад вікна діалогу з автономним моделюючим комплексом

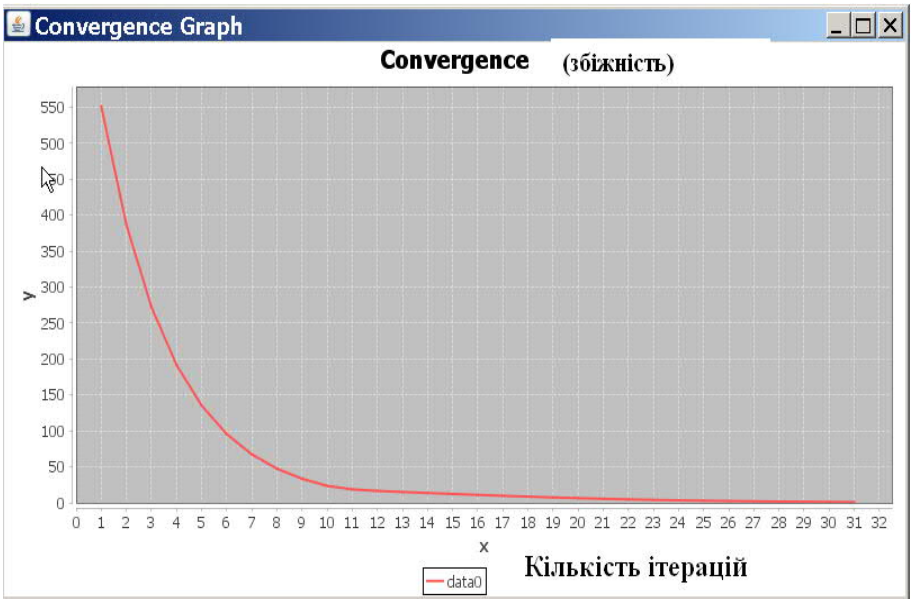


Рис. 3.11. Приклад графічного аналізу збіжності ітераційного процесу

Як приклад, на Рис. 3.12 приведена в табличному вигляді частина інформації про параметри вузлів заступних схем електричних мереж Центральної ЕЕС ОЕС України. Передбачена можливість редагування інформації про вузли і гілки схеми за допомогою будь-якого доступного браузеру (FireFox, Google Chrome, Internet Explorer, Safari та інші).

CI NI NS NG Elements Training Rules Training Process D2 User: jk;
Page: <-- 1 2 3 4 5 6 7 8 --> Count: 50 / 354

ID	scheme_id	fk_table_name	FK_ID	Work column	Type	Tpl	Element Name
482	Demo			pk	value_arrow		ЧАЕС750 - ХАЕС750
500	Demo			PN	value_arrow		ХАЕС330 - Шепетівка
511	Demo			PK	value_arrow		Вінниця - ЛадТЕС
561	Demo			PN	value_arrow		ДнсГЕС - Кам. Подільськ
601	Demo				switcher	switcher	РАЕС750 - Київська-750
602	Demo			PN	value_arrow		РАЕС750 - Київська-750
603	Demo			PK	value_arrow		РАЕС750 - Київська-750
605	Demo			PNS	complex		Северн1
644	Demo	NG_ES	9808	U0	value2		
721	Demo	NG_ES	9809	N0	value2		
447	Demo			NIVKL	switcher	switcher	РАЕС750 - РАЕС330
7	Demo			MOD_U_NS	TEXT		ЧАЕС 330
190	Demo			PNS	complex		Київська750
191	Demo				switcher	switcher	Тернопіль - БуТЕС-330
308	Комутатор			ЧД НЕК	static	commutator_item	
315	Комутатор				text		
384	Demo				switcher	switcher	РАЕС330 - ТГ2РАЕС

Рис. 3.12. Приклад фрагмента графічного редактора для візуалізації результатів моделювання

На Рис. 3.13 і Рис. 3.14 наведені приклади для редагування інформації в таблицях БД Oracle з використанням браузеру FireFox.

CI NI NS NG Elements Training Rules Training Process D2 User: jk;
Page: <-- 1 2 --> Count: 50 / 69

ID	ATR_LINE	Name	RL	XL	KT_1	KT_2	N_1	N_2	GL	BL	NNV_ID	NKV_ID	NNV
25	l	РІВНЕ - РАЕС330	3.59	30.56	1	0	0	0	0	0	901	902	901
62	t	Вінниця-750 - Вінниця-330	.95	54.1	2.1695	.0386	0	0	0	0	827	826	827
67	l	Крем. ГЕС - ДніпроГЕС1	8.57	56.6	1	0	0	0	0	0	328	9308	328
2	t	ПУ АЕС-750 - ПУ АЕС-330	.73	56.81	2.2163	-.1044	0	0	0	0	599	520	599
33	l	ПУ АЕС-750 - Вінниця-750	5.36	90.57	1	0	0	0	0	0	599	827	599
31	l	Вінниця-750 - Київська-750	2.6	55.38	1	0	0	0	0	0	827	772	827
32	l	ЗУ750 - Вінниця750	6.41	106.1	1	0	0	0	0	0	945	827	945
52	l	Лісна - Житомир	3.51	23.63	1	0	0	0	0	0	729	712	729
51	l	ЧАЕС330 - ЛІСНА	6.46	43.5	1	0	0	0	0	0	727	729	727
53	l	ПУ АЕС-330 - Побужжя	2.98	25.79	1	0	0	0	0	0	520	344	520
55	l	ТІТТЕС - Біла Церква	3.46	23.29	1	0	0	0	0	0	720	710	720
44	l	Вінниця - БАР	3.26	22.28	1	0	0	0	0	0	801	818	801
34	l	Вінниця - ЛадТЕС	3.06	26.36	1	0	0	0	0	0	801	822	801
45	l	ДнсГЕС - Кам. Подільськ	3.53	24.09	1	0	0	0	0	0	805	828	805
38	l	Днс ГЕС - Днс ГАЕС	.87	7.57	1	0	0	0	0	0	805	851	805
41	l	Хмельницький - Тернопіль	3.62	31.2	1	0	0	0	0	0	810	813	810
42	l	Тернопіль - БуТЕС-330	2.96	25.7	1	0	0	0	0	0	813	907	813
46	l	Чернівці - Кам. Подольськ	4.96	27.34	1	0	0	0	0	0	821	828	821

Рис. 3.13. Приклад застосування редактора таблиць для редагування інформації про гілки схеми

CI NI NS NG Elements Training Rules Training Process D2 User: jk;
Page: <-- 1 2 --> Count: 50 / 51

ID	Name	ns_char	PGS	QGS	PNS	QNS	mod_u_z	u_1_z	u_2_z	u_1	u_2	mod_u_ns	
599	ПУ 750	599	0	0	0	0	0	0	0	720.72	76.734	724.793	Edit
703	ЧАЕС 750	703	0	0	0	0	0	0	0	712.466	78.238	716.749	Edit
772	Київська750	772	0	0	0	0	0	0	0	711.769	74.81	715.69	Edit
808	ХАЕС	808	0	0	0	0	0	0	0	695.721	194.291	722.342	Edit
809	ХАЕС 330	809	0	0	0	0	0	0	0	340.728	26.167	341.731	Edit
827	ВН 750	827	0	0	0	0	0	0	0	709.934	69.949	713.371	Edit
901	РІВНЕ	901	0	0	140	0	0	0	0	344.546	4.049	344.57	Edit
902	РАЕС 330	902	0	0	60	0	0	0	0	357.864	-30.685	359.178	Edit
945	ЗУ 750	945	0	0	0	0	0	0	0	670.026	167.064	690.539	Edit
985	РАЕС 750	985	0	0	0	0	0	0	0	607.607	267.764	663.991	Edit
709	Н.КИЇВСЬКА	709	-115	20	290	-65	0	0	0	328.504	-67.349	335.337	Edit
712	ЖИТОМИР	712	0	0	105	0	0	0	0	340.188	-64.135	346.181	Edit
720	Тп ГРЕС	720	0	0	0	0	0	0	0	335.256	-59.95	340.573	Edit
723	СЕВЕРНАЯ	723	0	0	380	-45	0	0	0	320.638	-69.862	328.16	Edit
727	ЧАЕС 330	727	0	0	230	0	0	0	0	342.495	-31.694	343.958	Edit
729	ЛІСНА	729	0	0	100	0	0	0	0	341.405	-57.69	346.245	Edit
344	ПОБУЖЖЯ	344	0	0	180	0	0	0	0	334.579	2.432	334.588	Edit
530	КОТОВСЬК	530	0	0	245	0	0	0	0	333.269	-39.191	335.566	Edit

Рис. 3.14. Приклад застосування редактора таблиць для редагування інформації про вузли схеми

На Рис. 3.15 представлена електрична мережа головної сторінки тренувального завдання на тему: "Керування та контроль перетину ЗАХІД - ВІННИЦЯ" з метою формування та підтримки ключових компетентностей оперативно-диспетчерського персоналу магістральних електромереж України – розпізнавання умов та причин раптового підвищення або пониження частоти у цьому регіоні.

У завданні розглядається режим нічного мінімуму при виведенні в ремонт ВЛ-330 Шепетівка-Житомир по аварійній заявці ПС "Шепетівка" при жорсткому обмеженні гідроресурсів і максимальному завантаженні АЕС і ГАЕС:

- 04:00 - відключення ПЛ-330 Шепетівка-Житомир за аварійною заявкою;

- з 04:10 до 04:20 - ріст навантаження Київського енерговузла +100 МВт;

- з 04:30 до 04:40 - плановий ріст покриття +100 МВт;

- з 04:40 - виникають тривалі коливання активної потужності по ПЛ- 750 ХАЕС-ЧАЕС і частоти в системі, загроза порушення статичної стійкості ОЕС.

Розроблений конструктор-редактор тренувальних завдань (ТЗ) дозволяє автоматизувати процес побудови ТЗ та швидко конструювати нові завдання будь-якої складності.

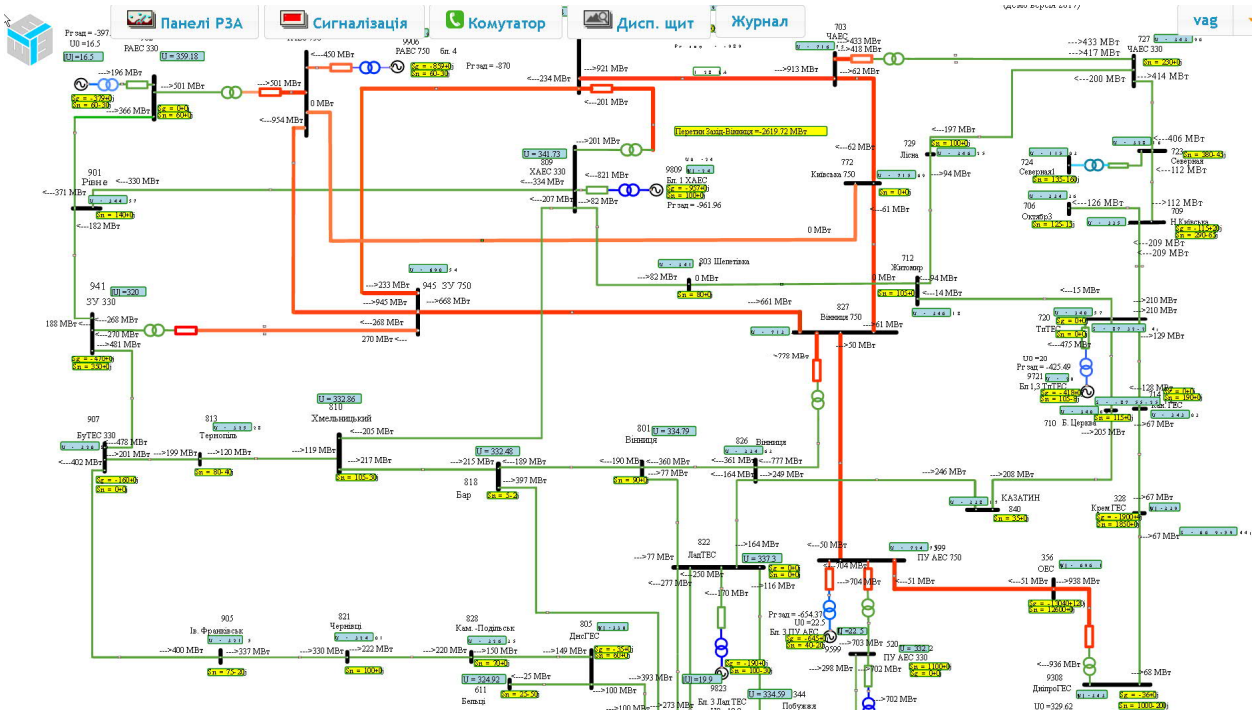


Рис. 3.15. Приклад відображення результатів моделювання в процесі тренажерного заняття

3.4 Дослідження результатів моделювання перехідних процесів великих ЕЕС

Розрахунок параметрів усталеного режиму роботи ЕЕС використовується як для розрахунку початкового стану ЕЕС перед тренуванням, так і під час розрахунку перехідних процесів в якості початкових умов на кожному кроці. Розрахунок початкового стану режиму ЕЕС дозволяє виключити небажані перехідні процеси у разі відсутності балансу потужностей/струмів у вузлах. Результати розрахунків параметрів усталених режимів в процесі тренувального заняття використовують для вирішення систем диференціальних рівнянь.

Для розв’язання системи диференціальних рівнянь використовуються явні методи Рунге-Кутта 4-го порядку і явний метод предиктор-коректор змінного порядку, заснований на методі Адамса і враховуючий жорсткість рівнянь [91, 261, 262]. Крок інтеграції в моделі перехідних процесів варіюється від 15 мс.

Диференціальні і алгебраїчні рівняння розв’язуються по черзі. При цьому результати рішення системи нелінійних рівнянь алгебри відповідають параметрам режиму роботи ЕЕС у поточний момент часу.

Була розглянута і проаналізована найбільш важлива властивість різних методів розв’язання систем диференційних рівнянь для використання в тренажерних системах – похибка [263].

Похибка 1-ї модифікації методу Ейлера [91, 261, 262, 264], що оцінюється для величини $|y_n - y(x_n)|$, має порядок $O(h^3)$, тобто існує деяка константа M>0 така, що $|y_n - y(x_n)| \leq Mh^3$. Похибка 2-ї модифікації методу Ейлера, що оцінюється для величини $|y_n - y(x_n)|$, також має порядок $O(h^3)$.

Похибка методу Рунге – Кутта 4-го порядку, що оцінюється для величини $|y_n - y(x_n)|$, має порядок $O(h^4)$. Цей метод розв'язання задачі Коші для диференціального рівняння є найточнішим, а метод Ейлера – найгіршим.

Для підвищення точності та адекватності математичних моделей складних об'єктів і процесів при побудові моделей доводиться враховувати

велику кількість факторів та параметрів. При цьому в математичній моделі, що описується системою диференціальних рівнянь, опиняються складові з великими і малими значеннями похідних від шуканих функцій $Y_j(x)$. Це і призводить до так званої жорсткої системи диференціальних рівнянь, яка є властивістю самої математичної задачі, а не чисельного методу її розв'язання.

Застосування явних чисельних методів для жорстких систем диференціальних рівнянь дає велику похибку у розв'язку, тому для них розроблені так звані неявні методи [264].

З метою врахування жорсткості були розглянуто властивості методів [264].

Похибка методу Адамса–Бошфорда 4-го порядку, що оцінюється для величини $|y_n - y(x_n)|$, має порядок $O(h^4)$.

Похибка методуАдамса–Мултона 4-го порядку, що оцінюється для величини $|y_n - y(x_n)|$, має порядок $O(h^5)$.

З розглянутих методів розв'язання задачі Коші для диференціального рівняння метод Рунге–Кутта 4-го порядку і метод Адамса–Бошфорда 4-го порядку дають майже однакові результати.

Комбінація методів Адамса–Бошфорда і Адамса–Мултона 4-го порядку має назву методу прогнозу та корекції.

Похибка методу прогнозу та корекції 4-го порядку, оцінювана для величини $|y_n - y(x_n)|$, має порядок $O(h^5)$ [262], [264].

Якщо порівнювати однокрокові та багатокрокові методи розв'язання задачі Коші для звичайних диференціальних рівнянь, треба підкреслити, що в багатокрокових методах крок h можна обирати більшим, ніж у однокрокових методах. Це дає можливість значно зменшити кількість кроків, а значить і трудомісткість розв'язання задачі в цілому.

У багатокрокових методах крок h можна обирати більшим, ніж у однокрокових методах.

Для перевірки можливостей виконання кроків різних сценаріїв ПТ, числових досліджень і розрахунків електромагнітних процесів в синхронних

машинах (СМ), які працюють у складі великих електроенергетичних систем (ЕЕС) і енергооб'єднань (ЕО) були використані наступні математичні моделі.

Найбільш точне відображення електромагнітних процесів в ідеалізованих синхронних машинах (СМ), що підключаються до електричних мереж, дають повні рівняння Парка-Горева [265], [266] в координатах (осях) *d-q*:

$$\frac{d\psi_d}{dt} = -\omega_s \cdot (u_d + r \cdot i_d + (1+s) \cdot \psi_q) \tag{3.224}$$

$$\frac{d\psi_q}{dt} = -\omega_s \cdot (u_q + r \cdot i_q + (1+s) \cdot \psi_d) \tag{3.225}$$

$$\frac{d\psi_r}{dt} = \frac{1}{T_r} \cdot \left(E_r - E_q\right) \tag{3.226}$$

$$\frac{d\psi_{rdi}}{dt} = -\frac{1}{T_{rdi}} \cdot E_{rqi} \tag{3.227}$$

$$\frac{d\psi_{rqk}}{dt} = \frac{1}{T_{rqk}} \cdot E_{rdk} \tag{3.228}$$

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{T_j} \cdot \left(M_T - M_E\right) \tag{3.229}$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_s \cdot \left(s - s_\nu\right) \tag{3.230}$$

$$x_s i_q + \frac{r_s i_d}{1+s} = -\frac{1}{1+s} u_d + E_{\delta d} \tag{3.231}$$

$$x_s i_d - \frac{r_s i_q}{1+s} = \frac{1}{1+s} u_q - E_{\delta q} \tag{3.232}$$

$$\psi_d = x_s \cdot i_d + E_{\delta q} \tag{3.233}$$

$$\psi_q = x_s \cdot i_q - E_{\delta d}$$

$$\psi_r = \frac{x_{ad}}{x_r} E_{\delta q} + \frac{x_{sr}}{x_r} E_q$$

$$\psi_{rdi} = \frac{x_{ad}}{x_{rdi}} E_{\delta q} + \frac{x_{srdi}}{x_{rdi}} E_{rqi} \qquad i = 0,...,n_d \tag{3.234}$$

$$\psi_{rdi} = \frac{x_{ad}}{x_{rdi}} E_{\delta q} + \frac{x_{srdi}}{x_{rdi}} E_{rqi} \qquad k = 0,...,n_q \tag{3.235}$$

$$E_{\delta q} = x_{ad} i_d + E_q + \sum_{i=1}^{n_d} E_{rqi} \tag{3.236}$$

$$E_{\delta d} = -x_{aq} i_q - \sum_{k=1}^{n_q} E_{rdk} \tag{3.237}$$

де ψ_d - потокозчеплення обмотки.

Проте рішення системи дифепрактичне їх застосування пов'язане з великими обчислювальними витратами, оскільки вимагає розрахунку з малим кроком, визначуваним періодичною складовою струму ротора і зухвалої його аперіодичної складової струму статора, які також характеризуються в координатах $d-q$ змінами з основною частотою, тобто біля 50 Гц.

Взаємодії вказаних вільних складових струмів, які виникають при трифазних коротких замиканнях, викликають додатковий гальмівний момент, що робить помітний вплив на рух ротора при КЗ поблизу виводів генератора. Інша складність, яка зарубіжним дослідникам представляється непереборною, - необхідність обліку в цьому випадку електромагнітних процесів в електричній мережі і навантаженні. На Рис. 3.16 наведено заступну схему СГ, яка використовувалась для формування математичної моделі.

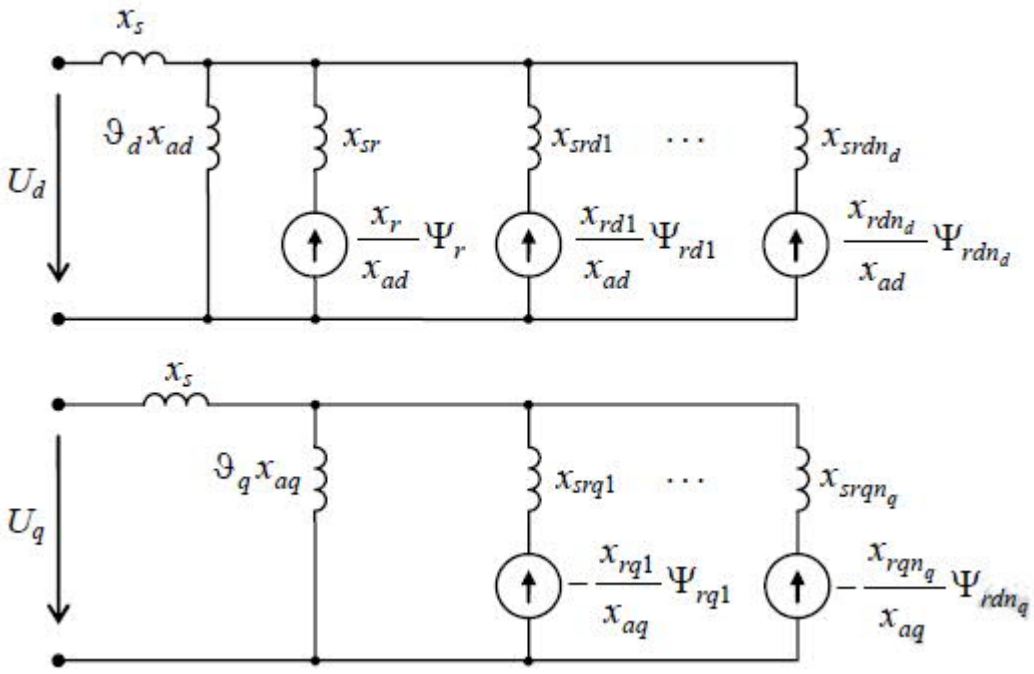


Рис. 3.16. Заступнв схема синхронного генератора в осях d і q

Рівняння ланцюгів ротора залежать від кількості контурів ротора, що розглядаються в явному виді.

При обліку двох демпферних контурів диференціальні рівняння перехідних процесів машини, записані на основі огинаючих періодичних складових струмів статора, мають вигляд:

$$\frac{d\psi_r}{dt} = \frac{1}{T_r}\left(E_r - E_q\right)$$

$$\frac{d\psi_{rdi}}{dt} = -\frac{1}{T_{rdi}} E_{rqi}$$

$$\frac{d\psi_{rqk}}{dt} = \frac{1}{T_{rqk}} E_{rdk},$$

де потокозчеплення обмотки збудження, подовжнього і поперечного демпферних контурів рівні:

$$\psi_r = \frac{x_{ad}}{x_r} E_{\delta q} + \frac{x_{sr}}{x_r} E_q$$

$$\psi_{rd1} = \frac{x_{ad}}{x_{rdi}} E_{\delta q} + \frac{x_{srdi}}{x_{rdi}} E_{rq1}$$

$$\psi_{rq1} = -\frac{x_{aq}}{x_{rqk}} E_{\delta d} - \frac{x_{srqk}}{x_{rqk}} E_{rd1}.$$

Тут x_d, x_q - синхронні реактивні опори по подовжній і поперечній осі; x'_d - перехідний реактивний опір по подовжній осі (для машини з демпферними контурами відповідають їх розімкненому стану); x_{ad}, x_{aq} - реактивність реакції якорі по подовжній та поперечній осі; x_s - реактивний опір розсіювання статора; x_r - реактивний опір обмотки збудження; x_{rd1}, x_{rq1} - реактивні опори демпферних обмоток по повздовжній і поперечній осі відповідно; T_r, T_{rd1}, T_{rq1} - постійні часу відповідно обмотки збудження, поздовжнього і поперечного демпферних контурів при розімкнених обмотках статора і збудження; E_q, E_{rd1}, E_{rq1} - ЕРС, індуковані в статорі магнітним полем струмів відповідних контурів; E_r - напруга що прикладена до обмотки збудження.

Порівняння результатів випробувань потужних турбогенераторів і розрахунків по класичній моделі, що має по одному демпферному контуру в кожній осі, показує недостатність останньою при аналізі тривалих перехідних процесів, особливо відносно моделювання масиву ротора машини в поперечній осі. Середньоквадратична похибка (σ) апроксимації частотної характеристики при описі масиву ротора одним контуром по подовжній і одним по поперечній осі може досягати 15-25%. З іншого боку, з похибкою не більше, ніж помилка вимірів (σ = 2-3%), експериментальні частотні характеристики можуть апроксимуватися при обліку ротора двома еквівалентними контурами по кожній осі, тобто в подовжній осі - обмотка збудження і один демпферний контур, а в поперечній осі - два демпферні контури. У зв'язку з цим така модель з трьома демпферними контурами широко застосовується за кордоном.

Математична модель синхронної машини будується на основі її представлення у вигляді системи магнітно пов'язаних контурів [177]. Ряд параметрів такої моделі - власні і взаємні індуктивності контурів і деякі їх комбінації, постійні часу контурів не можуть бути визначені безпосередньо за експериментальними даними.

Розрахунки динамічної стійкості і триваліших електромеханічних перехідних процесів вимагають обліку автоматичного регулювання швидкості обертання (АРШ) генераторів, енергоносія (води, пара), що впливає на впускання в турбіну, і що змінює механічний момент, що обертає, на валу агрегату. Зазвичай модель АРШ поєднується з моделюванням турбін, а для триваліших процесів - котлів, атомних реакторів, водоводів. Розрахунок процесів в тепловій частині енергоблоку дозволяє знайти тиск пари в характерних точках структурної схеми турбоагрегату, що у поєднанні з відкриттям клапанів визначає витрату пари через циліндри турбіни і тим самим створюваний механічний момент.

Модель парової турбіни є простою моделлю, що враховує динаміку АРШ, яка може бути використана для опису регуляторів швидкості як

паровых, так і гідравлічних турбін. Ця модель передбачає опис регулятора аперіодичною ланкою з еквівалентною постійною часу і стандартними обмеженнями на відкриття і закриття

$$\frac{d\mu}{dt} = \frac{1}{T_s}\left[-\frac{s}{\sigma} - (\mu - \mu_0)\right], \qquad (3.238)$$

де T_s - еквівалентна постійна часу системи регулювання швидкості, с; σ - статизм регулятора, в.о.; s - ковзання (відхилення швидкості обертання від початкової) агрегату, в.о.; μ - змінна, що характеризує відкриття регулюючих клапанів парових турбін або направляючого апарату гідротурбін, в.о.; μ_0 - початкове значення μ , що відповідає початковому режиму, що встановився, в.о.

$$\mu_0 = \frac{Ð_{âí}}{Ð_{íì}} + Ì_{õõ}, \qquad (3.239)$$

де $Ð_{âí}$ - активна потужність генератора в початковому режимі, МВт; $P_{ном}$ - номінальна потужність генератора, МВт; M_{xx} - потужність турбіни при холостому ході генератора, в.о.

Залежність механічного моменту, що обертає, створюється турбіною ($M_м$ від μ), приймається лінійною і в припущенні постійності тиску пари має вигляд:

$$Ì_{ì} = (\mu - Ì_{õõ})\cos\varphi_{íì} \ ,$$

де $\cos\varphi_{íì}$ - номінальний коефіцієнт потужності генератора; $Ì_{ì}$ - механічний момент (в.о.), приведений до повної номінальної потужності генератора.

З допомогою $Ì_{õõ}$ можна відобразити для парових турбін відбір пари на турбонасоси і відбори теплофікації, для гідротурбін - специфічний гальмівний момент; це істотно при стандартних обмеженнях, передбачених в моделі АРШ:

$$0 \le \mu \le 1$$

Порівняння результатів розрахунку перехідних процесів і зареєстрованих процесів зміни потужності енергоблоків при раптових

збуреннях активної потужності в системі і викликаних ними змінах частоти показали необхідність обліку експериментально певної зони нечутливості АРШ навіть в простій моделі - АРС1 так, як це зроблено в складнішій, дволанцюговій моделі.

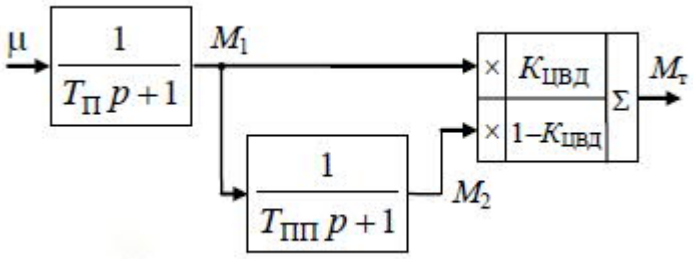


Рис. 3.17. Структурна схема дволанцюгової парової турбіни

Дволанцюгова модель парової турбіни, АРШ парової турбіни, що описується, відповідно структурній схемі на Рис. 3.17. Ця модель оперує з еквівалентною серводвигуном АРШ і враховує аперіодичною ланкою інерційність проміжного пароперегрівача або парових об'ємів турбіни. Принциповим недоліком цієї моделі є неможливість обліку так званої роботи відсіченої пари, яка обумовлює необхідність введення штучного запізнювання імпульсу ЕГП (електрогідравлічного перетворювача) при моделюванні імпульсного розвантаження турбін.

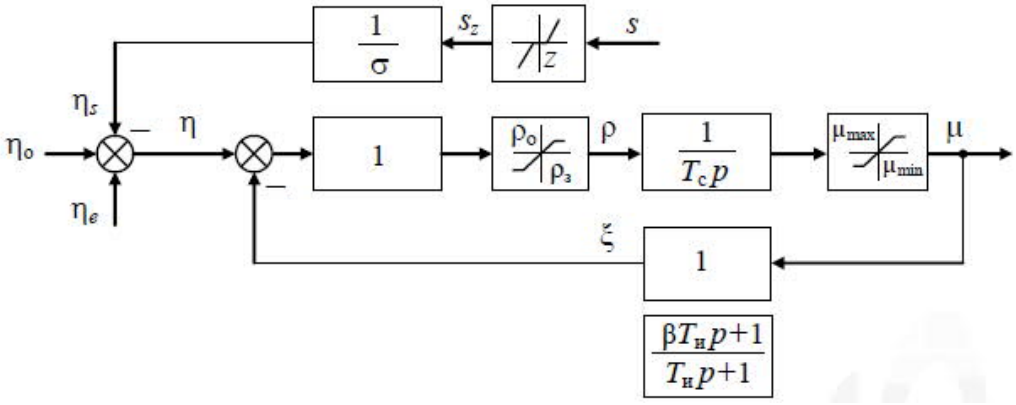


Рис. 3.18. Структурна схема АРШ з жорстким чи комбінованим зворотнім зв’язком

Для віддзеркалення додаткового запізнювання за закриття стопорних заслінок середнього тиску в структурну схему АРШ включено елемент, що

здійснює зміщення характеристики серводвигуна середнього тиску по відношенню до сигналу регулятора швидкості.

Модель АРШ, може враховувати ізодромний зворотний зв'язок що також є звичайним в програмах розрахунку динамічної стійкості. До системи рівнянь моделі додається рівняння:

$$\frac{d\xi}{dt} = \beta \frac{d\mu}{dt} + \frac{1}{T_{\dot{E}}}(\mu - \xi)$$

де $T_и$ - постійна часу ізодромного зв’язку, с; β - коефіцієнт зворотного зв'язку ізодромного; ξ - сигнал ізодромного зворотного зв'язку, в.о.

При імпульсному розвантаженні парових турбін через електрогідравлічний перетворювач (ЕГП), вживаній з метою підвищення динамічній стійкості теплових електростанцій, з максимально можливою швидкістю робиться короткочасне зниження потужності турбіни. Цей процес може бути спрощено змодельований завданням певної функції зміни моменту турбіни в часі.

Модель гідротурбіни ГЕС на відміну від парової турбіни описується одним диференціальним рівнянням:

$$\frac{dM_T}{dt} = 2\left(\frac{1}{T_w}(\mu - M_T) - \frac{d\mu}{dt}\right),$$

де T_w - час зміни швидкості води в водопроводі від нуля до номінального значення, в секундах.

Регулювання збудження генераторів має суттєвий вплив на перехідні процеси в енергосистемі при малих і великих збуреннях, тому необхідно адекватне моделювання систем автоматичного регулювання збудження (САРЗ). В енергосистемах працюють САРЗ різних типів: незалежні системи збудження побічної дії, які регулюють збудження генератора, впливаючи на збудження збудника (електромашинні, безщіткові, високочастотні діодні без компаундування і з компаундуванням, звичайного виконання і модернізоване) і тиристорні системи незалежного і самозбудження прямої дії, що регулюють безпосередньо струм збудження генератора. Електромашинні і високочастотні

системи збудження морально і фізично застаріли і поступово модернізуються або замінюються. Традиційні регулятори типу коректора напруги з компаундуванням поступово замінюються цифровими регуляторами сильного дії з пропорційно-інтегрально-диференціальним законом регулювання, який дозволяє підвищити точність регулювання і одночасно забезпечує більш високий рівень коливальної стійкості генераторів.

Набір моделей повинен забезпечити відтворення основних характеристик експлуатованих САРЗ, що впливають на якість електромеханічних перехідних процесів. До них можна віднести обмеження мінімального і максимального збудження, швидкість зміни збудження, форсування збудження, демпфування коливань і стабілізацію власного і групового руху, залежність збудження від режиму мережі і частоти обертання ротора генератора.

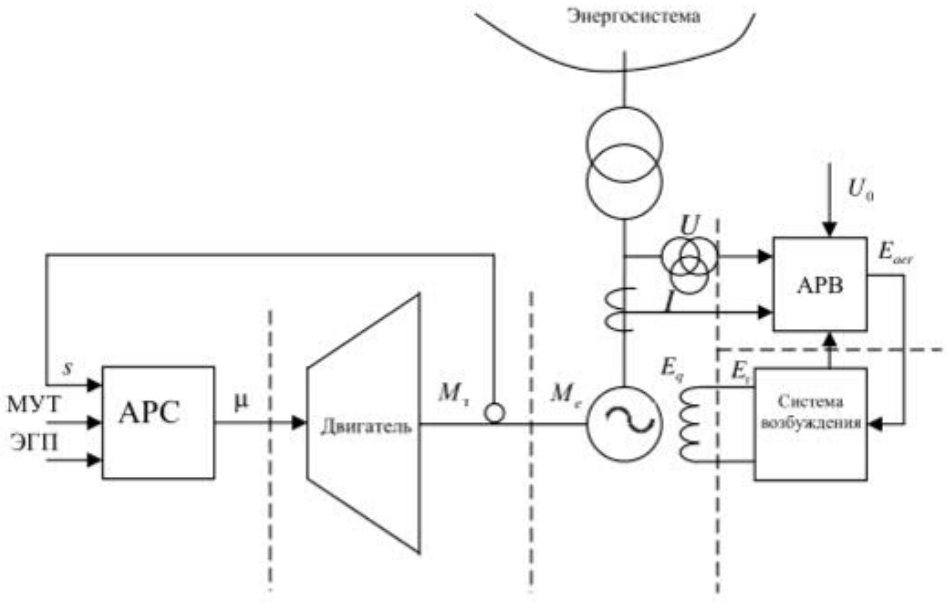


Рис. 3.19. Структурна схема блоку електростанції

При створенні набору моделей раціонально розглядати САРЗ генератора як структуру, що складається з джерела енергії збудження, включаючи систему управління джерелом (система збудження), і автоматичного регулятора збудження (Рис. 3.19). Такий поділ в більшості випадків відповідає і апаратному поділу САРЗ на компоненти. Маючи необхідний набір моделей для систем збудження і АРЗ, можна сформувати модель САРЗ, пов'язуючи в

допустимих поєднаннях моделі її структурних елементів; це надає гнучкість моделі САРЗ і спрощує, при необхідності, її розширення.

При самозбудженні без послідовного трансформатора напруга збудження залежить від напруги генератора, в цьому випадку в структурній схемі працює другий канал проходження сигналу E_1. У високочастотної системи збудження з діод ним випрямлячем напруга залежить від частоти обертання збудника, тому сигнал E_1 проходить через третій канал.

Модель безщіткової системи збудження, що представлена на Рис. 3.20, описується за наступними трьома рівняннями:

$$\frac{dE_1}{dt} = \frac{1}{T_1}\left(K_1 E_{aer} - E_1\right)$$

$$\frac{dE_2}{dt} = \frac{1}{T_1}\left(K_2 T_2 \frac{dE_q}{dt} + E_q - E_2\right)$$

$$E_r = \left(E_1 - E_2\right)\frac{n}{n_0}$$

$$0 \le E_r \le E_{r\max}$$

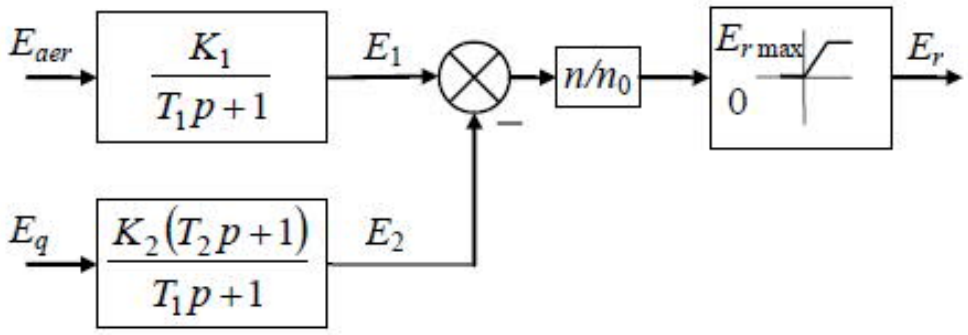


Рис. 3.20. Структурна модель безщіткової і модернізованої високочастотної системи збудження

Залежність напруги збудження від частоти обертання збудника враховується в формулі, де n - дійсна частота обертання, n_0 - частота обертання в вихідному режимі. ЕРС E_q і швидкість її зміни $\frac{dE_q}{dt}$ дає модель генератора.

Автоматичний регулятор збудження при розрахунках електромеханічних перехідних процесів використовуються регулятор збудження сильної дії.

На Рис. 3.21, Рис. 3.22 наведено результати деяких розрахунків перехідних процесів за наведеним вище сценарієм ПТ.

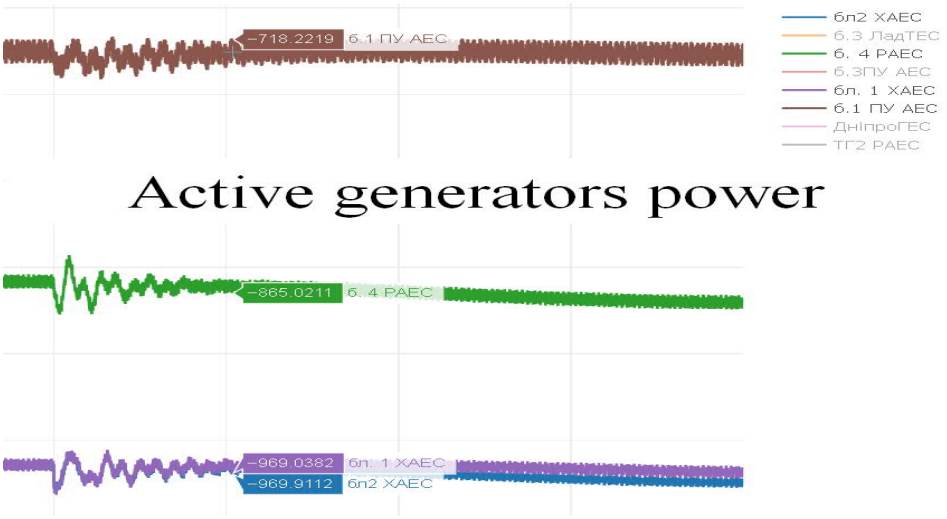


Рис. 3.21. Графік активної генерації блоків АЕС

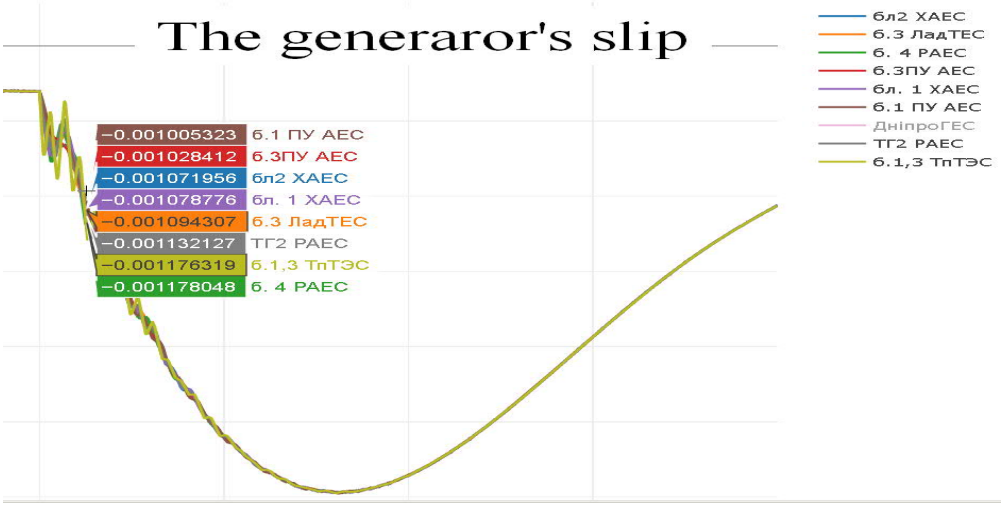


Рис. 3.22. Графік ковзання генераторів блоків АЕС

Найбільш поширеними в режимних диспетчерських комп'ютерних тренажерах є такі методи вирішення систем диференціальних рівнянь динаміки:

1. Рунге-Кутта 2-го і 4-го порядків (РТД «Фенікс», Росія);

2. Неявна схема інтегрування (РТД «Ретрен», Росія);

3. Неявний метод трапецій 2-го порядку (РТД «EPRI OTS», США, Electric Power Research Institute);

4. А-стійкий неявний метод (РТД «Fast DTS», ЄС, Tractebel Engineering).

Для розв'язку диференціальних рівнянь в РТД «Фенікс» застосований метод Рунге-Кутта 2-го порядку точності з постійним кроком інтегрування. Для вирішення проблем чисельної стійкості передбачена можливість завдання користувачем розміру кроку інтегрування в межах 0.01-0.5 сек.

Для прискорення розрахунків на етапах тривалих перехідних процесів система рівнянь спрощується, крок інтегрування збільшується на порядок і приблизно в стільки ж разів знижується трудомісткість розрахунків на фіксованому інтервалі часу.

В РТД «Ретрен» рішення системи диференціальних рівнянь проводиться із застосуванням неявної схеми інтегрування. На кожному кроці інтегрування вирішується нелінійна система рівнянь мережі в формі балансу струмів. Ця система вирішується ітераційним методом, причому на кожній ітерації система рівнянь мережі лінеарізуєтся для вирішення методом Гауса з трикутної факторизації матриці провідності. При вирішенні рівнянь мережі в матрицю провідності перед факторизації (після будь-якої комутації) в діагональні елементи матриці вносяться поправочні коефіцієнти, які потім враховуються в векторі струмів.

В РТД «EPRI OTS» диференціальні і алгебраїчні рівняння вирішуються по черзі.

Диференціальні рівняння вирішуються неявним методом трапецій 2-го порядку точності. Мінімальний крок інтегрування дорівнює 1 сек.

В РТД «Fast DTS» алгебро-диференціальні рівняння динаміки вирішуються не по черзі, а спільно, з використанням А-стійкого неявного методу. Використовується квазіньютонівська процедура (матриця Якобі формується і факторизується не на кожній ітерації і не на кожному кроці інтегрування). Передбачена альтернативна можливість вирішувати

лінеаризовану систему рівнянь итеративно - методом GMRES (generalized minimal residual method), заснованим на розкладанні вектору нев'язок по базису Крилова.

Використаний метод вирішення алгебро-диференціальних рівнянь страхує від деякої нестійкості рішення, але це досягається за рахунок різкого зростання обчислювальної складності алгоритму. Крок інтегрування в методі фіксований (10-40 мс).

Більшість використовуваних нині математичних моделей ЕЕС, які досить повно і достатньо достовірно описують спектр перехідних процесів в електроенергетичному устаткуванні для різних нормальних, аварійних і післяаварійних режимів [267 - 272], завжди містять дуже жорстку (відношення найбільшою постійною часу до найменшої) нелінійну систему диференціальних рівнянь надзвичайно високого порядку.

Методи дискретизації, вживані для звичайних диференціальних рівнянь [273 - 283], утрудняють рішення за допомогою методів чисельної інтеграції на великих інтервалах.

Єдиним способом поліпшення цієї обумовленості є зниження жорсткості і диференціального порядку шляхом декомпозиції і спрощення моделей ЕЕС, а також обмеженням інтервалу моделювання.

Однак, такі спрощення і обмеження здійснюються на шкоду повноті і достовірності відтворення режимів роботи об'єкта моделювання - ЕЕС або ОЕС. На жаль, ці спрощення є принципово неминучими при чисельному моделюванні і вимушено застосовуються в багатьох режимних тренажерах диспетчерського персоналу ЕЕС, що перешкоджає їх подальшому розвитку і вдосконаленню.

Потрібно зазначити, що завдання застосування математичних моделей перехідних довготривалих електромеханічних процесів виникає у випадку створення тренувальних занять (ТрЗ) і протиаварійних тренувань (ПТ), які пов’язані, в основному, із регулюванням частоти і стійкості великих ЕЕС.

В роботі для розрахунку усталених режимів роботи великих ЕЕС запропоновано та розроблено алгоритм багато опорного методу розрахунку контурних струмів, який не є матричним. Важливою особливістю цього методу є використання окремих дерев тільки з одним джерелом енергії. Ним може бути блоки АЕС, ТЕС, ГЕС, ГАЕС, СЕС або ВЕС. В результаті послідовного розрахунку напруги вузлів окремих дерев автоматично розраховується струм статорів відповідних блоків генераторів відповідних електростанцій. Ця важлива особливість запропонованого методу дозволяє зменшити жорсткість системи нелінійних диференційних рівнянь Парка-Горєва і використовувати досить ефективний метод Рунге-Кутта 4-го порядку із кроком інтегрування 0.01сек. або більшим Порівняно з відомі методами розв’язання систем диференціальних рівнянь Эйлера, Эйлера-Коши, Адамса та ін. метод Рунге-Кутта 4-го порядку виявився найбільш більш стійким і швидким. В роботі диференціальні і алгебраїчні рівняння вирішуються по черзі на заданому інтервалі інтегрування.

3.5 Висновки до третього розділу

Розглянуто теоретико-методологічні основи методів моделювання великих електроенергетичних систем і об’єднань з метою вибору найбільш ефективних для забезпечення швидкого розрахунку нормальних і аварійних режимів веб-орієнтованих протиаварійних тренажерів в процесі проведення тренувальних занять. Розроблені теоретичні основи моделювання режимів роботи великих електроенергетичних систем з використанням багатоопорного методу розрахунку струмів контурів. Запропонована двох рівнева декомпозиція розрахункових заступних схем ЕМ. Виконано теоретичний аналіз умов гарантованої збіжності ітераційних процесів рішення великих систем нелінійних рівнянь, які описують режими роботи електроенергетичних систем. Запропоновано та розроблено алгоритми і методи швидкого рішення таких систем. Наведено алгоритми та принципи роботи багатоопорного методу розрахунку контурних струмів для веб-орієнтованих тренажерних

систем Розроблені алгоритми, виконана програмна реалізація та наведено результати чисельних досліджень запропонованих методів моделювання перехідних процесів великих електроенергетичних систем. Запропонований і реалізований новий метод розрахунку усталених режимів і довготривалих електромеханічних процесів в розподіленому моделюючому середовищі для забезпечення функціонування веб-орієнтованих тренажерних систем оперативно-диспетчерського персоналу МЕМ. Вирішена актуальна задача визначення оптимальних коефіцієнтів прискорення ітераційних процесів рішення систем нелінійних алгебраїчних рівнянь, які описують режими роботи великих ЕЕС і об’єднань. Наведено результати чисельних експериментів, які підтверджують ефективність запропонованого підходу, обґрунтована можливість застосування запропонованого алгоритму у процесах організації протиаварійних тренувань оперативного персоналу. Здійснено розробку промислового варіанту модуля розрахунку оптимальних коефіцієнтів прискорення ітераційних процесів в реальному часі. Отримані результати дають можливість застосовувати найбільш сучасні методи моделювання різноманітних режимів роботи складних ЕЕС, що дозволяє проводити більш ґрунтовний їх аналіз. Використання ПФЕ дозволяє забезпечити оптимальні швидкісні характеристики не тільки багатоопорного методу розрахунку струмів контурів, а і методу Ньютона-Рафсона.

РОЗДІЛ 4
МЕТОДИ РОЗПОДІЛЕНОГО МОДЕЛЮВАННЯ КОМП'ЮТЕРНИХ ТРЕНАЖЕРІВ ОПЕРАТИВНОГО ПЕРСОНАЛУ

4.1 Особливості застосування хмарних технологій до конструювання комп'ютерних тренажерів

Мережа віртуальних науково-навчальних центрів підготовки персоналу в енергетиці має повною мірою використати всі елементи існуючої інфраструктури системи підвищення кваліфікації персоналу: матеріально-технічну, навчально-методичну бази та викладацький штат, шляхом інтеграції в єдине інформаційне середовище. Створення такого комплексного середовища дозволить використати увесь накопичений досвід навчання існуючої системи професійного навчання в енергетиці й швидко адаптувати програми навчання до потреб енергетичних компаній, держави та інших заінтересованих сторін.

Побудову мережі віртуальних навчальних центрів доцільно проводити за типом корпоративних хмарних обчислень. Віртуалізація є основною технологією хмарних обчислень і дозволяє створити єдину інфраструктуру центрів для навчання, контролю знань і тренажерної підготовки персоналу, а також усунути розрив між тим, що забезпечує діюча в Україні система професійного навчання, та навичками працівників, яких потребують установи енергетичного сектору.

Хмарні обчислення (cloud computing) забезпечують зручний розподілений доступ до загального пулу обчислювальних ресурсів (мереж, серверів, систем зберігання даних, програм та послуг), і дозволяють користувачам задіяти всі ресурси і технології, без необхідності глибоких знань або досвіду роботи з кожною з них [284]. У роботах [178, 285 - 287] зазначено, що хмарні обчислення дозволяють підприємствам підвищувати швидкість роботи своїх додатків, покращувати керованість і зменшити витрати на обслуговування, а також дозволяють швидше коригувати ресурси, щоб

задовольнити коливання та непередбачувані потреби бізнесу. Таким чином, нова система підвищення кваліфікації персоналу, яка ґрунтується на методологічних принципах, розглянутих у другому розділі, дозволить реалізувати компетентнісний підхід до роботи з персоналом, зосередившись на придбанні ним тільки найважливіших знать та умінь в своїй експлуатаційній діяльності в режимі безперервної і керованої системі навчання.

Ресурси діючої системи підвищення кваліфікації персоналу мають бути завжди доступні всьому персоналу енергетики з метою отримання ним необхідної повної, достовірної і детальної інформації щодо результатів роботи енергетичного сектора, а також для поетапного створення системи безперервного навчання.

Хмарні обчислення мають спільні характеристики з Grid-, Fog-, Dew- та Utility-обчисленнями. Серед ключових характеристик, важливих для побудови віртуальних науково-навчальних центрів підготовки персоналу в енергетиці, можна виділити наступні [178, 288, 289]:

- оперативність: завдяки можливості багатократно надавати доступ до серверів, систем зберігання даних та програм розрахунку, користувачі можуть швидко задіяти ресурси мережі навчальних центрів;
- продуктивність: декілька користувачів можуть працювати з наборами даних, програмами розрахунку режимів тощо одночасно, збільшуючи продуктивність навчання; важливою можливістю пропонованої системи є гарантування персоналу всіх рівнів існуючої ієрархічної системи керування енергетикою України та інших галузей економіки безперервного доступу до нової системи підвищення кваліфікації незалежно від типу власності;
- незалежність від місцезнаходження та пристроїв: оскільки доступ до навчального центру здійснюється через інтернет, співробітники енергетичних компаній можуть підключатися за допомогою веб-переглядача з будь-якого місця та пристрою, та проводити навчання на своїх робочих місцях або в УТЦ і НТП;

- технічне обслуговування додатків для хмарних обчислень простіше, тому що вони не повинні бути встановлені на комп'ютері кожного користувача і доступні з різних місць;
- масштабованість і гнучкість: оскільки ресурси надаються динамічно, «на вимогу», є можливість нарощувати масштаб тренувань у період пікових навантажень, або зменшувати, якщо ресурси не використовуються; наприклад, під час проведення змагань у рамках заходів з підвищення кваліфікації диспетчерів декількох диспетчерських служб, є необхідність залучити якомога більше працівників до сумісних тренувань, відповідно залучаючи більше ресурсів;
- надійність: завдяки використанню певної кількості надлишкових ресурсів, хмарні обчислення забезпечують безперервність навчання та швидке відновлення після виходу з ладу частини ресурсів, наприклад, внаслідок припинення електропостачання;
- безпека: з одного боку, безпека може поліпшитися завдяки централізації даних, забезпеченню певного резерву ресурсів тощо, але підвищується ризик втрати контролю над певними конфіденційними даними; отже, при побудові віртуальних науково-навчальних центрів підготовки персоналу в енергетиці частину ресурсів необхідно спрямувати на вирішення проблем безпеки;
- скорочення витрат: у низці статей, які детально розглядають аспекти витрат у хмарних обчисленнях [288, 289], більшість авторів приходить до висновку, що хмарні технології скорочують витрати на інфраструктуру, однак обсяг заощаджених витрат залежать від типу підтримуваних заходів та типу інфраструктури заявлених постачальниками послуг хмари; таким чином, технології хмарних обчислень дозволять енергетичним компаніям уникати авансових витрат на інфраструктуру та зосереджуватись на проектах професійного навчання персоналу;
- багатофункціональність: ресурси віртуальних науково-навчальних центрів можуть бути задіяні іншими користувачами у час, вільний від навчання;

таким чином можна підвищити ефективність використання основного фізичного обладнання, яке зазвичай задіяно лише на 10-20%.

Наразі існує декілька моделей розгортання хмарних обчислень [290 - 293]: закрита хмара (приватне хмарне середовище), відкрита хмара (хмарний сервіс для публічного користування), гібридна хмара та інші: розподілена хмара, кооперативна (громадська) хмара, інтер-хмара, мульти-хмара тощо.

Виходячи з концепції побудови Національної професійної системи підготовки персоналу в енергетиці, відповідно до якої доступ до мережі віртуальних науково-навчальних центрів матимуть всі установи енергетичного сектору незалежно від типу власності, доцільним є застосування розподіленої та гібридної моделей розгортання хмарних обчислень. Розподілені хмарні обчислення можуть бути реалізовані на кластері мережевих комп'ютерів, що діють узгоджено з метою виконання великих розрахункових завдань для розподіленого набору машин у різних місцях, підключених до однієї мережі або сервісу. Гібридна хмара – це поєднання двох або більше хмар (відкритих, закритих або громадських), які залишаються окремими об'єктами, але пов'язані між собою, об’єднуючи переваги декількох моделей розгортання [291].

Вище зазначено, що основною технологією для хмарних обчислень є віртуалізація. Віртуалізація означає акт відокремлення фізичних апаратних засобів від операційних систем, систем зберігання даних і комп'ютерних мережних ресурсів [294]. У контексті створення мережі віртуальних центрів для навчання, контролю знань і тренажерної підготовки персоналу в енергетиці, здійснюється апаратна віртуалізація, віртуалізація віддалених робочих місць, пам'яті, систем зберігання даних програмного забезпечення, та мережева віртуалізація. Серед існуючих методів і програмних технологій віртуалізації корисними є віртуалізація на рівні операційної системи, віртуалізація додатків та віртуалізація послуг [294].

Розглянемо хмарну архітектуру розподіленого середовища моделювання віртуальної ОЕС України, яке використовуватиметься у складі

тренажерних систем для проведення сумісних тренувань диспетчерів декількох диспетчерських служб [11, 31, 33 - 36, 295]. Згідно зі структуро проекту, поданої на Рис. 4.1, до тренувань можуть бути одночасно задіяні диспетчери всіх енергосистем України, керівники різних рівнів, у тому числі ПрАТ «НЕК «Укренерго», та контролюючі особи з різних установ. Учасники тренувань можуть підключатись до віртуальної ОЕС як зі стаціонарних комп'ютерів, так і з інших пристроїв: планшетів, ноутбуків, смартфонів тощо.

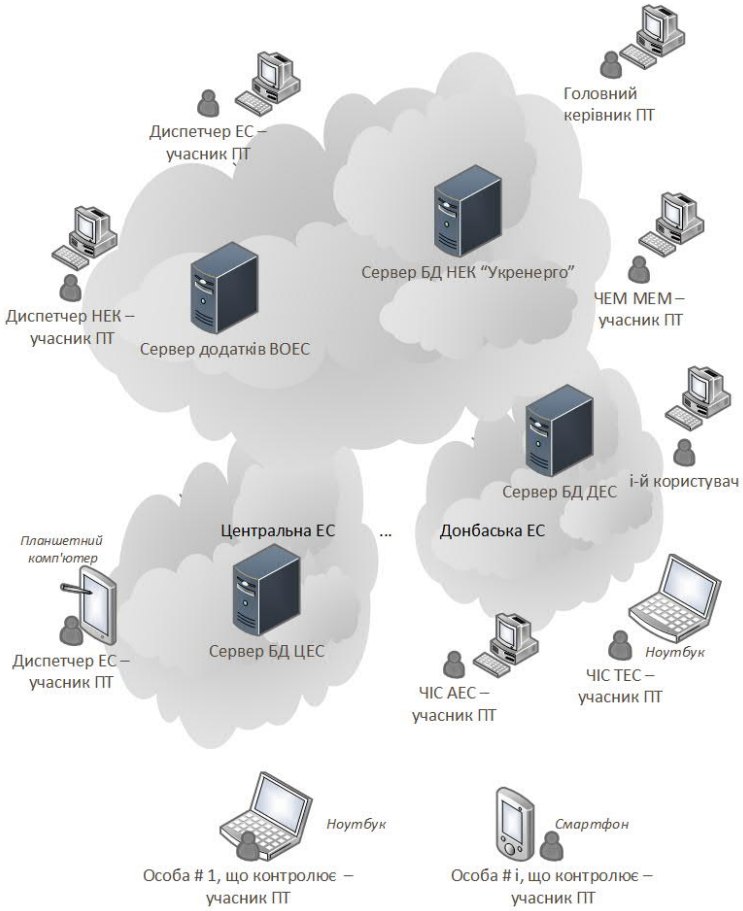


Рис. 4.1. Хмарна архітектура розподіленого середовища моделювання віртуальної ОЕС України

Відповідно, до виконання розрахунків залучаються обчислювальні ресурси установ, які беруть участь в організації тренувань. Створення розподіленого моделюючого середовища ОЕС України дозволяє легко інтегрувати існуючі програмні комплекси, що забезпечують рішення великої групи електроенергетичних задач (розрахунки сталих і перехідних режимів роботи ЕС, струмів короткого замикання, стійкості тощо). Немає необхідності

розробляти кожен раз нові структури вихідних даних для вирішення різних завдань, первинним джерелом даних для яких є одні й ті ж трансформатори, лінії електропередачі, генератори тощо.

Використання систем хмарних обчислень з обов'язковим розподіленням серверів баз даних (БД) ЕС і їх об'єднань є необхідною умовою розробки такого масштабного проекту. Запропоноване рішення дозволяє включати в БД будь-які розрахункові програми, наприклад, розрахунок режиму, струмів короткого замикання, статичної та динамічної стійкості тощо, використовуючи потужний механізм вбудованих функцій і маючи в своєму розпорядженні всі обчислювальні програми на стороні серверів БД [57]. Вбудовані в БД програми запускаються в роботу в разі виникнення відповідних умов, наприклад, при комутації елементів електричної мережі, зміні навантаження, генерації тощо.

Передачу результатів моделювання з розподілених БД за запитом користувачів, що використовують будь-які сучасні браузери (Mozilla Firefox, Chrome, IE тощо), забезпечують розподілені сервери додатків. Сервери додатків призначені в першу чергу для швидкої обробки запитів з боку великої кількості користувачів, яких може бути більше тисячі, і формування необхідних результатів у вигляді веб-сторінок. Таке об’єднання розподілених БД і серверів додатків дозволяє створити розподілене середовище моделювання режимів і розрахункових завдань, що використовують дані різних БД, незалежно від фізичного місця їх розташування.

Завдяки хмарній архітектурі, розроблені нові інструментальні засоби для роботи з тренажерними комплексами можуть бути легко адаптовані до умов тренувань і швидко уведені в експлуатацію. Використання корпоративних хмарних технологій дозволить залучати до спільної роботи, у разі потреби, навчальні, науково-дослідні, проектні організації і заводи по виготовленню енергетичного устаткування. Сьогодні таких можливостей у існуючих енергетичних підприємств немає.

Розподілене середовище моделювання віртуальної ОЕС України реалізовано фахівцями НВ ТОВ "Інфотех" (м. Київ) [111] і є лише одним з елементів мережі віртуальних навчальних центрів підготовки персоналу в енергетиці. Подальший розвиток мережі, її апробація та впровадження потребує залучення не тільки підприємств енергетичної галузі, а й навчальних, науково-дослідних та проектних організацій. Потенційними партнерами для розвитку проекту є ІЕД (м. Київ) НАНУ [296], ІПМЕ (м. Київ) НАНУ [297], Центр підвищення кваліфікації керівників і спеціалістів Міненерго КПІ ім. Ігоря Сікорського (м. Київ) [298], Національний університет "Львівська політехніка" (м. Львів), проектні організації ЛьвівОргрес (м. Львів) та інші. До роботи можуть бути залучені провідні наукові і освітні установи країн Європейського союзу, а також країни-члени ENTSO-E.

4.2 Теоретичні основи створення та функціонування розподіленої системи підготовки персоналу в енергетиці

Комп’ютерні веб-орієнтовані технології призначені для вирішення проблем побудови і ефективного функціонування важливого класу складних динамічних систем в реальному часі. Найбільш важливі завдання веб-орієнтованих систем пов’язані із створенням моделі організації функціювання розподіленого обчислювального середовища і реалізації в цьому середовищі швидкодіючих методів розрахунку великих систем нелінійних рівнянь алгебри, які описують різноманітні режими роботи ЕЕС в реальному часі.

У сучасних умовах для цілей безперервного навчання і тренажерної підготовки оперативно-диспетчерського персоналу МЕМ ОЕС України на базі єдиної інформаційної моделі ОЕС України потрібно нарощування розмірності розрахункових математичних моделей МЕМ як мінімум до 15000 - 20000 вузлів, при 2000 - 5000, які застосовують сьогодні.

До теперішнього часу тематика розрахунків усталених режимів і перехідних процесів в ЕЕС досить добре вивчена, опубліковані тисячі наукових статей і запропоновані десятки методів. Проте, на жаль, сучасна

математика доки не дала повної теорії чисельних методів рішення систем нелінійних рівнянь алгебри, використовуваних для розрахунку режимів. Не в повному об'ємі вирішені питання існування і єдиності рішення рівнянь сталих режимів, не отримані необхідні і достатні умови збіжності використовуваних методів розрахунку. Теорія обчислювальних методів і моделей розрахунку режимів для комп’ютерів існує вже більше за півстоліття, але не є ідеально закінченою. Кожен новий підхід до дослідження і аналізу великих ЕЕС методами діакоптіки [236] дозволяє отримати нові і додаткові знання про режими роботи великих ЕЕС.

Тут важливо відмітити, що ідея рішення складних систем по частинах була висловлена і реалізована незалежно від Г. Крону в роботах С. А. Лебедєва, Г. Е. Пухова і пізніше розвинена багатьма вітчизняними дослідниками [35, 144, 148, 284, 299], та ін. У [110, 284] приведені класифікації методів диакоптики і способів виділення підсистем при розділенні початкової складної системи на частини. Там же наведено характеристики значному числу рекомендованих алгоритмів для розрахунку сталих режимів електричних систем різними авторами.

Порівняльний аналіз математичних методів для технічних розрахунків веб-орієнтованих тренажерних систем підготовки персоналу, що реалізовуються у сучасних обчислювальних середовищах, передбачає дослідження можливостей задовольнити суперечливі вимоги надійності, точності і швидкодії прогнозуємого для застосування обчислювального алгоритму, а також малі запити до пам'яті і компактність програмних реалізацій.

У роботі [300] зазначено, що на будь-якій стадії розвитку науково-технічного забезпечення проектних і дослідницьких завдань завжди є круг проблем, в яких адекватне представлення досліджуваних об'єктів зв'язане з рішенням завдань такого масштабу, коли ніякий відомий прямий метод не може забезпечити їх рішення з необхідною точністю в прийнятні терміни. Ця обставина має принциповий характер. Підвищення ефективності

обчислювальної техніки неминуче супроводжується розширенням круга актуальних завдань, для задовільного вирішення яких за критеріями точності і практичної швидкодії бракує ресурсів доступних обчислювальних засобів.

Ці завдання обумовлені ускладненням технічних систем і необхідністю обліку все більшого числа чинників в цілях забезпечення при проектуванні систем більш високих показників, що характеризують їх функціональну точність, економічність і експлуатаційну і екологічну надійність.

Тому пропонуються використовувати декомпозиційні методи побудови моделей великих систем і тісно пов'язаний з ними клас ефективних обчислювальних методів, що належать до так званої технології розріджених матриць [301, 302]. Мається на увазі не декомпозиція феноменологічного характеру, що лежить в основі вивчення будь-яких явищ реального світу, а діакоптічні підходи до моделювання і розрахунків складних систем [300].

Відомо [303], що якщо модельована система має слабозв'язану ієрархічну структуру, то найбільш ефективний спосіб організації обчислювальних процесів припускає декомпозицію початкової системи на ряд підсистем за допомогою діакоптіческого підходу, який забезпечує представлення початкового матричного опису модельованої системи у виді, що містить блокову матрицю з облямованою структурою [236, 304 - 306]. Такий підхід значно підвищує ефективність обчислювальних процесів і дозволяє привести потрібні для вирішення завдання обчислювальні ресурси у відповідність з реальними можливостями.

В роботі [303] запропоновані організація як послідовного обчислювального процесу на автономному комп'ютері, так і організація паралельних обчислень в локальній або глобальній мережі, де комп'ютер кожного вузла мережі здійснює формування і обробку даних, пов’язаних тільки з окремою підсистемою [307, 308].

Діакоптіческий підхід дозволяє переходити від складної системи до простіший шляхом її розділення на ізольовані частині. Складна система за певними правилами розчленовується на деяке число малих підсистем, і для

кожної з підсистем окремо виконується потрібний аналіз, загальне рішення виходить шляхом з'єднання отриманих часткових рішень для підсистем.

Застосування діакоптіческого підходу для моделювання великих систем на основі декомпозиції початкової системи на ряд підсистем дозволяє значно збільшити ефективність обчислювальних процесів як при послідовній, так і при паралельній організації обчислень. Ефективність методу діакоптіки проявляється якнайповніше при аналізі складних систем і зводиться до скорочення витрат машинного часу тим більшому, чим складніше аналізована модель системи. Досягається значна економія необхідного об’єму оперативної пам'яті і істотно знижується час, необхідний для вирішення завдання моделювання великих систем, що мають слабозв'язану ієрархічну структуру.

В роботі [309] обґрунтовується необхідність розвитку математичного моделювання режимів сучасних ЕЕС великих розмірів, стверджується, що це є актуальним завданням у зв’язку із реформуванням електроенергетики і становленням ринку електроенергії і потужностей. На даному етапі розвитку домінуючій моделлю дослідження режимів цих об'єктів є вузлові рівняння у формі балансу струмів, потужностей в декартовій або полярній системі координат [310], що призводить до проблеми рішення завдань великою розмірности. З розвитком ринку в електроенергетиці з'являються потреби в удосконаленні існуючих [311] і розробці нових моделей і алгоритмів, на основі яких створюватимуться сучасніші і ефективніші технології рішення завдань електроенергетики, у тому числі розрахунку і аналізу характерних сталих режимів, енергорозподілу [312], прогнозування електроспоживання і інших, передбачаючих високу швидкодію і якість результатів.

З математичної точки зору завдання розрахунку поточних і оптимальних усталених режимів зводиться до рішення систем нелінійних рівнянь алгебри, що пов'язано з великими труднощами. Математична модель сталого режиму будується у вигляді системи нелінійних рівнянь алгебри, що відбивають стан мережі, яку необхідно вирішити для отримання параметрів режиму. При цьому виникають два важливі моменти: вибір форми записи початкових

нелінійних рівнянь алгебри і вибір методу рішення отриманих нелінійних рівнянь алгебри [238].

Структура математичної моделі розрахунку усталеного режиму залежить також від форми завдання початкових режимних параметрів відносно вузлів. Режим роботи електричних систем характеризується рядом параметрів, які в процесі ведення режиму можна змінювати (регулювати). Кожен вузол електричної системи характеризується чотирма режимними параметрами: активною і реактивною потужністю, модулем і аргументом комплексної напруги.

Залежно від характеру завдання початкових режимних параметрів розрізняють наступні типи вузлів:

- вузол, для якого заданими є модуль і аргумент (кут) комплексної напруги, необхідно визначити активну і реактивну потужності;
- вузол, для якого заданими є активна потужність і модуль напруги, необхідно визначити реактивну потужність і аргумент (кут) напруги;
- вузол, для якого заданими є активна і реактивна потужності, необхідно визначити модуль і аргумент (кут) комплексної напруги.

Як відомо, нелінійні рівняння алгебри, що описують режим ЕЕС, можуть складатися в наступних основних формах:

- у формі Y - в рівняннях використовується матриця вузлової провідності;
- у формі Z - в рівняннях використовується матриця вузлових опорів.

Нині для вирішення систем нелінійних рівнянь усталого режиму широко використовуються наступні математичні методи: простої ітерації, Гауса – Зейделя, Ньютона – Рафсона, градієнтний метод, метод по параметру, модифікований метод Ньютона, Ньютона – Рафсона другого порядку, кібернетичного моделювання і розділення ОЕС на підсистеми.

Рівняння усталених режимів ЕМ в Y - формі складаються на підставі відомого з курсу теоретичних основ електротехніки методу вузлових напруг. В цьому випадку матриця Y формується досить просто і містить мале число

ненульових елементів.

Достатньою умовою збіжності по цьому методу є умова домінування діагональних елементів матриці Y над недіагональними. Для реальних мереж ця умова не завжди виконуватися: наприклад, у разі послідовного з'єднання гілок, що значно відрізняються за величиною опорів, підключення великих місткостей, наявності в заступних схемах довгих ліній надвисокої напруги, установок подовжньої і поперечної ємнісної компенсації.

Методи, що отримали раніше широке застосування, напрклад, простої ітерації, Гауса-Зейделя з прискорюючими коефіцієнтами і інші, незважаючи на просту програмну реалізацію і економне використання пам'яті комп'ютерів, не змогли забезпечити необхідну швидкість рішення завдань усталених режимів великих ЕЕС. Також у разі розрахунку важких режимів, близьких до граничних по аперіодичній статичній стійкості, вони не забезпечували гарантій збіжності ітераційних процесів. Тому нині більше уваги приділяється методу Ньютона – Рафсона і його різним модифікаціям. Основна перевага цього методу полягають в квадратичній збіжності. Проте обернення матриці Якобі для вирішення системи нелінійних рівнянь алгебри на кожному кроці ітераційного процесу у разі великої розмірності системи пов'язане зі значними витратами часу розрахунку і оперативної пам'яті комп’ютерів.

Відомі роботи [236, 313 - 315], у яких встановлено, що метод розрахунку усталених режимів з використанням матриці вузлової провідності стає неприйнятним у випадках наявності в заступних схемах ЕМ гілок з дуже малим опором, наприклад, вимикачі, а також коли опори окремих гілок сильно відрізняються один від одного.

Розглянуті методи розрахунку усталених режимів можна успішно використати для завдань, пов'язаних з рішенням режимів невеликих (приблизно до 1000 вузлів) енергосистем. Проблема ж визначення усталених режимів сучасних великих складних енергосистем вимагає принципово нових підходів.

У роботах [236, 301, 313, 316], досить широко використовується ідея

декомпозиції розділення великих енергосистем на окремі підсистеми і їх рішення окремо з подальшим узагальненням результатів [301 - 316]. Для вирішення завдань усталених режимів методом декомпозиції використовуються алгоритм Z-форми [301 - 316] і алгоритм Y-форми [301 - 316]. У більшості випадків ідея диакоптики – декомпозиції застосовується для Z-алгоритму розрахунку режимів.

Г. Крон [236] пропонує два типи діакоптіки: дифузного типу, коли ЕЕС представлена у вигляді радіально пов'язаних підсистем з одним загальним вузлом, і пуасонівського типу, коли ЕЕС представляється сукупністю ізольованих одна від однієї підсистем.

Як показують численні експериментальні розрахунки ітерації закінчуються за 3-4 ітерації.

4.3 Побудова моделі і структури розподіленого середовища для організації комплексної тренажерної підготовки персоналу МЕМ

Розроблена автором математична модель МЕМ ОЕС України дозволяє імітувати режими роботи ОЕС Укравши, регіональних енергосистем та еквівалентів енергосистем сусідніх держав. Дозволяє моделювати:

- сталі (усталені) режими;
- електромагнітні перехідні процеси;
- довготривалу динаміку (електромеханічні перехідні процеси).

Програмно-апаратний комплекс моделювання режимів забезпечує роботу із розрахунковими схемами з не менш ніж 10000 вузлів.

Програмне забезпечення має можливість моделювання (виконання розрахунків) "багатоострівного" режиму роботи ОЕС Укравши, та регіональних ЕЕС. Тобто, при відокремленні якого-небудь регіону, або декількох регіонів від основної частини ОЕС Укравши, процес розрахунку режиму і моделювання роботи "островів" ОЕС Укравши не припиняється. В разі знеструмлення відокремленого енергорайону, відображаються стан комутаційних апаратів, та основні параметри всіх частин мережі (напруги на

шинах, частота, перетоки потужності по ЛЕП та АТ, навіть при нульових значеннях, враховується зарядний струм ЛЕП при її односторонньому відключенні). В кожному енергорайоні автоматично (по визначеним правилам) визначається балансуючий вузол. Для всіх вузлів схеми розраховуються напруги, для гілок - значення активної, реактивної потужності і струму. Розраховані параметри режиму відображаються на комутаційних схемах енергооб'єктів та структурній схемі енергосистеми, а також наводяться в табличних формах.

Модель комплексу забезпечує розрахунок втрат в електричних мережах усіх класів напруги, що задіяні в розрахунковій моделі.

ПЗ має можливість моделювання роботи САРЧП (включаючи роботу центрального регулятора) в кожному районі регулювання ("острів Бурштинської ТЕС" та ОЕС України, ЄЕС Росії, тощо).

ПЗ має можливість моделювання роботи РЗ та ПА (АЧР, АПН, АПАТ, АЛАР, САПАХ, АРС, ЧАПВ, ділильної автоматики (струмової та частотної), автоматики виділення електростанцій на власні потреби, САВН (САОН), АРВЛ (АРОЛ), АРВДЛ (АРОДЛ) тощо).

Режимна модель МЕМ ОЕС України імітує зміну параметрів режиму енергосистеми у різноманітних аварійних ситуаціях, таких як відключення комутаційного обладнання, ліній електропередачі, енергоблоків електростанцій, зміни навантаження енергоблоків та споживання, зміна частоти та напруги, випадіння з синхронізму, тощо. Розрахунки потокорозподілу МЕМ ОЕС України виконуються з періодичністю, що не перевищує 3 сек. Передбачена можливість моделювання аварійних ситуацій і поведінки (реагування) ОЕС України з циклічністю, яка відповідає псевдореальному, прискореному та сповільненому часу.

Процеси довготривалої динаміки відображаються в масштабі реального часу з заданою точністю. При розрахунках погано спостережуваних режимів розрахунки продовжуються виконуватися з автоматичним зниженням точності та затримкою масштабу часу.

При розрахунку довготривалої динаміки виконуються взаємозв'язок між комутаційною та режимною моделями.

Генератори електростанцій та еквівалентні генератори моделюються як з використанням повної моделі, так і з використанням моделі Ex = const.

В моделі МЕМ ОЕС України враховується залежність навантаження споживачів від частоти та напруги, причому залежність споживання від напруги враховується по статичним характеристикам окремо для кожного вузла навантаження.

Теплова частина електростанцій в довготривалій динаміці може моделюватися спрощено - для контролю параметрів теплоносія при довготривалому протиаварійному тренуванні, з можливістю, на перспективу, більш детального моделювання теплової частини (парогенеруючого устаткування).

Необхідність моделювання електромеханічних перехідних процесів в ОЕС України під час сеансу тренування обумовлюється двома причинами:

а) можливістю порушення синхронної динамічної стійкості ОЕС при різних комутаційних змінах і виникнення асинхронного ходу на лініях електропередачі. Це у свою чергу викликає роботу комплектів ділильного захисту (ТДА), АЛАР і поділ енергосистеми на не синхронно працюючі частини;

б) можливістю відмови дії комплектів АЛАР при виникненні асинхронного ходу на лінії електропередачі й необхідності оперативному персоналу самостійно виявляти й усувати асинхронний хід відключенням відповідних ліній електропередачі.

Якщо в першому випадку оперативному персоналу необов'язково відображати зміни параметрів ОЕС, що супроводжують асинхронний хід, тому що ці процеси короткочасні й диспетчер не зможе їх правильно сприйняти й проаналізувати, то в другому випадку необхідно й моделювати, і вірно відображати зміни параметрів режиму ОЕС, що супроводжують асинхронний хід.

Передбачено моделювання роботи автотрансформаторів з продовжним та поперечним регулюванням.

Модель комплексу має можливість вводу в бази даних об'ємів черг ГАВ (ГАО), СГАВ (СГАО), та застосування цих графіків відключень споживачів при проведенні тренувань.

При побудові сценарію ТрЗ забезпечено моделювання наступних подій:

- детерміновані (завчасно визначені події) - відключення ЛЕП, енергоблоків, тощо;
- умовні - на основі порівняння фактичного і заданого значень параметрів (наприклад, частота);
- вірогідні - події, дія яких може бути визначена вірогідністю їх виникнення;

При безпосередньому проведенні міжсистемних протиаварійних тренувань за раніш складеним сценарієм забезпечена можливість зміни встановленого сценарію (при необхідності), та переходу до іншого сценарію проти аварійного тренування. При проведенні міжсистемних тренувань інструктор енергосистеми має можливість інформувати персонал, що тренується, про змінений сценарій (змінена частина сценарію) з деталізацією про зміни. Інструктор від енергосистеми повинен має можливість зміни сценарію на обладнанні, що належить до оперативного управління цієї енергосистеми.

Для забезпечення моделювання найбільш наближеного до реальних умов режиму роботи МЕМ ОЕС України (стану комутаційного обладнання на енергооб'єктах, виведеного в ремонт обладнання мереж, стану та навантаження енергоблоків) передбачена можливість обміну даними між енергосистемами.

Передбачено застосування наступних варіантів проведения протиаварійних тренувань оперативного-диспетчерського персоналу:

- автономне, в кожній енергосистемі, з можливістю моделювання локальних (в межах однієї енергосистеми) аварійних ситуацій таких,

як перевантаження розподільчих та магістральних мереж, автотрансформаторів, виділення енергоблоків електростанцій на власні потреби чи на виділений енергорайон, відключення споживачів тощо;

– проведення міжсистемних протиаварійних тренувань.

Схеми організації обміну даними в першому варіанті наведено на Рис. 4.2, а в другому – на Рис. 4.3.

В першому варіанті після передачі достовірних даних з БД "Оцінки стану мережі" кожної з енергосистем в загальну БД "Оцінки стану мережі" НЕК "Укренерго", на вимогу користувача (інструктора енергосистеми чи НЕК "Укренерго" або УТЦ Дніпровської ЕЕС, дані з загальної БД "Оцінки стану мережі" передаються до БД окремих ЕЕС. При цьому, для кожної енергосистеми сформована інформаційна модель ОЕС України (з еквівалентами сусідніх енергосистем). Після отримання вихідних даних інструктор кожної з енергосистем має можливість доопрацювання вихідних даних, складання сценарію протиаварійного тренування, та безпосередньо - проведения протиаварійного тренування.

В даному варіанті інструктор окремої ЕЕС має можливість керування моделями як обладнанням в межах своєї енергосистеми, так і обладнанням в межах усієї моделі ОЕС України (інших енергосистем).

В другому випадку після передачі достовірних даних з БД "Оцінки стану мережі" кожної з енергосистем в базу даних "Оцінки стану мережі" НЕК "Укренерго", інструктор від НЕК "Укренерго" має можливість коригувати дані і підготувати вихідні дані та сценарії ТрЗ.

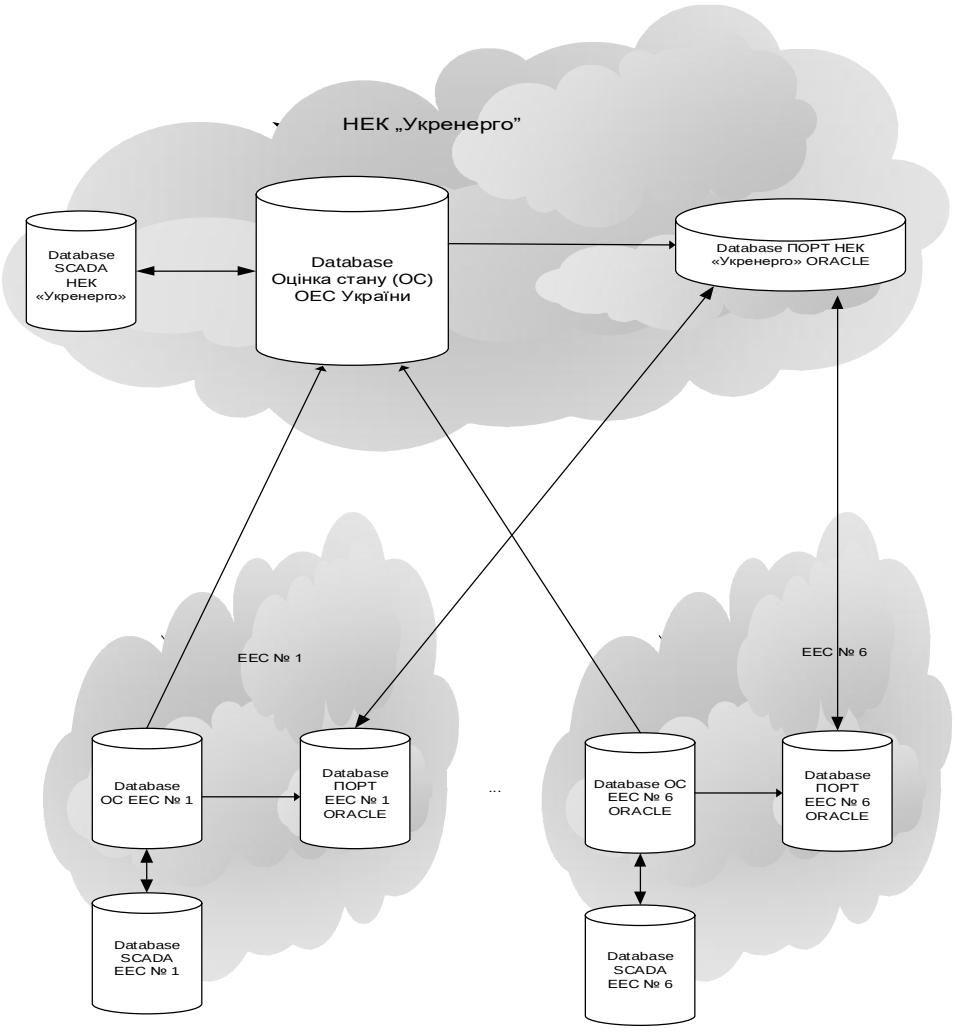


Рис. 4.2. Структура взаємодії інформаційних потоків для локального ТрЗ

Інструктори з енергосистем мають можливість доступу до обладнання тільки своєї енергосистеми (на основі оперативної' підпорядкованості) - за допомогою віддаленого доступу до центральної БД, що буде розміщена в НЕК "Укренерго". Тобто, забезпечено суворе розмежування прав доступу між персоналом ЕЕС.

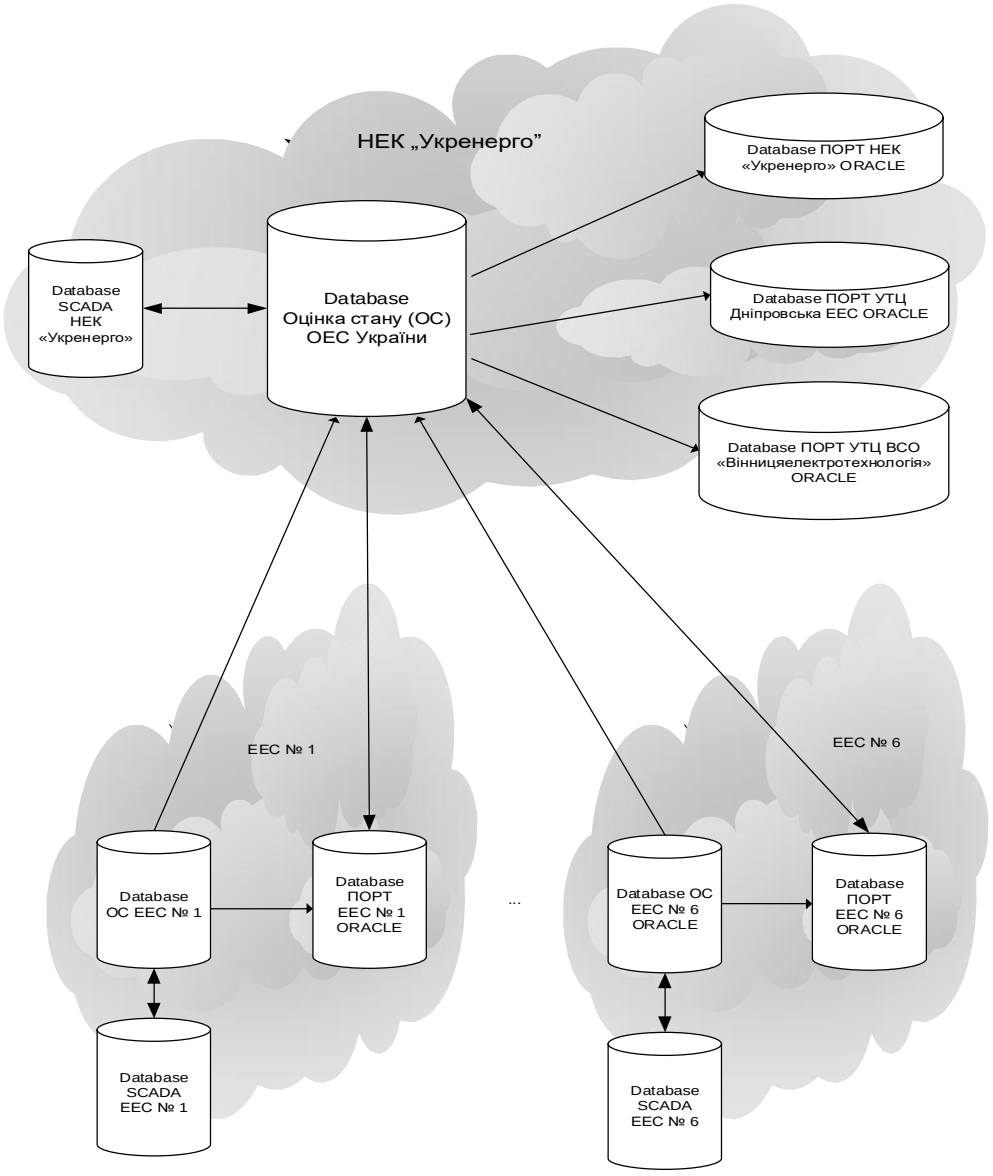


Рис. 4.3. Структура взаємодії інформаційних потоків для міжсистемного ТрЗ

Зв'язок між вузловими серверами та сервером центрального апарату забезпечується в режимі on-line за допомогою комп’ютерних веб-технолопй. При затримці передачі даних у часі від будь-якої із систем, архів БД формується з міткою часу - для синхронізації БД та для оцінки їх стану.

Експертна система оцінки результатів ТрЗ оцінює дії диспетчерів, з якими проводиться протиаварійне тренування, за допомогою розробленої автором інтегральної оцінки компетентності – енергетичним рейтингом.

Дії диспетчерів повинні відповідати правилам виконання оперативних перемикань. Ці правила включені в експертну систему інструктором. Забезпечені спеціальні інструментальні засоби, які дозволяють вводити нові правила, робити в них поправки та видаляти застарілі.

ПЗ забезпечує можливість протоколювання усіх дій, які виконуються в середовищі диспетчерського тренажеру. Протокол дій включає:

- виконання сценаріїв тренувань;
- дії систем автоматичного регулювання та ПА;
- команди Інструктора та керуючі дії;
- відповідні дії оперативного персоналу, з яким проводиться тренування;
- дані про конкретне протиаварійне тренування, яке виконувалось (назва схеми, сценарію, який використовується для створення аварійної ситуації, тощо);
- дію ПА та РЗ;
- фіксацію часу початку протиаварійного тренування та кожної події;
- дії, які виконуються у відповідності з закладеним автоматичним сценарієм тренування;
- команди інструктора протиаварійного тренування;
- виконання команд диспетчера;
- результати роботи експертної системи оцінювання дій диспетчера.

ПЗ передбачає можливість призупинення моделювання режиму роботи ОЕС України, продовження моделювання, та зберігання поточного режиму в архівах з використанням простого та наочного інтерфейсу.

Також передбачена on-line підказка (help) по всім підсистемам як для систем відображення, так і on-line допомога при побудові сценаріїв ТрЗ, підготовці вихідних даних, обміну даними тощо. Реалізована можливість роздрукування довідково-інформаційних матеріалів для забезпечення подальшої підготовки, модернізації і поліпшення інструктивних матеріалів.

4.4 Веб-орієнтована електронна система навчання та тренажерної підготовки оперативно-диспетчерського персоналу, методологічна підтримка.

Програмні засоби, призначені для конструювання, створення та підтримки навчальної бази тренажерних систем підготовки персоналу в енергетиці, мають підтримувати хмарну архітектуру, віртуалізацію, а також забезпечити навчання в електронній формі із застосуванням таких сучасних освітніх технологій, як змішане і дистанційне навчання.

До основних критеріїв вибору програмного забезпечення сучасних віртуальних начальних центрів можна віднести наступні:

- наявність засобів розробки контенту: редактор вмісту електронних освітніх матеріалів має підтримувати роботу не лише з текстовими, але й аудіо-, відео- та графічними файлами найбільш поширених форматів, а також інтегрувати навчальні матеріали різного призначення в єдине середовище;
- зручність використання: інтуїтивно зрозумілий інтерфейс програмного засобу, проста навігація полегшують розроблення контенту тим спеціалістам, які мають великий досвід роботи в енергетичній галузі, але не володіють глибокими знаннями в програмуванні. Зручність адміністрування та оновлення контенту на базі існуючих шаблонів підвищують якість технічної підтримки. Простота переходу від одного розділу до іншого, швидкий доступ до меню допомоги, легкість спілкування з інструктором-викладачем спрощують роботу з вже створеними навчальними матеріалами;
- розвинена функціональність, тобто наявність таких функцій, як форуми, чати, аналіз активності навчених, управління курсами і навченими та інше;
- система вимірювання рівня знань має містити інструменти, які дозволяють в режимі онлайн оцінити не тільки знання персоналу, що навчається, але й уміння вирішувати нетипові завдання, які виникають у професійній діяльності, здатність працювати в умовах неповної інформації. Зазвичай

така система включає інструменти для створення тестів, практичних завдані й засоби контролю активності персоналу на професійних освітніх форумах;

- система управління компетентністю персоналу включає такі інструменти, як аналіз прогалин у навичках, планування наступництва, аналіз і управління компетенціями та профілювання;
- модульність: сучасні системи дистанційного навчання дозволяють створювати окремі мікромодулі або блоки навчального матеріалу, які можуть бути використані в різних курсах;
- стабільність забезпечує безперервне навчання у різних режимах роботи системи, зокрема при високій активності користувачів, а також швидке відновлення системи після виходу її з ладу;
- вартість програмного забезпечення складається, як правило, з вартості самого продукту, витрат на його впровадження, розробку навчальних матеріалів, супровід системи, а також наявність або відсутність обмежень за кількістю ліцензій на тих, хто навчається;
- масштабованість: здатність підтримувати велику кількість навчальних ресурсів та користувачів, наприклад, включення до складу слухачів персоналу не тільки енергетичного сектору, а й інших галузей економіки;
- доступність навчального контенту: персонал повинен мати доступ до навчальних ресурсів незалежно від їх розміщення в часі і просторі;
- кросплатформеність: програмні засоби, призначені для розроблення та керування контентом тренажерних систем, не мають бути прив'язані до конкретної операційної системи або середовища, як на серверному рівні, так і на рівні клієнтських машин; користувачі можуть використовувати стандартні засоби без завантаження додаткових модулів, програм тощо;
- сумісність програмного забезпечення та можливість багаторазового використання навчальних матеріалів. Для систем дистанційного навчання розроблено набір стандартів та специфікацій, наприклад, SCORM [317] та Tin Can [318], які спрощують комунікації між навчальними системами,

однак останнім часом розробники відмовляються від стандартів [319], пропонуючи рішення SaaS (програмне забезпечення як послуга);

- перспективи розвитку: програмне середовище для створення навчальної бази тренажерних систем має бути таким, що розвивається, постійно оновлюватись, підтримувати нові освітні технології та стандарти;
- якість технічної підтримки: забезпечення працездатності, стабільності роботи тренажерної системи, захист від зовнішніх впливів, усунення помилок й уразливості як із залученням фахівців компанії-розробника, так і фахівцями служби підтримки організації, яка експлуатує тренажерну систему.

Донедавна інструменти розробки систем електронного навчання впроваджувались в Україні повільно, в основному у зв’язку з недостатнім розвитком і поширенням технічних засобів інформаційних і телекомунікаційних технологій. Нині створені технічні передумови для широкого використання електронного навчання, триває вдосконалення програмного забезпечення. У всьому розмаїтті засобів організації електронного навчання можна виділити наступні групи програмних продуктів:

- авторські програмні продукти: як правило, це електронні підручники, дидактичні матеріали, пакети прикладних навчальних програм та інші елементи дистанційних курсів. Авторські програмні продукти зазвичай створюються одним розробником чи групою ентузіастів, і не можуть застосовуватись в якості основних програмних засобів створення навчальної бази тренажерних систем; проте такі програмні продукти можуть входити до складу методичного забезпечення навчальної бази віртуальних навчальних центрів;
- системи керування вмістом (Content Management Systems, CMS): до них відносяться програмні продукти, які здатні підтримувати декілька користувачів у середовищі спільного використання і призначені для створення і модифікації цифрового контенту, наприклад, текстових даних, аудіо- та відео- матеріалів, програмного коду тощо. Системи керування вмістом

зазвичай містять розвинені засоби розробки контенту, велику кількість шаблонів та плагінів, процедури оптимізації контенту та структури, майстри встановлення та оновлення програми, журнали перевірки безпеки, підтримують контроль версій, дозволяють керувати дозволами для окремих користувачів та груп, є модульними, масштабованими, кросплатформними та розширюваними. Значна кількість систем керування контентом розробляються на умовах загальної громадської ліцензії (General Public License, GNU). Разом з тим, фахівці, які здійснюватимуть технічну підтримку систем даного типу, повинні володіти навичками програмування та адміністрування складних систем. Варто також відзначити, що реалізацію великої системи віртуальних навчальних центрів засобами CMS ускладнює той факт, що в них відсутній організаційний компонент управління процесом навчання. Найбільш відомими освітньо-орієнтованими системами керування вмістом, які мають українську локалізацію, є Drupal [320] і Joomla! [321];

- системи управління навчанням (Learning Management Systems, LMS) [299, 322, 323]: на відміну від систем керування вмістом, серед яких освітні CMS є лише одним з напрямів розвитку, програмне забезпечення LMS орієнтоване на управління навчальною діяльністю. Функції адміністрування, документування, відстеження, звітності спрямовані на створення матеріалів для навчання та розвитку, а такі завдання, як надання навчального контенту визначеним користувачам у потрібний час, контроль використання навчальних ресурсів, організація взаємодії з викладачем, окремими користувачами та групами, автоматизовані. Важливою складовою систем управління навчанням є наявність вбудованої системи керування компетентністю тих, хто навчається, яка дозволяє аналізувати компетенції персоналу, виявляти прогалини у навичках та планувати процес навчання, надаючи кожному користувачу персональні можливості для найбільш ефективного засвоєння матеріалу, а менеджеру навчального процесу – необхідні інструменти для удосконалення програм навчання та комунікацій. LMS підтримують змішане навчання, мають надійні механізми захисту,

необхідні для розгортання розподіленої мережі віртуальних навальних центрів, можуть бути синхронізовані з системами планування ресурсів підприємства і управління персоналом. Згідно з дослідженнями американського ринку LMS, опублікованими [299], лідерами є програмні продукти Blackboard, Canvas та Moodle, причому доля продуктів, які пропонують програмне забезпечення як послугу (Software as a service, SaaS), невпинно зростає. На корпоративному ринку активно просувають свої LMS-продукти Saba Software, SuccessFactors Learning, Voniz Inc, SumTotal Systems, Docent, WBT Systems, Click2Learn та IBM. Ресурси [102], [324] надають огляд систем дистанційного навчання. Серед продуктів українського ринку варто відзначити платформу Prometheus [325], Asnovator [326], Collaborator [323] та EDUGET [327]. Слід зазначити, що українські заклади вищої освіти, які мають дистанційну форму навчання, надають перевагу Moodle [328];

- системи управління навчальним контентом (Learning Content Management Systems, LCMS) широко використовуються в корпоративних комп’ютерних мережах. На відміну від LMS, подібні системи концентруються на завданнях управління змістом навчальних програм, а не процесом навчання, і орієнтовані не на менеджерів і студентів, а на розробників контенту, фахівців з методологічного компонування курсів і керівників проектів навчання. У основі LCMS лежить концепція представлення змісту навчання як сукупності багаторазово використовуваних навчальних об'єктів зі своєю цільовою аудиторією і певним контекстом використання. Незважаючи на численні варіації можливостей LCMS, вона повинна включати наступні ключові компоненти: репозиторій навчальних об'єктів, завдяки якому забезпечується можливість реалізації хмарних технологій, швидке оновлення шаблонів, бібліотек та інших об’єктів; розроблення складових частин LCMS на умовах аутсорсингу, що значно розширює коло фахівців, які можуть одночасно працювати з системою: творців контенту, дизайнерів, розробників шаблонів тощо; інтерфейс відображення, який може бути налагоджений для конкретної організації з метою трекінгу результатів, різних варіантів

оцінювання і зворотного зв'язку від користувачів. Розвинені засоби адміністрування, які використовуються для управління обліковими записами користувачів, керуванням курсами, відстежуванням результатів, складання звітів про процес навчання тощо дозволяють розробляти індивідуальні профілі навчання. Системи управління навчальним контентом активно впроваджуються лише останні декілька років, тому ринок LCMS недостатньо зрілий, але такі компанії, як SAP (SAP Learning Solution) [329], Oracle (iLearning [330] та PeopleSoft Enterprise Learning Management [331]), розглядають системи даного типу не тільки як інфраструктуру для електронного навчання, але й як частину корпоративної IT-інфраструктури.

Розглянуті вище можливості систем LMS і LCMS показують, що вони мають багато спільних рис, і межу між ними провести все важче, оскільки з розвитком ринку розробники LCMS додають функції, характерні для LMS, і навпаки.

На Рис. 4.4 представлені в узагальненій формі можливості і відмінності між системами LMS і LCMS за результатами дослідження Брендона Хала (Brandon Hall). Як видно з Рис. 4.4, LMS і LCMS мають різні цілі: головне завдання LMS – автоматизувати адміністративні аспекти навчання, а LCMS зосереджена на управлінні контентом навчальних об'єктів.

До спільних рис можна віднести наступні: обидві системи керують змістом курсів і відстежують результати навчання, вбудовані інструменти можуть керувати і відстежувати контент до рівня навчальних об'єктів. У той же час LMS може керувати і відстежувати результати змішаного навчання, яке поєднує Електронний ресурс вміст, заходи в навчальних класах, зустрічі у віртуальних навчальних класах та інші джерела. На противагу цьому, LCMS не може керувати змішаним навчанням, але може керувати контентом на рівні нижче навчального об'єкту, що, наприклад, спрощує реструктуризацію онлайн-контенту у межах організації.

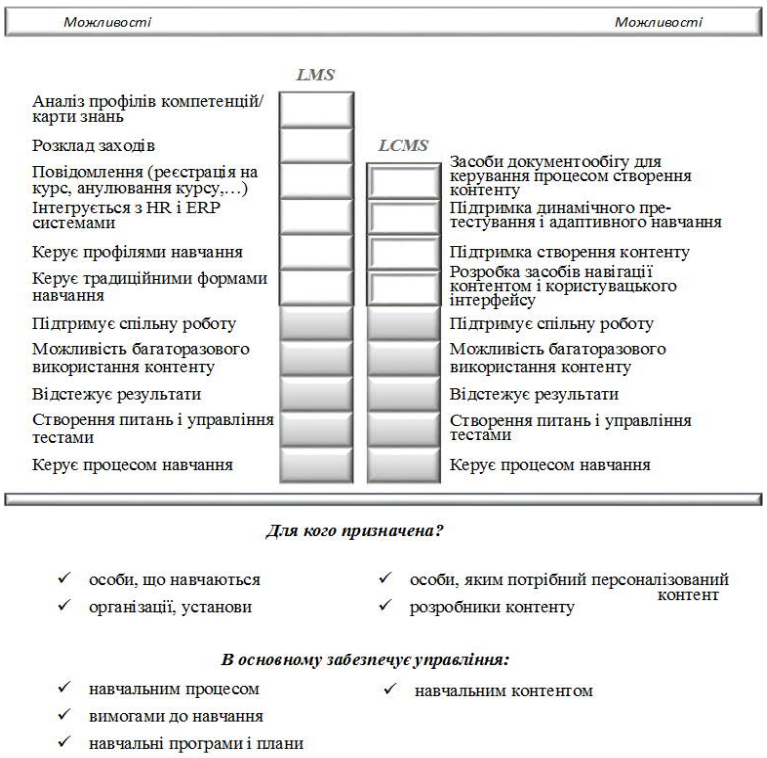


Рис. 4.4. Спільні можливості та відмінності між системами LMS і LCMS: – спільні можливості, – можливості, притаманні тільки LMS, – можливості, притаманні тільки LCMS

Додатково, сучасні LCMS можуть динамічно будувати навчальні об'єкти відповідно до профілів користувачів або стилів навчання. Якщо обидві системи дотримуються спільних стандартів (наприклад, SCORM) інформація може бути легко переміщена між системами на рівні навчальних об’єктів.

Хоча деякі LMS мають авторські застосування і можливості управління контентом, а LCMS пропонують мінімальні функції LMS, спроби використання однієї системи для виконання обох завдань можуть не завжди бути оптимальними. Оскільки LCMS зосереджені на авторських завданнях і доставці контенту, то їх інструментальні засоби для вирішення цих завдань більш розвинені, ніж ті, які доступні в LMS. З іншого боку, LMS пропонує більшу кількість можливостей, які є важливими для адміністраторів курсів з великою кількістю студентів, порівняно з базовими функціями, які доступні в LCMS.

На основі аналізу існуючих LMS/LCMS систем з відкритим кодом, відповідно до критеріїв вибору програмного забезпечення для віртуальних

начальних центрів, запропоновано в якості інструментального середовища навчальної бази віртуальних тренажерних систем в енергетиці обрати платформу Moodle (Modular Object-Oriented Dynamic Learning Environment) [328].

Moodle – це середовище дистанційного навчання, призначене для створення якісних дистанційних курсів; використовується більш ніж у 100 країнах світу університетами, школами, компаніями і незалежними викладачами. За своїми можливостями Moodle успішно конкурує з відомими комерційними системами керування навчальним процесом, такими як Blackboard і Canvas, у той же час вигідно відрізняється від них тим, що поширюється у відкритих початкових кодах, що дає можливість локалізувати її під особливості кожного освітнього проекту, доповнити новими.

Розроблення дистанційних курсів на платформі Moodle можливо шляхом вибору одного з наступних типів форматів: навчальні модулі без прив'язки до календаря (форум і структура) та навчальні модулі з прив'язкою до календаря (календар). Курс складається з довільної кількості таких ресурсів, як веб-сторінки, книги, посилання на файли, каталоги, і може містити довільну кількість інтерактивних елементів.

У результаті проведення огляду й аналізу наявних елементів побудови дистанційних курсів Moodle, для створення дистанційних курсів мережі віртуальних начальних центрів, запропоновано обрати наступні інструменти:

Лекція (Рис. 4.5) підносить навчальний матеріал, який складається з набору логічно впорядкованих сторінок, у доступній формі. У кінці кожної сторінки можна поставити запитання: якщо відповідь правильна, то той, хто навчається, переходить на наступну сторінку, інакше – залишається на поточній, забезпечуючи таким чином засвоєння матеріалу.

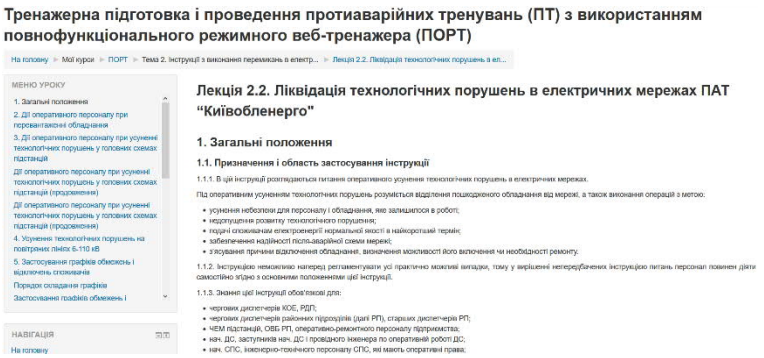


Рис. 4.5. Лекція у курсі «Тренажерна підготовка і проведення протиаварійних тренувань (ПТ) з використанням повнофункціонального режимного веб-тренажера (ПОРТ)»

Пояснення дозволяє поміщати текст і графіку на головну сторінку курсу (Рис. 4.6). За допомогою такого напису можна скласти короткий опис будь-якої теми, сформулювати завдання тижня або дати пояснення щодо використовуваного інструменту.

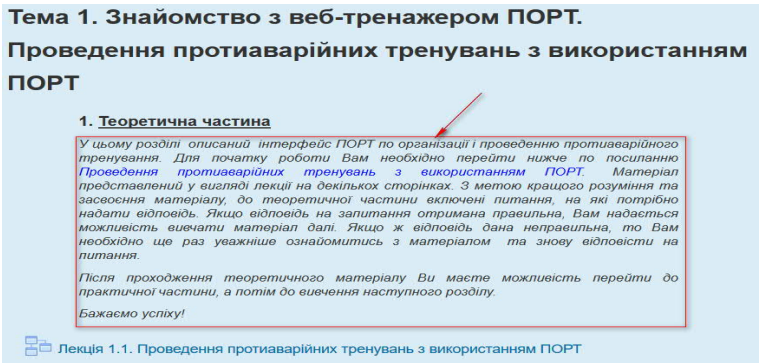


Рис. 4.6. Пояснення у курсі «Тренажерна підготовка і проведення ПТ з використанням ПОРТ»

Тести: цей інструмент дозволяє розробнику курсу створити базу тестових запитань. У дистанційних курсах з підготовки персоналу в енергетиці доцільно використовувати наступні види запитань: запитання в закритій формі (множинний вибір) (Рис. 4.7, з вибором вірно/не вірно (Рис. 4.8), на відповідність (Рис. 4.9), коротка текстова відповідь (Рис. 4.10), а також обчислювані запитання.

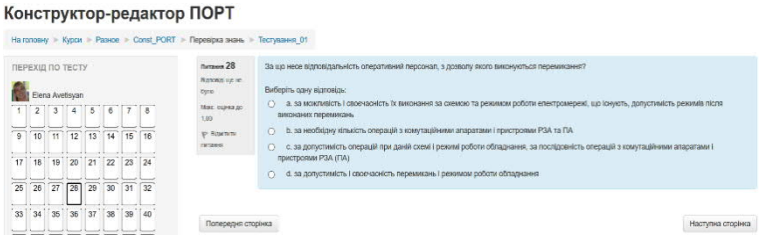


Рис. 4.7. Запитання в закритій формі у курсі «Конструктор-редактор ПОРТ»

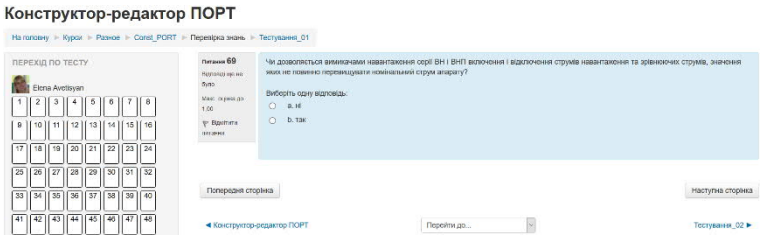


Рис. 4.8. Запитання з вибором вірно/не вірно у курсі «Конструктор-редактор ПОРТ»

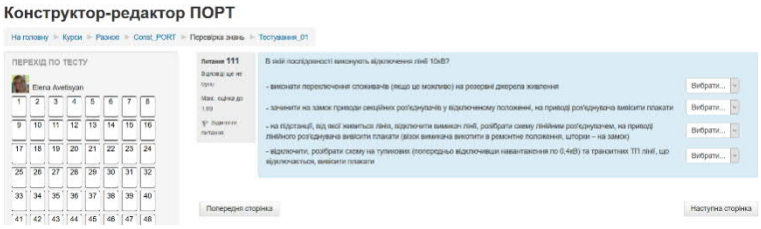


Рис. 4.9. Запитання на відповідність у курсі «Конструктор-редактор ПОРТ»

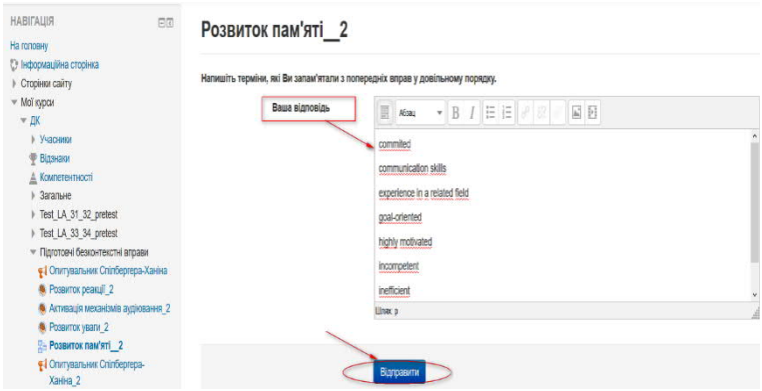


Рис. 4.10. Коротка текстова відповідь у курсі «Підсистема вправ для формування термінологічної компетентності в усному двосторонньому перекладі»

Усі запитання зберігаються у базі знань (Рис. 4.11) і можуть бути згодом використані знову в інших курсах з підготовки персоналу.

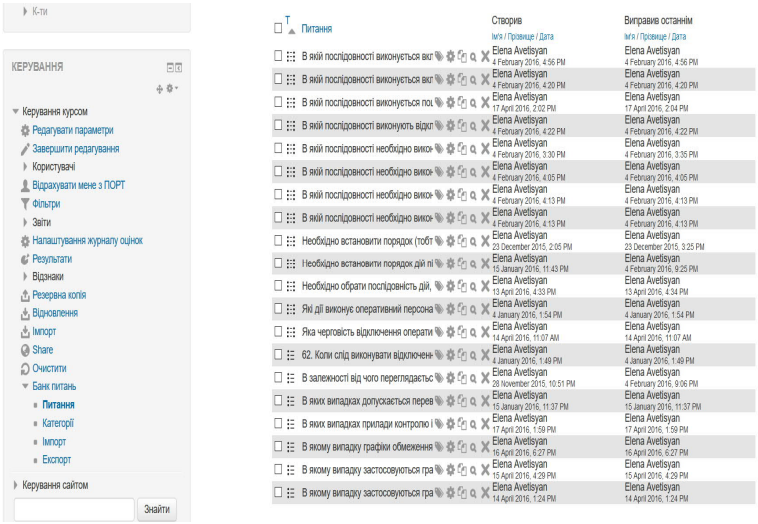


Рис. 4.11. База знань у курсі «Конструктор-редактор ПОРТ»

Завдання дозволяють розробнику курсу створювати завдання, які вимагають від персоналу більше часу на підготовку і виконання. Наприклад, інструктор-викладач може запропонувати завдання, яке передбачає вивчення нормативних документів, або самостійне проходження протиаварійних тренувань (Рис. 4.12). Результати виконання завдання в електронному вигляді в одному з форматів, запропонованих інструктором, необхідно завантажити на сервер.

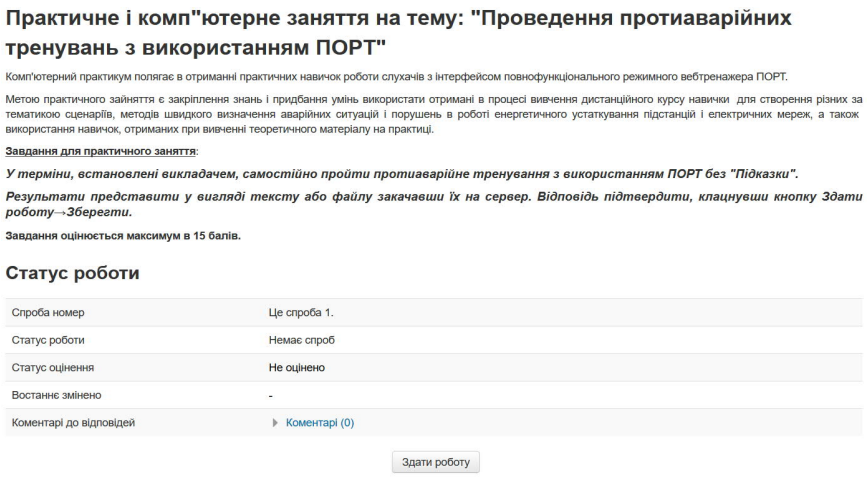


Рис. 4.12. Завдання у курсі «Тренажерна підготовка і проведення ПТ з використанням ПОРТ»

Опитування може бути корисним в процесі дослідження проблеми для виявлення загальної думки, а також коли до тренування залучено групу фахівців. Застосування цього інструменту у системі підготовки персоналу в

енергетиці дозволяє досягти освітніх цілей на рівнях аналізу, оцінювання та на творчому рівні, згідно з таксономією Блума-Андерсон. Також опитування можна застосувати з метою швидкого опитування та для проведення голосування. Фрагмент опитування та його налаштування наведені на Рис. 4.13 та Рис. 4.14.

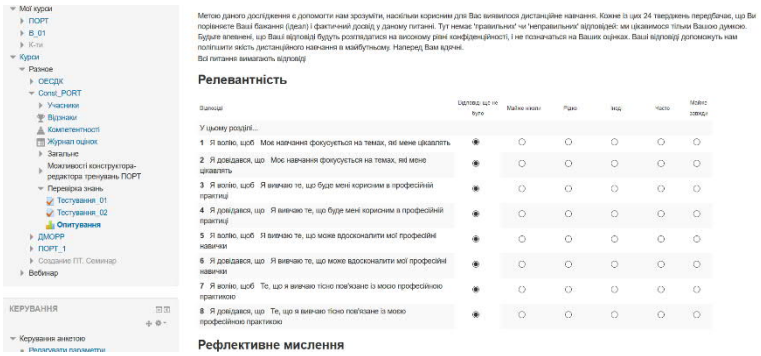


Рис. 4.13. Опитування у курсі «Конструктор-редактор ПОРТ»

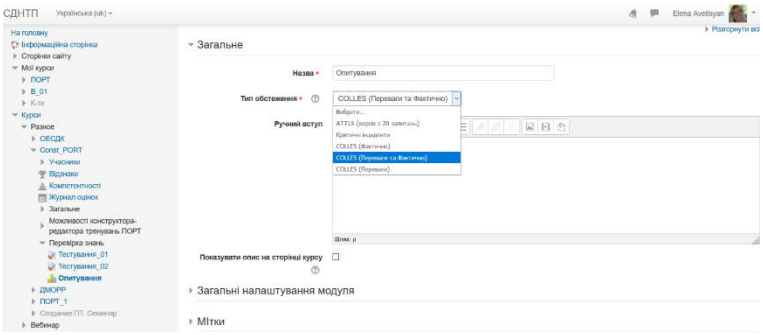


Рис. 4.14. Налаштування опитування у курсі «Конструктор-редактор ПОРТ»

Анкети: цей інструмент надає декілька способів анкетування персоналу, які можуть бути корисні при оцінюванні і стимулюванні навчання в дистанційних курсах. Налаштування модуля *Анкета* показано на Рис. 4.15.

Глосарій – інструмент, за допомогою якого створюється основний словник понять, які використовуються програмою, а також словник основних термінів кожної лекції (Рис. 4.16).

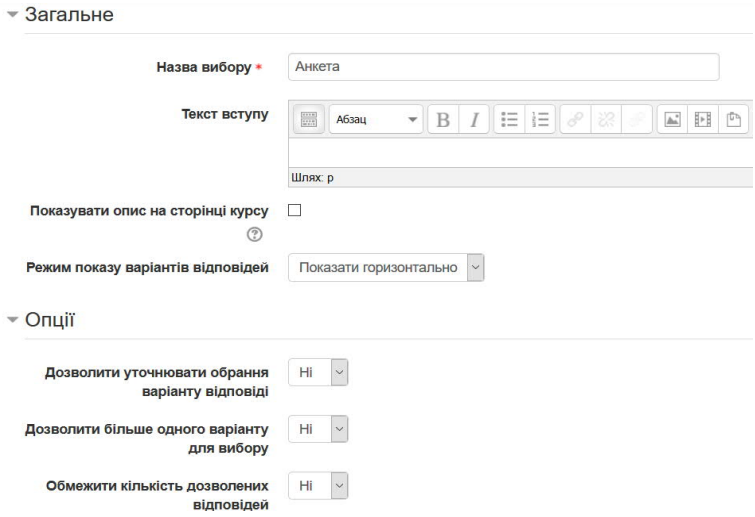


Рис. 4.15. Налаштування модуля Анкета у курсі «Конструктор-редактор ПОРТ»

Корисним інструментом системи Moodle є *довідкова система* (або *модуль Вікі*), яка дозволяє створювати документ декількома людьми паралельно за допомогою простої мови розмітки прямо у вікні браузеру, тобто з його допомогою персонал може працювати разом за принципами вікі [332], додаючи, розширюючи і змінюючи вміст.

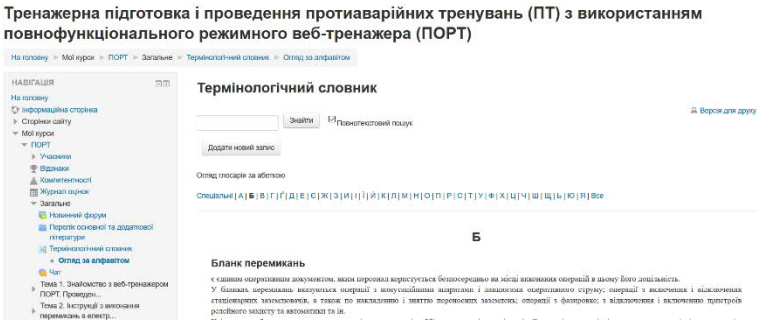


Рис. 4.16. Глосарій у курсі «Тренажерна підготовка і проведення протиаварійних тренувань з використанням повнофункціонального режимного веб-тренажера ПОРТ»

Приклад модуля Вікі у курсі «Тренажерна підготовка і проведення протиаварійних тренувань з використанням ПОРТ» показана на Рис. 4.17. На рисунку наведено розроблення схеми тренування, над якою працюють фахівці з різних відділів. Зазначимо, що попередні версії документу не видаляються і доступні для перегляду, редагування та, у разі необхідності, відновлені.

Окрім створення схеми тренування та довідкової системи, таким чином може бути організована робота над інструкціями, положеннями, регламентами та іншими нормативними документами, які потребують залучення фахівців та керівників різного рівня.

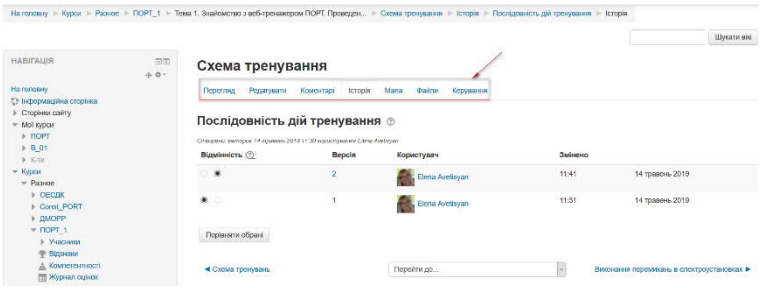


Рис. 4.17. Модуль Вікі у курсі «Тренажерна підготовка і проведення протиаварійних тренувань з використанням повнофункціонального режимного веб-тренажера ПОРТ»

Варіюючи поєднання різних елементів курсу, інструктор організовує подання навчального матеріалу таким чином, щоб форми навчання відповідали цілям і завданням конкретного зайняття. Система Moodle підтримує колаборативні технології навчання: дозволяє організувати навчання в активній формі, в процесі спільного рішення навчальних завдань, взаємообміну знаннями. Окрім зазначених вище інструментів *Завдання*, *Опитування*, *модуль Вікі*, інструмент *Семінар* дозволяє організувати збір та аналіз результатів тренування з виставленням колегіальної оцінки (Рис. 4.18).

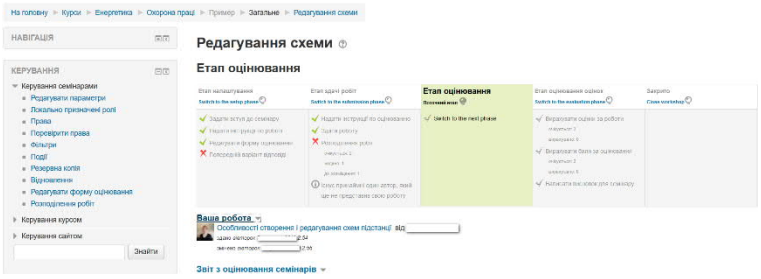


Рис. 4.18. Семінарське заняття у курсі «Тренажерна підготовка і проведення протиаварійних тренувань з використанням повнофункціонального режимного веб-тренажера ПОРТ»

Спілкуючись у *форумах* (Рис. 4.19) та *чатах* (Рис. 4.20), фахівці пришвидшують вирішення нагальних проблем, а також можуть обмінюватись

будь-яким цифровим контентом (Рис. 4.21), таким, як документ текстового процесора або електронна таблиця, а також можуть вводити текст прямо в поле на сайті за допомогою вбудованого текстового редактора.

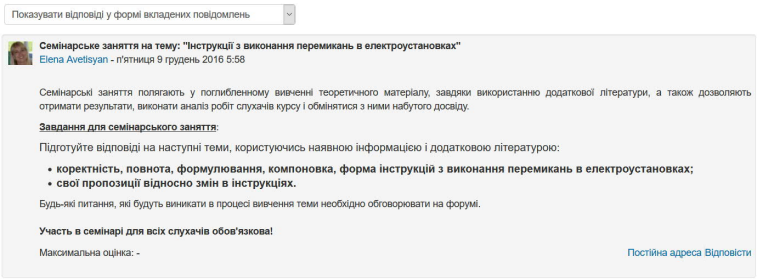


Рис. 4.19. Вікно форуму у курсі «Створення протиаварійних тренувань із застосуванням ПТК ОП++»

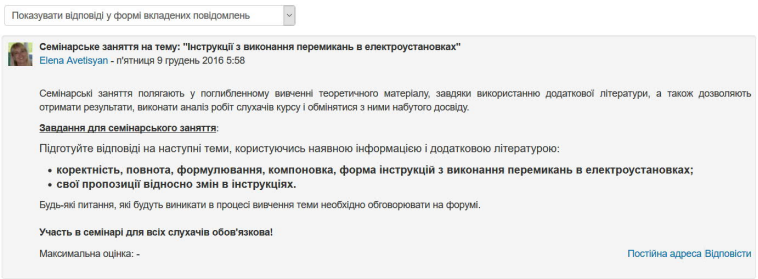


Рис. 4.20. Вікно чату у курсі «Створення протиаварійних тренувань із застосуванням ПТК ОП++»

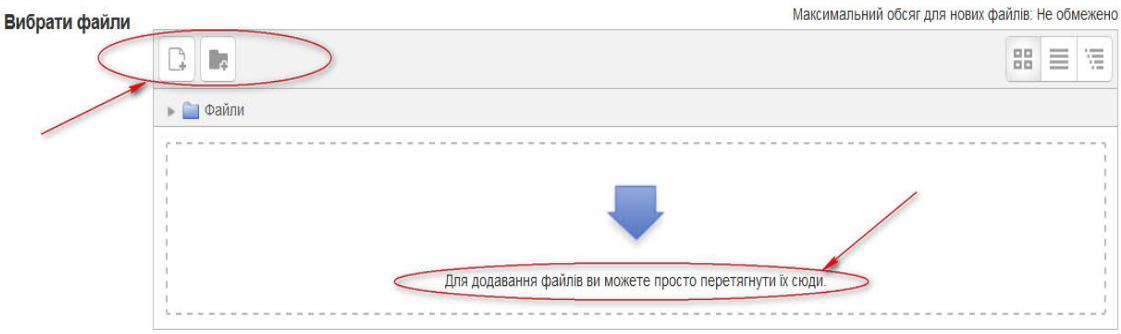


Рис. 4.21. Вікно обміну файлами

Також система Moodle пропонує низку інструментів для аналізу результатів навчання та зворотного зв’язку з тими, хто навчається. На Рис. 4.22 показано вікно рецензування робіт тих, хто навчається. Інструктор може обрати систему оцінювання: бальну, словесну тощо (Рис. 4.23, а), налаштувати її (Рис. 4.23, б), та налаштувати журнал оцінок відповідно до конкретного освітнього проекту (Рис. 4.24).

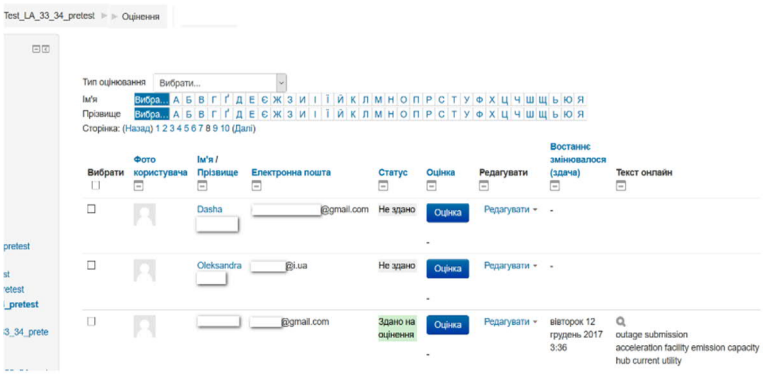
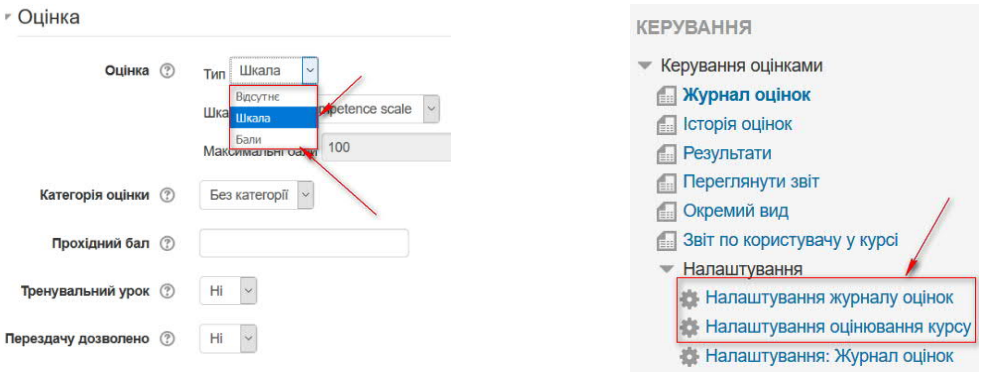


Рис. 4.22. Рецензування робіт тих, хто навчається, у курсі «Створення протиаварійних тренувань із застосуванням ПТК ОП++»



а б

Рис. 4.23. Налаштування системи оцінювання

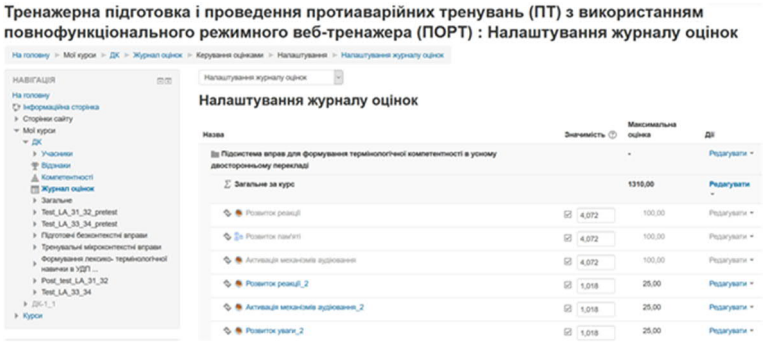


Рис. 4.24. Налаштування журналу оцінок

Важливою перевагою Moodle є можливість оцінити кожний елемент курсу: лекцію, практичне заняття, завдання для самостійної роботи і т.п. окремо, у тому числі за довільними шкалами. Усі оцінки інструктор може переглянути на сторінці оцінок курсу, яка має безліч налаштувань за видом відображення й угрупування оцінок. Зручна сторінка перегляду останніх змін в курсі дозволяє інструктору побачити нових зарахованих слухачів, нові

повідомлення у форумах, закінчені спроби проходження тестів за вибраний проміжок часу (Рис. 4.26 – Рис. 4.28).

Закінчення періоду (Місяць)	Гість	Студент	Асистент	Викладач	Вибрати все	Події
30 квітень 2019	0	17	0	17	17	Курс Події
30 березень 2019	0	127	0	125	127	Курс Події
28 лютий 2019	4	301	1	163	305	Курс Події
31 січень 2019	0	0	0	0	0	Курс Події
31 грудень 2018	0	18	0	18	18	Курс Події
30 листопад 2018	0	178	0	169	178	Курс Події
31 жовтень 2018	0	136	0	132	136	Курс Події

Рис. 4.25. Активність учасників курсу за обраний період часу

Додатково, на сторінці журналів (логів) можна детально проглянути, які дії виконувалися в курсі різними учасниками. У Moodle активно використовується e-mail-розсилки копій повідомлень з форумів, відгуків інструкторів-викладачів, є можливість відправки e-mail повідомлень певній групі учасників курсу.

Завдання	Перегляди	Пов'язані записи блогу	Останній вхід на сайт
Новинний форум	5 раз 2 користувач(ів)	-	вівторок 11 квітень 2017 2:19 (2 роки 33 днів)
Перелік основної та додаткової літератури	4 раз 1 користувач(ів)	-	середа 5 квітень 2017 5:13 (2 роки 38 днів)
Термінологічний словник	84 раз 1 користувач(ів)	-	вівторок 7 травень 2019 1:55 (7 днів 1 година)
Чат	4 раз 1 користувач(ів)	-	середа 8 травень 2019 11:53 (5 днів 15 годин)
Тема 1. Знайомство з веб-тренажером ПОРТ. Проведення протиаварійних тренувань з використанням ПОРТ			
Лекція 1.1. Проведення протиаварійних тренувань з використанням ПОРТ	798 раз 3 користувач(ів)	-	вівторок 14 травень 2019 11:30 (4 години)
Семінарське заняття на тему: "Проведення протиаварійних тренувань з використанням ПОРТ"	61 раз 4 користувач(ів)	-	середа 8 травень 2019 11:50 (5 днів 15 годин)

Рис. 4.26. Інформація щодо роботи над навчальним матеріалом у процесі знайомства з веб-тренажером ПОРТ

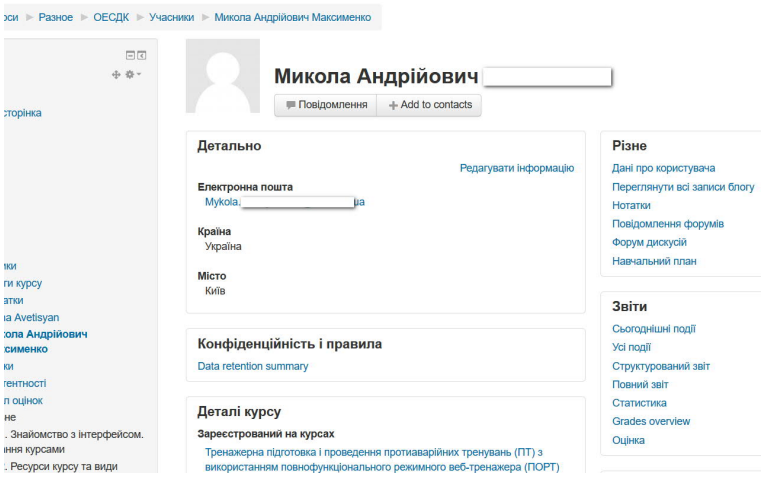


Рис. 4.27. Портфоліо особи, що навчається

Таким чином, викладач-інструктор має повну інформацію щодо роботи тих, хто навчається: час і зміст виконаної роботи, активність, портфоліо тощо.

Система Moodle є відкритою системою і легко інтегрується з іншими системами, зокрема, є можливість завантажувати такі пакети, як SCORM, IMS або AICC у вигляді архіву і додавати їх до курсу, як показано на Рис. 4.29. Додаткові пакети розширюють можливості Moodle: наприклад, IMS пакет може бути використаний для представлення мультимедійного контенту і анімації.

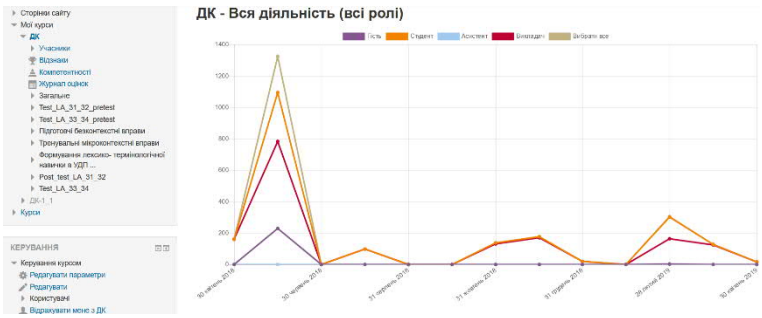


Рис. 4.28. Узагальнена інформація щодо діяльності осіб, що навчаються

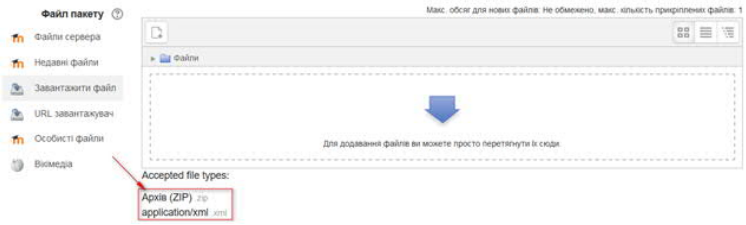


Рис. 4.29. Завантаження файлу архіву

Таким чином, сучасний компетентнісний підхід до навчання і підвищення кваліфікації персоналу в реформованій системі, реалізований на базі віртуальних технологій, дозволить забезпечити придбання персоналом не тільки енергетичного сектору, а й інших галузей економіки країни найважливіших компетентностей та незалежну оцінку рівня професійної підготовки.

4.5 Висновки до четвертого розділу

Досліджені методи розподіленого моделювання і виявлені найбільш важливі особливості застосування хмарних технологій до конструювання

комп’ютерних тренажерів оперативного персоналу. Розглянуто теоретичні основи побудови та функціонування розподіленої системи підготовки персоналу в енергетиці, як основи для функціонування сучасної системи електронного навчання. Виконана побудова моделі і запропоновані різні структури розподіленого середовища для організації комплексної тренажерної підготовки персоналу МЕМ. Розроблені та реалізовані теоретико-методологічні принципи підтримки сучасної веб-орієнтованої електронної системи навчання та тренажерної підготовки оперативно-диспетчерського персоналу МЕМ.

РОЗДІЛ 5
МОДЕЛЬНА ОРГАНІЗАЦІЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНИХ ТРЕНАЖЕРІВ ПІДГОТОВКИ ПЕРСОНАЛУ МЕМ

5.1. Принципи конструювання сучасної електронної системи дистанційного навчання та тренажу персоналу МЕМ

Пропонована в роботі сучасна електронна система дистанційного навчання та тренажу персоналу МЕМ призначена для радикального підвищення ефективності процесів навчання і тренажерної підготовки оперативно-диспетчерського персоналу енергопідприємств шляхом використання сучасних веб-орієнтованих технологій і методів моделювання.

Процеси навчання ефективним методам виконання професійної виробничої діяльності персоналу і методам їх попередження на енергетичних об'єктах нерозривно пов'язані з необхідністю використати для навчання і тренажерної підготовки зручні засоби відтворення за допомогою КТ умов виникнення і розвитку аварій з необхідною для цих цілей мірою деталізації.

Головним завданням всіх діючих законів, регламентуючих процеси, мету, принципи та основні напрями державної політики у сфері підвищення кваліфікації персоналу в електроенергетиці, є визначення правових, організаційних та методичних засад регулювання системи його професійного розвитку.

Серед головних невирішених проблем діючої системи підвищення кваліфікації оперативно-диспетчерського персоналу в електроенергетиці можна виділити наступні.

1. Відсутні державні стандарти професійно-технічної освіти персоналу з конкретних професій електроенергетичної галузі.

2. Величезна кількість професій персоналу електроенергетичної галузі, експлуатуючих різноманітне електроенергетичне устаткування**,** і недостатня міра його уніфікації, значною мірою обмежує розробку загального підходу (загальних стандартів підвищення кваліфікації) до створення сучасних і

ефективних систем навчання і підвищення кваліфікації персоналу електроенергетичної галузі в цілому та вимагає значних ресурсів.

3. Практично всі програми навчання та підвищення кваліфікації, які застосовуються у відповідних учбових профільних закладах, є дуже застарілими і орієнтовані, як правило, на розгляд окремих конкретних теоретичних або практичних, часто не актуальних питань експлуатації устаткування ЕЕС і ОЕС і базуються на електротехнічних принципах, а не на інформаційних моделях ЕЕС і ОЕС в цілому.

4. Відсутнє відкрите загальне інформаційне і моделююче середовище для здійснення повноцінних досліджень, аналізу і прогнозування нормальних і аварійних режимів роботи ЕЕС і ОЕС, включаючи усі існуючі рівні ієрархії управління в цілому, з метою використання результатів досліджень і розрахунків в системі тренажерної підготовки.

5. Існуючі діючі на атомних електростанціях (АЕС) України повно функціональні режимні тренажери є найефективнішими засобами навчання і тренажерної підготовки за виключенням аварійних електромагнітних перехідних процесів в ЕЕС і ОЕС (які супроводжуються дією засобів протиаварійної автоматики АРС, АЛАР та інших). У той же час вони є дуже дорогими і орієнтованими, як правило, на моделювання конкретного електроенергетичного устаткування АЕС, що утрудняє перенесення і застосування отриманих навичок і знань по ліквідації аварій в інші подібні частини великих ЕЕС і ОЕС та не дає можливість моделювати аварійні впливи ЕЕС і ОЕС на режими роботи самих АЕС.

6. Сучасний компетентнісний підхід, який закріплений в Законі України «Про вищу освіту»", не можна реалізувати в існуючій системі навчання і підвищення кваліфікації для оперативно-диспетчерського персоналу повною мірою через відсутність відповідних тренажерів та учбово-методичної бази.

7. Для усіх експлуатуючих електроенергетичних організацій існує важлива проблема втрати досвіду, навичок і знань та практичного досвіду висококваліфікованого персоналу, зокрема того, що йде на пенсію.

Вирішення цієї проблеми можливе шляхом дистанційного залучення пенсіонерів-фахівців з великим досвідом для розробки сценаріїв протиаварійних тренувань і тренувальних навчань, участі в дистанційних курсах, експертного обговорення можливих умов виникнення прогнозованих аварій (або таких, що сталися).

8. Сьогодні практично немає доступних відкритих загальних веб-ресурсів для отримання структурованих знань на компетентнісній основі, включаючи підвищення кваліфікації і тренажерну підготовку викладачів та інструкторів з обов'язковим контролем рівня їх кваліфікації.

9. Відсутня належна оперативна та довготривала психофізіологічна експертиза (діагностика) персоналу, тестування, система професійної та соціальної реабілітації.

10. Відсутні науково обґрунтовані критерії визначення рівня надійності за допомогою доступної перевірки (контролю) ключових компетентностей персоналу, що забезпечує основні технологічні процеси генерації, розподілу і споживання електричної і теплової енергії.

11. Відсутні галузеві професійні стандарти системи підвищення кваліфікації та тренажерної підготовки всього персоналу.

12. Сьогодні неможливо перевірити в реальному часі стан і якість кваліфікації персоналу, які користуються послугами сучасної системи підвищення кваліфікації та гарантуються тільки рівнем кваліфікації викладачів.

Перелічені вище проблеми не можуть бути ефективно вирішені тільки за рахунок створення нових учбових закладів, підготовки додаткового високо кваліфікованого професорсько-викладацького персоналу і розробки нових учбових програм і курсів навчання та підвищення кваліфікації.

Мають бути створені доступні і рівні можливості для безперервного підвищення кваліфікації власного персоналу всіх електроенергетичних підприємств галузі.

Ці загальні для країн ЄС і України проблеми можуть бути вирішені тільки шляхом створення уніфікованої глобальної корпоративної мережі на базі Інтернету, що об'єднує усі існуючі учбові заклади і нові віртуальні центри і пункти навчання і підвищення кваліфікації персоналу в єдину уніфіковану систему з виділенням базової керуючої і відповідальної організації.

Такий підхід може бути також реалізований у рамках створення міжнародного віртуального тренажерного центру інноваційних технологій і підвищення кваліфікації персоналу в електроенергетиці ЄС.

Електроенергетика сьогодні є головною базою для успішного розвитку цивілізації в усіх країнах світу без винятку.

Важлива особливість електроенергетики полягає у безперервності процесів виробництва і споживання електричної енергії населенням і всіма галузями промисловості, що накладає достатньо великі обмеження щодо формування ефективної системи роботи з персоналом.

Головна ціль енергетики України – безперервно і надійно забезпечити споживачів якісною електроенергією в повному обсязі без обмежень.

Сьогодні, як в Україні, так і в країнах Європейського союзу існує значна кількість невирішених проблем в області підготовки, навчання і підвищення кваліфікації персоналу електроенергетичних систем (ЕЕС і ОЕС) на постійній основі (безперервне навчання), що не дозволяє швидко залучати та використовувати кращі світові освітні стандарти і технології навчання.

Питання професійного навчання працівників частково регулюються Законами України [72, 73, 76]. Згідно директивних документів [4, 74, 75], зобов'язання по підтримці належного рівня кваліфікації персоналу покладені, в основному, на керівництво (організації роботодавців) електроенергетичних підприємств всіх рівнів існуючої ієрархії управління. Насправді, ці можливості сьогодні сильно обмежені обсягами державного фінансування та новими ринковими стосунками.

Існуюча система підвищення кваліфікації персоналу електроенергетики в Україні базується на дуже застарілій системі підвищення кваліфікації очної

форми навчання з обов'язковим відривом від виробництва, як правило, один раз в три роки протягом 2 …3. тижнів. Згідно [5] визначено зобов’язання роботодавців щодо забезпечення підвищення кваліфікації працівників не рідше ніж один раз на п’ять років. В країні практично відсутня важлива складова тренажерної підготовки оперативно-диспетчерського персоналу, що дуже стримує формування і підтримку потрібної кваліфікації персоналу, наприклад, за тематикою розпізнавання умов виникнення і ліквідації різноманітних аварій.

Сьогодні відрядні витрати (проїзд, харчування і проживання) значно перевищують витрати безпосередньо на саме навчання та підвищення кваліфікації.

Такі умови і порядок підвищення кваліфікації утрудняє формування повноцінних однорідних за фахом груп, адекватного змісту учбово-методичній бази і використання ефективних сучасних методів навчання і тренажерної підготовки.

Існують великі проблеми в підборі і підготовці учбово-інструкторського персоналу, що залучається до підвищення кваліфікації.

Проста модель функціонування електроенергетики може бути представлена у вигляді розосередженого на великій території (країни) складного електроенергетичного устаткування, керованого висококваліфікованим персоналом. Таке уявлення про сучасну електроенергетику дозволяє чітко сформулювати потрібний перелік спеціальностей персоналу для експлуатації відповідного обладнання, обсяги та конкретні вимоги до сучасної системи підготовки персоналу з урахуванням всього накопичуваного досвіду у профільних навчальних закладах.

На сьогодні найбільш важливим напрямом соціального розвитку усіх країн світу є розвиток і ефективне використання інноваційних технологій електронного навчання і дистанційних тренажерів в усіх областях виробничої діяльності, особливо в електроенергетичному секторі. Такі технології широко

використовуються для дослідження і розробки нових підходів до навчання персоналу і перевірки ефективності їх застосування на практиці.

У електроенергетичному секторі у багатьох країнах вже створено і успішно використовується велика кількість електронних навчальних систем і тренажерів. Проте, основними недоліками цих систем є, як правило, їх вузька сфера застосування, відсутність уніфікації і замкнутість.

Це пов'язано з тим, що освітня та учбово-методична база експлуатованих тренажерів і автоматизованих систем навчання створювалась різними розробниками на різних етапах розвитку ЕЕС з використанням різних проектних технологій, програмних засобів, методів і стандартів.

Іншим недоліком є те, що різні моделі, використовувані на практиці для дослідження і розрахунку режимів роботи великих ЕЕС, часто представлені з різною мірою деталізації, ще й, як правило, не верифіковані. Як правило, можливості додавати інформацію і коригувати зміст в цих системах і програмних середовищах, украй обмежені.

Тому в найближчому майбутньому усі нові інноваційні технології, що з'являються, потребують використання обов'язкового електронного навчання, нових учбових курсів для персоналу, у тому числі з використанням різних дистанційних тренажерів на базі повних верифікованих моделей електроенергетики країн.

Сьогодні інноваційні технології навчання в електроенергетичному секторі будь-якої країни цивілізованого світу реалізуються на сучасній універсальній інформаційній платформі за типом корпоративних хмарних обчислень. Такі платформи, у вигляді комплексного інформаційного середовища, дозволяють використати увесь накопичений досвід навчання існуючої освітньої системи професійного навчання і швидко розробляти нові ефективні онлайн-курси.

За допомогою Інтернету співробітники електроенергетичних компаній зможуть проводити навчання на своїх робочих місцях або в учбово-

тренувальних центрах (УТЦ) та пунктах (УТП) для поетапного створення системи безперервного навчання.

Ці можливості сучасних інформаційних технологій мають бути завжди доступні всьому персоналу електроенергетики з метою отримання ним необхідної повної, достовірної і детальної інформації про результати роботи електроенергетичного сектора.

Нова система підвищення кваліфікації персоналу на базі електронного навчання дозволить реалізувати компетентнісний підхід до роботи з персоналом, зосередившись на придбанні ним тільки найважливіших знать та умінь в своїй експлуатаційній діяльності в режимі безперервної і керованої системі навчання.

Необхідно повною мірою використати всі елементи існуючою інфраструктури системи підвищення кваліфікації персоналу: матеріально-технічну та учбово-методичну бази, викладацький штат шляхом інтеграції в одну із сучасних електронних систем навчання та повнофункціональних тренажерів.

Важною можливістю пропонованої системи є гарантування персоналу всіх рівнів існуючої ієрархічної системи керування електроенергетикою України та інших галузей економіки постійний безперервний доступ до нової системи підвищення кваліфікації незалежно від типу власності.

Явних супротивників модернізації існуючої системи не прогнозується, проте окремі перешкоди у вигляді посилань на велику зайнятість персоналу, відсутність або погану якість інструкцій по роботі з персоналом і тому подібне необхідно враховувати.

В якості типового допущення про ризики передбачаємо, що ресурси на розробку і експлуатацію реформованої системи виділятимуться своєчасно і в потрібному об'ємі.

Головне завдання першого етапу пропонованої системи підвищення кваліфікації і тренажерної підготовки персоналу - забезпечити гарантію створення необхідних умов, у тому числі нормативних і законодавчих, для

формування і контролю національних професійних стандартів системи компетентностей персоналу підприємств електроенергетики країни.

Існують важливі передумови можливості швидкої модернізації існуючої застарілої системи роботи з персоналом.

Сучасний компетентнісний підхід до навчання і підвищення кваліфікації персоналу в реформованій системі, реалізований на базі віртуальних (хмарних) технологій, дозволить забезпечити придбання персоналом не тільки електроенергетичного сектору, а і інших галузей економіки країни тільки найбільш важливих компетентностей та незалежну оцінку професійних кваліфікацій на базі державних професійних стандартів. Буде вирішена складна проблема створення повнофункціональних тренажерів для оперативно-диспетчерського персоналу.

Використання корпоративних хмарних технологій дозволить залучати до спільної роботи, у разі потреби, учбові, науково-дослідні, проектні організації і заводи по виготовленню енергетичного устаткування. Сьогодні таких можливостей у існуючих електроенергетичних підприємств немає.

Буде вирішена проблема можливої втрати досвіду, навичок і знань персоналу, що йде на пенсію шляхом дистанційного залучення пенсіонерів – висококласних спеціалістів для розробки сценаріїв ПТ і ТрЗ навчань, участі в дистанційних курсах, експертного обговорення умов виникнення прогнозованих аварій, варіантів їх ліквідації та ін.

Студенти і аспіранти технічних університетів будуть забезпечені всіма засобами і можливостями компетентністного підходу на базі загальних моделей великих ЕЕС і ОЕС та використання сучасних моделюючих засобів.

Нова система підготовки персоналу запропонує нові можливості повноцінної професійної орієнтації учнів старших класів шкіл для вибору майбутньої професії в області електроенергетики.

Нова запропонована електронна система підготовки (Рис. 5.1) на базі використання накопиченого досвіду, новітніх підходів до індивідуального (персонального) і колективного електронного навчання і підвищення

кваліфікації персоналу, забезпечить еволюційний шлях модернізації існуючої системи підготовки персоналу в електроенергетиці, максимально можливий ріст рівня і якості кваліфікації персоналу та дозволить заощадити величезні людські і фінансові ресурси.

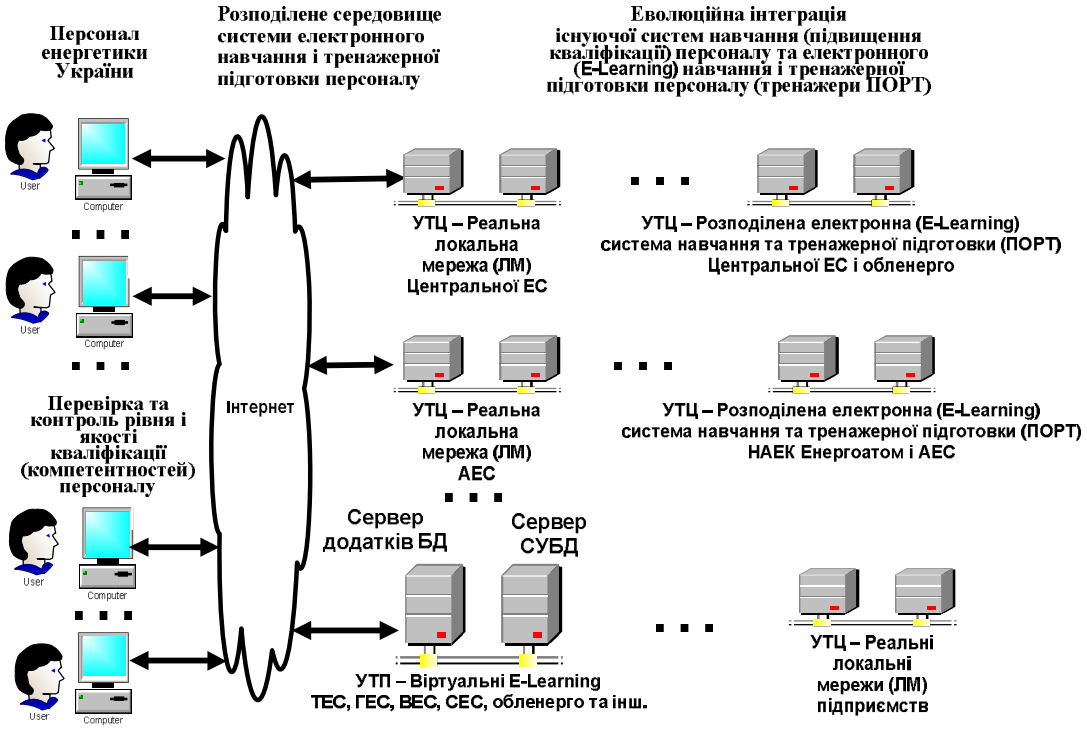


Рис. 5.1. Розробка моделей робочої діяльності оперативно-диспетчерського персоналу

Ефективна система навчання і тренажерної підготовки персоналу повинна спиратися, передусім, на детальний аналіз тієї професійної діяльності, оволодіння якої складає мету навчання. Тому одним з перших завдань при побудові контенту системи навчання і тренажерної підготовки має бути вирішене завдання побудови моделей робочої діяльності оперативно-диспетчерського персоналу з фіксацією і представленням змісту професійній діяльності у вигляді виробничих інструкцій, які включають різноманітні відеограми органів управління, технологічні схеми, діаграми, таблиці, довідкові матеріали і тому подібне.

Часто засоби розвитку навичок оперативного мислення оперативного персоналу містять певний набір універсальних ситуаційних імітаційних динамічних тренажерах [298, 321].

Відомі [137] ефективні системи навчання і тренажу із застосуванням алгоритмічних методів на базі карт спостережень, дерев оцінки ситуацій і планів дій. Карти спостережень використовуються для розвитку навичок аналізу ситуацій. Кожна карта включає найменування об'єкту спостереження, характеристику початкової ситуації, нормальні і реальні значення параметрів, рішення оператора. Дерева оцінки ситуацій застосовують на етапі пошуку причин відхилення спостережуваних параметрів від нормальних значень для розвитку навичок побудови причинно-наслідкових зв'язків. Суть методу полягає в конструюванні взаємних зв'язків відхилення параметрів і дій, які можуть викликати ці відхилення. Початок дерева вказує на конкретне порушення, а гілки, що відходять, описують можливі головні причини цього відхилення. Далі причини деталізуються описаним вище способом до тих пір, поки не буде визначено джерело відхилення параметра або режиму від номінального значення.

Методика планів дій використовується на етапі планування дій для розвитку навичок управління енергоустаткуванням в нормальних і аварійних режимах.

Модель виробничої діяльності персоналу може бути представлена за допомогою розгалуженої причинно-наслідкової семантичної мережі у вигляді етапів виникнення і розвитку аварійних ситуацій [2, 3]. Кожному вузлу цієї мережі ставиться у відповідність певний стан об'єктів управління в процесі виникнення, розвитку або ліквідації аварії. Кожен вузол при цьому може відображатися на екрані дисплея ПК з тією або іншою мірою деталізації у вигляді різних технологічних схем об'єкту управління. Елементи технологічної схеми моделюються відповідними заступними схемами, а результати моделювання відображаються за допомогою підготовлених заздалегідь спеціальних полів введення-виводу [35, 57, 327, 328].

Вузлами семантичної мережі сценаріїв ТрЗ можуть бути будь-які інформаційні об'єкти, що характеризуються заданим набором параметрів заступних схем і ознаками приналежності до певного класу об'єктів.

Зв'язки між вузлами мережі визначають інформаційні стосунки між об'єктами. Стосунками можуть виступати різні залежності і дії з інформаційними об'єктами або їх елементами. У найзагальнішому випадку зв'язку визначають процес переходу моделі інформаційного об'єкту з одного стану в інший, під впливом зовнішніх дій або внутрішніх перетворень інформаційних моделей об'єктів [84].

Будь-який зв'язок мережі може моделювати процес перетворення інформаційних об'єктів з урахуванням тимчасових співвідношень між елементами об'єкту [138, 139, 142].

Як приклад найчастіше використовуваних зв'язків при створенні ТрЗ можна виділити ключові слова: "ГОТОВИЙ" - готовність переходу до наступного етапу тренування; "СХЕМА" - відобразити стан об'єкту після одного або декількох комутаційних змін схеми об'єкту; "ВКЛЮЧИТИ/ВІДКЛЮЧИТИ/ВИВЕСТИ В РЕМОНТ" - перевести елемент схеми у відповідний стан; "ДОДАТИ/ЗНЯТИ" - збільшити/зменшити значення будь-якого параметра на задану величину або збільшувати безперервно і так далі

Кожне ТрЗ пов'язане з певним складом устаткування, конкретними правилами технічної експлуатації і техніки безпеки і призначений для навчання або контролю знань і навичок фахівців внаслідок реалізації причинно-наслідкових дій і збурень на об'єкти управління.

Усе різноманіття логічних структур досліджуваної предметної області ТрЗ описується за допомогою мережевої структури даних на основі багатомісних предикатів:

$$F(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)\text{F}\,, \qquad (5.1)$$

де F - ім'я поняття, що означає ім'я предиката, $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ - октанти (імена понять), що означають об'єкти предметної області.

Структура висловлювання (5.1) може бути перетворена в структуру з різними ознаками, що складаються, як правило, з найменування і значення. Існуючі зв'язки між поняттями, що входять до складу висловлювання,

виражаються за допомогою певного розташування кодів цих понять і закріплення за їх позиціями заданої функції.

Серед об'єктів предметної області ТрЗ можуть бути виділені прості, внутрішня структура яких не розкривається, і складні, такі, що складаються з простих об'єктів, пов'язаних між собою. Складним об'єктам відповідає мережева структура, у вузлах якої розміщені прості об'єкти, а вузли з'єднуються дугами, що відбивають зв'язки (стосунки) між об'єктами.

Представлення логічних структур даних в пам'яті копм’ютерів реалізоване автором в припущенні, що структура складного інформаційного об'єкту заздалегідь невідома і в загальному випадку характеризується наступними поняттями: номером (найменуванням), ознаками, що характеризують приналежність об'єкту до цього (визначеному) класу об'єктів, об'ємом інформації, яка потрібна для опису об'єкту з необхідною мірою деталізації і характеристиками, що описують властивості цього об'єкту. Більш повні моделі формуються в міру необхідності рішення локальних завдань при моделюванні ТрЗ. У перелік характеристик входить і математична модель об'єкту у вигляді опису, що реалізовує функціонування моделі, а також набір умов для початку цього процесу.

До складу базових понять предметної області ТрЗ входять класи об'єктів $\{N\}$, процесів $\{V\}$, ознак $\{P\}$ і відношень $\{R\}$.

Базисом мови представлення даних є поєднання:

NRN; NRV; NRP; VRV; PRP.

Пов'язані між собою певними зв'язками поняття предметної області ТрЗ утворюють інформаційні дерева, структура і зміст яких використовуються для конструювання сценаріїв конкретних ТрЗ залежно від цілей і постановки завдання.

До використовуваних в роботі інформаційних дерев досліджуваної предметної області належать: алгоритмічні зв'язки модулів програм пошуку інформації і розрахунку режимів роботи модельованих об'єктів; ієрархічна структура управління енергетичним виробництвом; результати проведення

ТрЗ на усіх ієрархічних рівнях управління; моделі об'єктів у вигляді заступних схем; комплекс алгоритмів і програм для розрахунку процесів, що встановилися і перехідних; сценарії ТрЗ і програми їх проектування, а також набори статичних і динамічних відеограм різноманітних технологічних схем. Вузлами інформаційних дерев є поняття з множин $\{N\}$, $\{V\}$ і $\{P\}$, а гілками - існуючі відношення $\{R\}$.

Сценарій будь-якої ПТ включає опис етапів виникнення і розвитку аварії, кожен з яких, у свою чергу, моделюється параметрами стану елементів устаткування і переліком органів управління. Будь-яка схема відображається в пам'яті комп’ютерів за допомогою інформаційного дерева, вузли якого описують структуру елементу і координати візуалізації, а гілки визначають зв'язки між елементами. Тому в основу алгоритму автоматизації проектування семантичної мережі ТрЗ покладена абстрактна інформаційна модель, характер і послідовність обробки якої заздалегідь невідомі і уточнюють на етапах формулювання мети і постановки завдання при проектуванні сценарію ТрЗ.

Як було показано раніше, для відображення різних відеограм технологічного устаткування і інших графічних об'єктів (наприклад, принципових схем устаткування, мультфільмірованних відеограм дій персоналу) застосовуються два способи формування зображення : растровий і векторний. Розглянемо детальніше приклади і особливості застосування кожного із способів. Для ситуаційних тренажерів, покликаних формувати у навченого образ об'єкту управління на прикладі принципових схем, а також для повномасштабних тренажерів, де потрібно використання складних принципових схем устаткування як довідкових матеріалів, найбільш зручні відеограми, побудовані за векторним принципом, оскільки вони масштабуються з мінімальними спотвореннями і займають відносно трохи місця дискового простору. На Рис. 5.2 наведені приклади таких відеограм, фрагменти принципової схеми підстанції, що відображають, в різних масштабах.

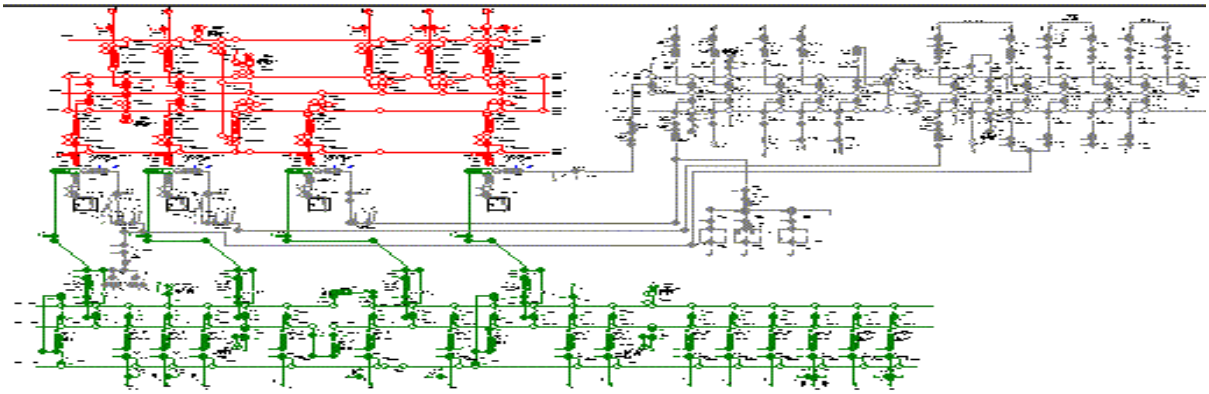


Рис. 5.2. Приклад електричної схеми для створення ТрЗ

Для формування таких схем на етапі їх конструювання спеціальними програмами-редакторами, що входять в підсистему конструктора тренувань, використовуються бібліотеки елементів, раніше сконструйованих цими програмами. Ці елементи можуть бути згруповані по різновидах об'єктів для різних предметних областей. Такі групи елементів показані на Рис. 5.3.

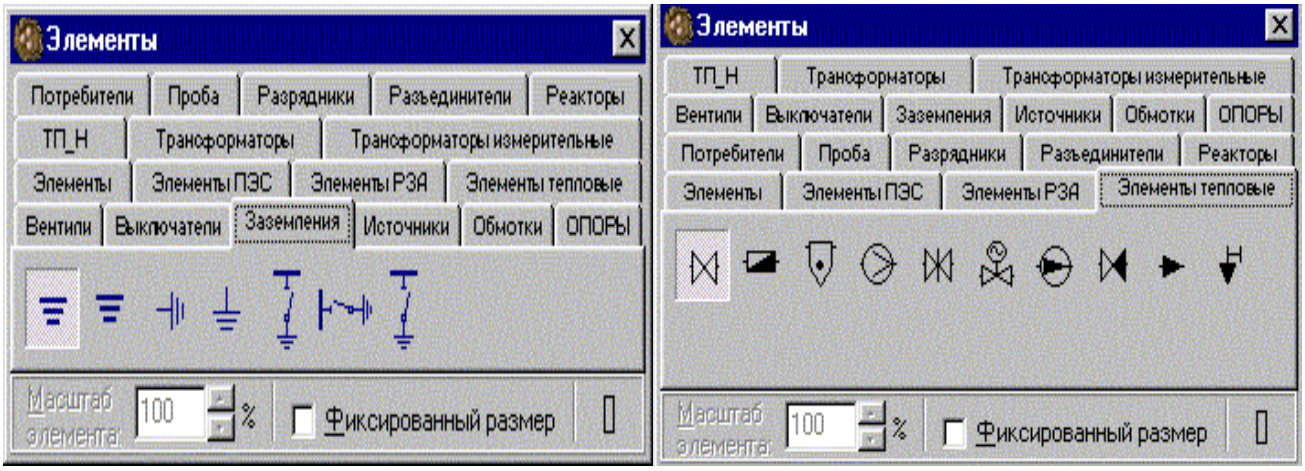


Рис. 5.3. Елементи бібліотеки графічного редактора

Якщо в ході тренування потрібно виконання дій навчених на моделях устаткування, вид якого бажано наблизити до звичного виду реальних органів управління, використовується матричний спосіб формування відеограм. Наприклад, при виконанні перемикань на облаштуваннях РЗА використовуються різні види перемикачів і накладок з різною кількістю і

назвами станів комутованого апарату. Для формування зовнішнього вигляду перемикача (накладки) на етапі конструювання тренувань необхідні відеограми вибираються з бібліотеки елементів, приклад якої показаний на Рис. 5.4. В ході тренування може бути передбачена можливість задавати зовнішній вигляд перемикаємого елементу таким, яким він є на реальному устаткуванні. Приклади відеограм таких пристроїв показані на **Ошибка! Источник ссылки не найден.**.

Для відображення відеограм, які вимагають максимальної відповідності виду модельованого технологічного устаткування виду реального устаткування слід застосовувати матричний спосіб відображення. В якості основи (еталону - статичної частини зображення) відеограми найдоцільніше використати оцифроване зображення (фотографію або стоп-кадр відеозапису) реального технологічного устаткування.

Для динамічної частини зображення формується спеціальна інформаційна структура - дескриптор, що описує координати і способи формування змінюваної частини, яка зображує показання приладів (цифрових і стрілочних), стан сигнальних табло і ламп, положення комутованих елементів (вимикачів, роз'єднувачів, тумблерів, перемикачів, та ін.), а також графіків, діаграм, необхідних персоналу на робочому місці для оцінки оперативної ситуації.

Як правило, потрібно два масштаби для оцінки стану устаткування : загальний план і деталізоване зображення панелей управління. Приклади таких відеограм (для моделей центральних або блокових щитів управління електростанцій, переговорного пристрою - комутатора) показані на **Ошибка! Источник ссылки не найден. - Ошибка! Источник ссылки не найден.**.

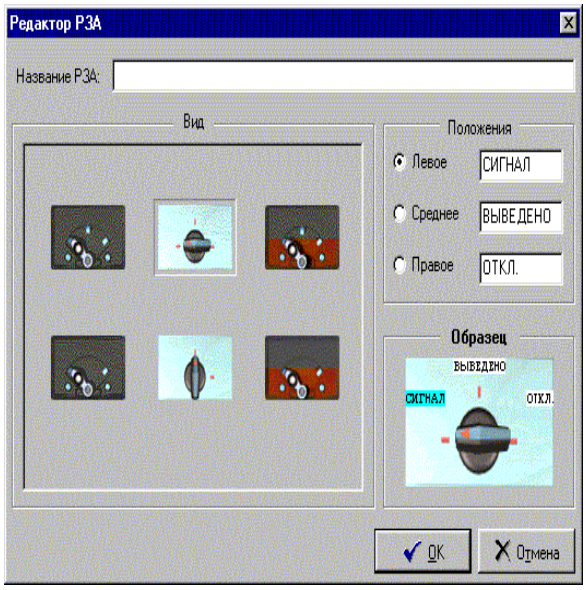


Рис. 5.4. Редактор елементів облаштувань РЗА

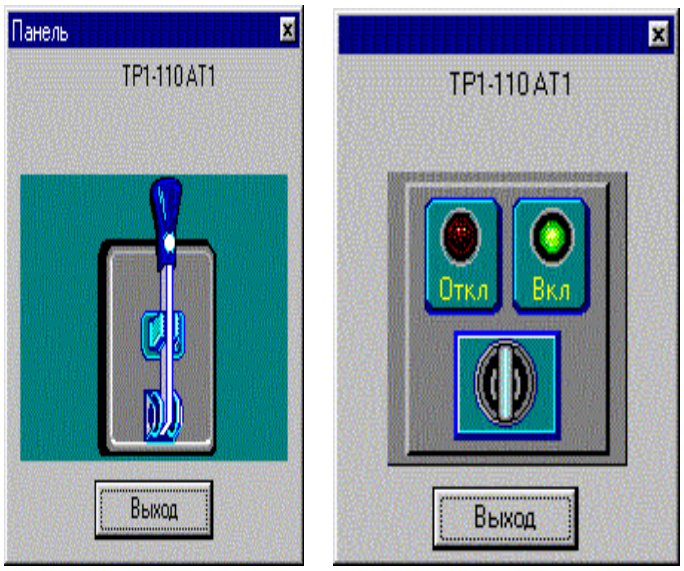


Рис. 5.5. Приклад відеограм реального устаткування

Для візуалізації динамічної частини відеограм і елементів управління використовуються бібліотеки растрових зображень елементів - приладів і комутованих апаратів.

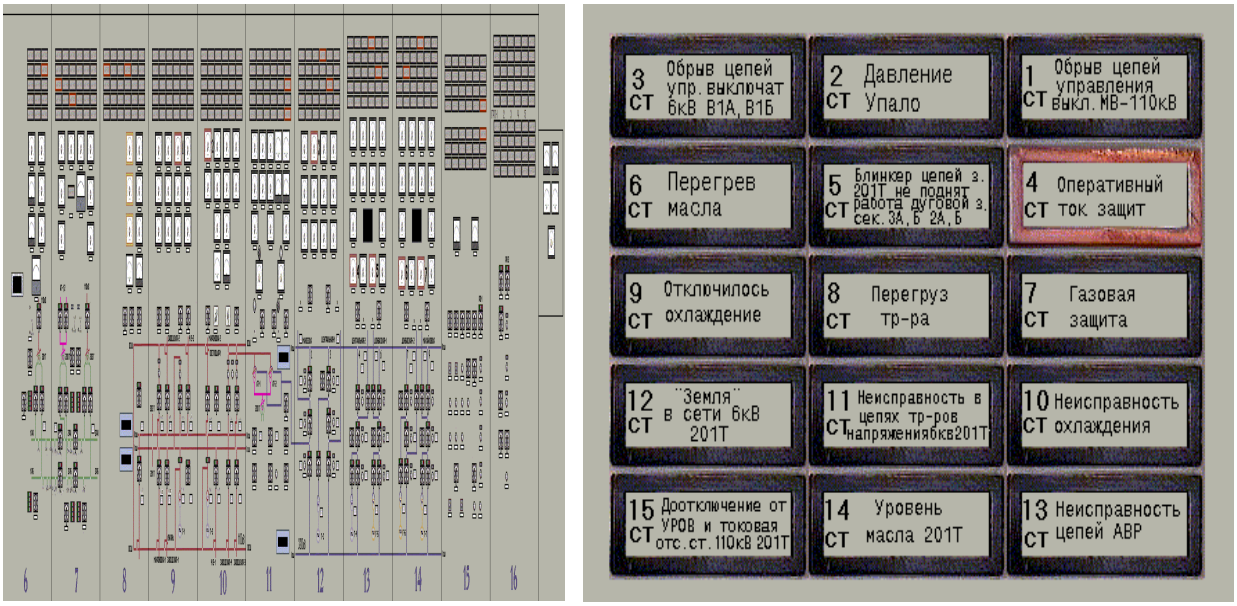


Рис. 5.6. Центральний щит управління ТЕС і панелі сігналізації

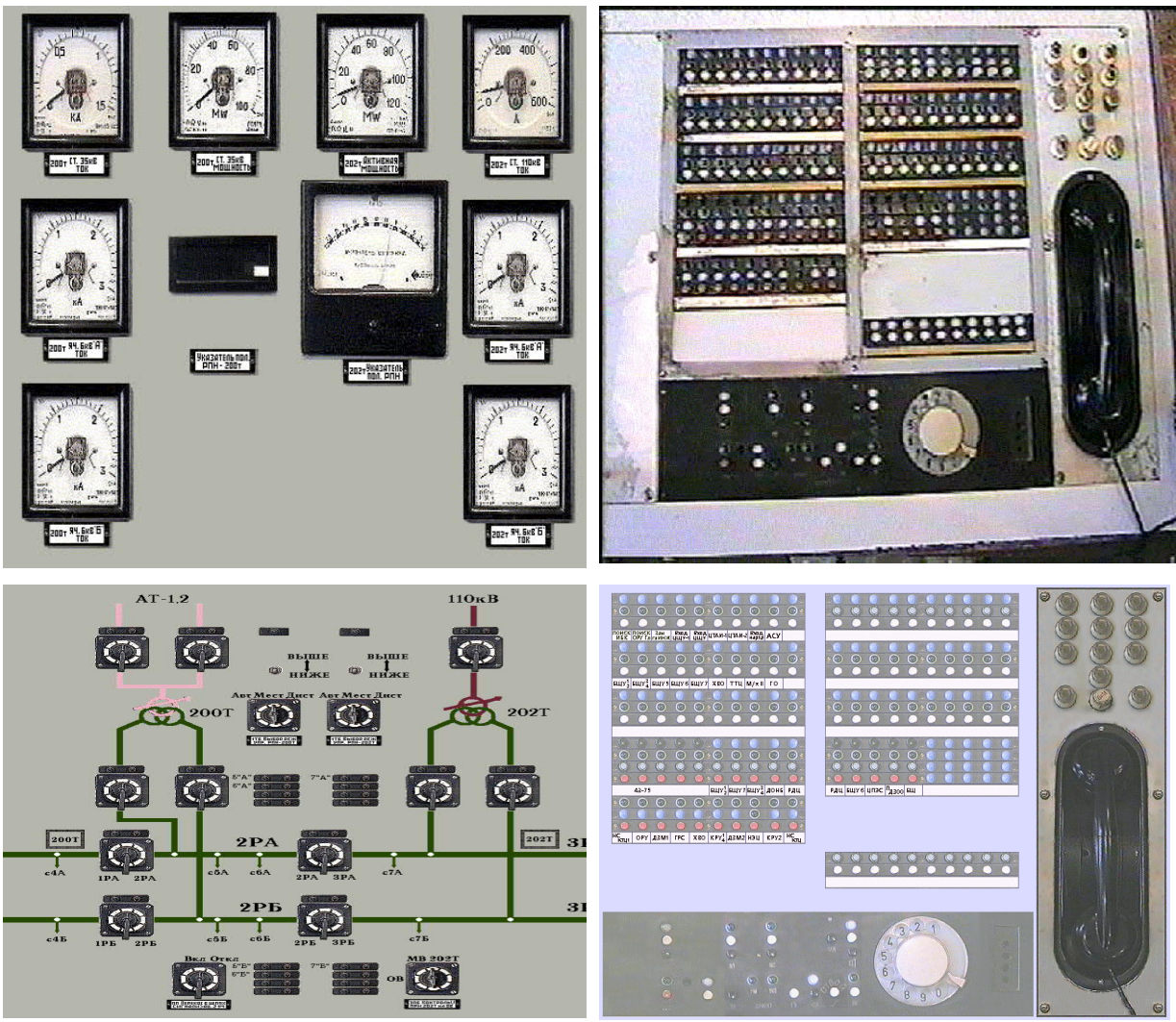


Рис. Рис. 5.7. Фрагменти центрального щита управління ТЕС (ліворуч) і телефонного комутатора (праворуч)

В якості ілюстративного матеріалу для тренувань персоналу по відробітку правил ПТЕ і ПТБ, а також при поясненні ходу розвитку і наслідків аварійних ситуація в тренажерах можуть використовуватися мультимедійні засоби: фрагменти відеофільмів, фотографії (Рис. 5.8, Рис. 5.9), а також фонограми.

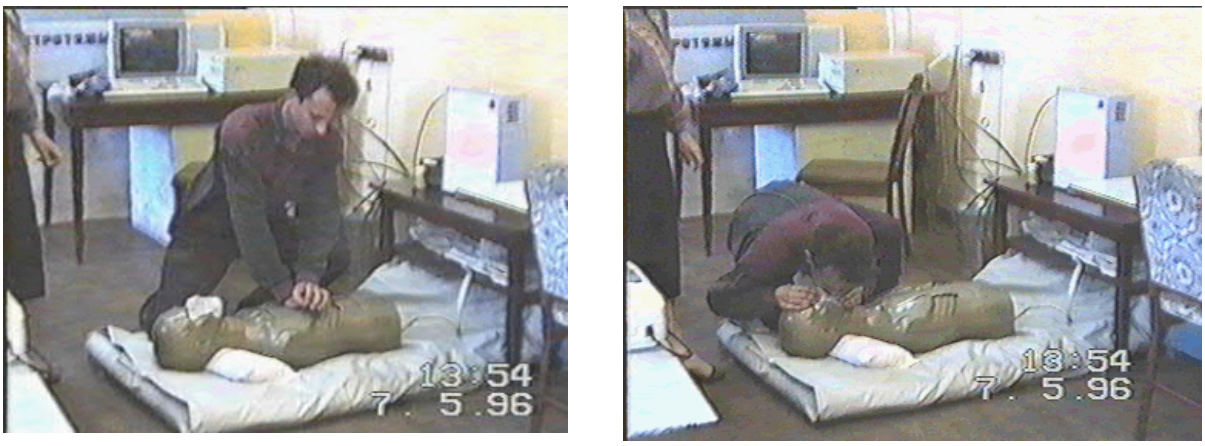


Рис. 5.8. Прийоми надання першої допомоги

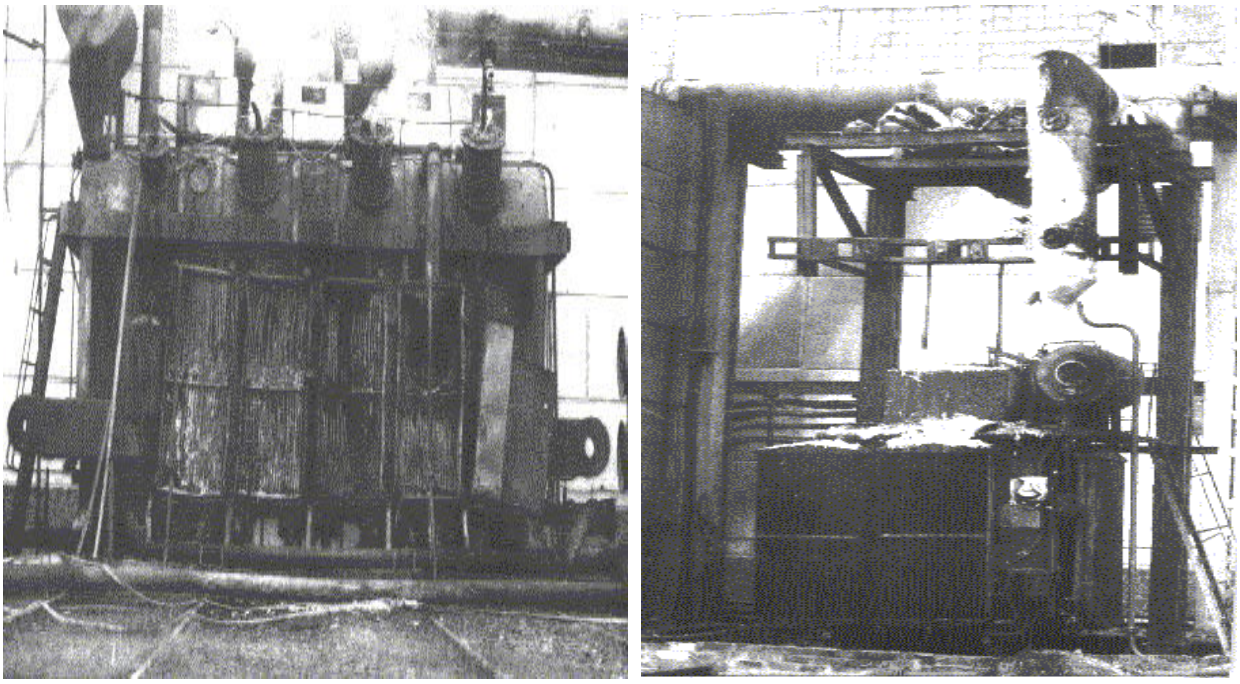


Рис. 5.9. Відеограми матеріалів розслідування аварії

Для здійснення діалогів "НАВЧЕНИЙ-ПК", що "навчений-навчається", "навчений-інструктор" в тренуваннях використовуються різні "меню дій". Це заздалегідь підготовлені списки можливих дій, повідомлень діалогу між учасниками тренування, набори кнопок з піктограмами. Ці меню можуть бути багаторівневими, мати деревовидну структуру, так що навчений може формувати цілі фрази, йдучи по гілках "дерева дій". Заздалегідь підготовлені тексти повідомлень, довідкові текстові документи можуть зберігатися в текстових файлах, базах даних (ORACLE, PostgreSQL та ін.), а також в графах

електронних таблиць. Окрім використання заздалегідь підготовлених текстів, навчений може мати можливість ввести текст за допомогою клавіатури ПК, а також використати засоби мультимедіа для голосового введення повідомлень і команд.

5.2 Імітаційний метод конструювання тренувальних занять, сценаріїв штатних і протиаварійних тренувань в МЕМ

Імітаційний метод (ІМ) базується на використанні моделюючого комплексу на всіх етапах конструювання та проведення тренувальних занять.

Початок конструювання типового ТрЗ ініціюється вибором функції "Створити тренування" (Рис. 5.10). Далі процес створення ТрЗ продовжується вибором потрібної електричної схеми ЕЕС (або її частини), підстанції або мнемосхеми диспетчерського щита (Рис. 5.11).

Вибір електричної схеми обумовлений тематикою і метою тренувального завдання. Як приклад, можна навести наступні основні теми сценаріїв тренувальних завдань для диспетчерського персоналу МЕМ:

1. Запобігання і ліквідація аварійних небалансів активної потужності.
2. Запобігання і ліквідація раптового зниження частоти нижче 49.80 Гц.
3. Запобігання і ліквідація раптового підвищення частоти вище 50.05 Гц.
4. Запобігання і ліквідація збереження тенденції підвищення частоти вище 50.20 Гц.
5. Запобігання і ліквідація неприпустимих відхилень і знижень напруги.
6. Запобігання і ліквідація неприпустимих підвищень напруги.
7. Ліквідація перевантаження ліній електропередачі, електро-мережного устаткування і контрольованих перетинів.
8. Запобігання і ліквідація асинхронних режимів.
9. Ліквідація режимів синхронних коливань.
10. Відновлення нормального режиму після розділення енергосистеми та інші.

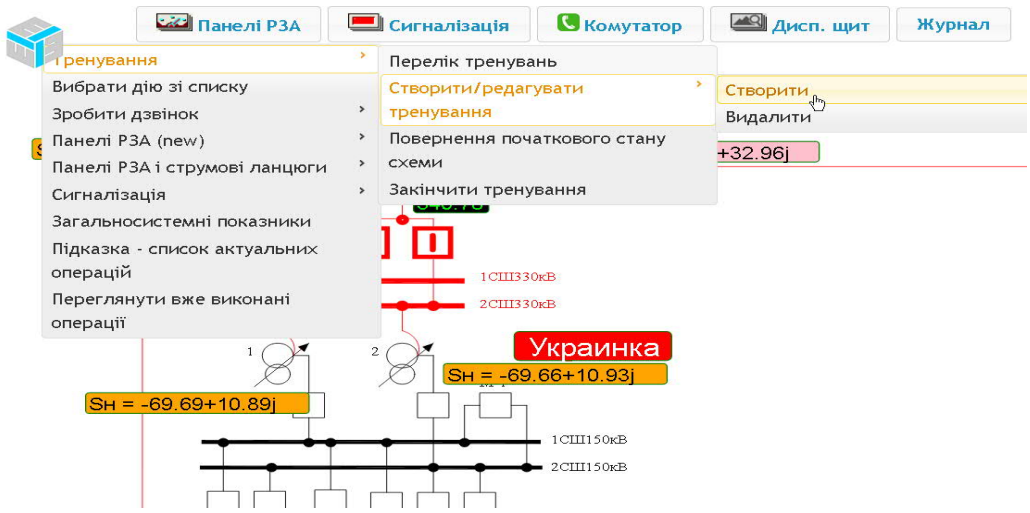


Рис. 5.10. Вибір функції конструювання/редагування типового ТрЗ для персоналу МЕМ

Кожна тема обов'язково включає детальний опис початкового стану усіх динамічних елементів схеми. Отже, на першому кроці побудови сценарію формують початковий стан всіх параметрів на вибраній електричній схемі або мнемосхемі з урахуванням того, які параметри потрібні персоналу для досягнення мети тренажерного завдання. До цих параметрів відноситься інформація, отримана зі SCADA про параметри поточного режиму, стан комутаційних елементів електричної мережі на електричних мнемосхемах, уточнювальна інформація, яка може бути отримана за допомогою телефонного комутатора від диспетчерів нижчого рівня і чергових підстанцій, стан засобів РЗ і А, панелей сигналізації тощо.

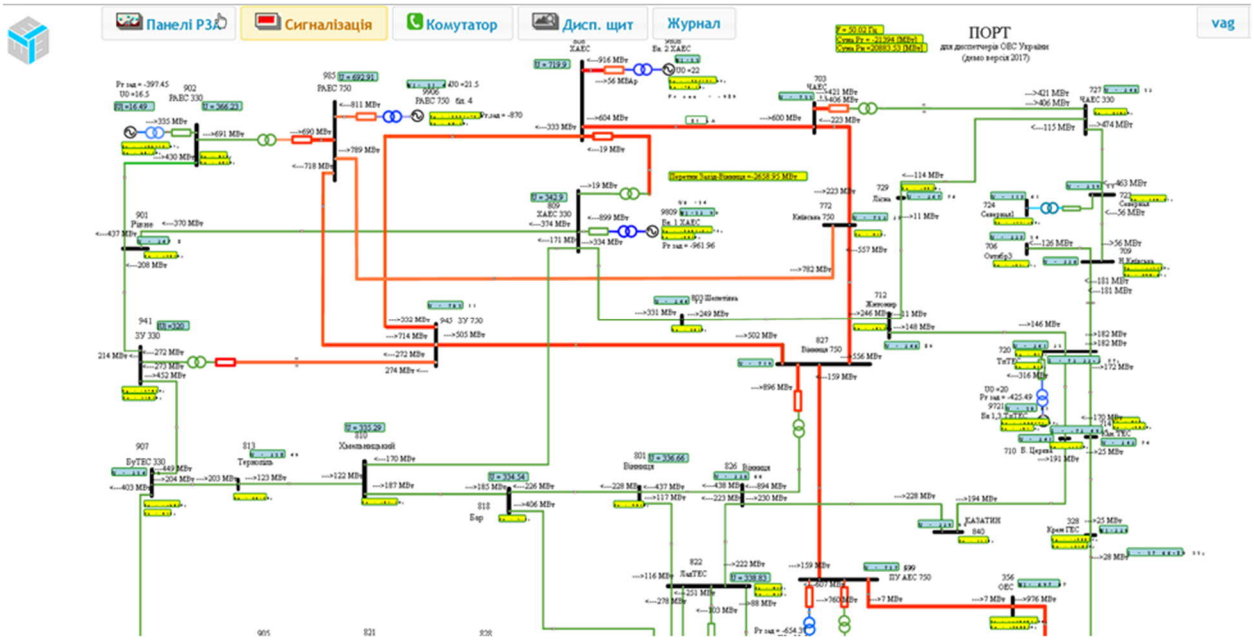


Рис. 5.11. Приклад схеми ЕЕС для конструювання системи ТрЗ

Інтерфейс редакторів-конструкторів ТрЗ забезпечує можливості формувати потрібний перелік динамічних параметрів для подальшого відображення та використання результатів розрахунку режимів та стану комутаційних елементів електричних схем, панелей засобів РЗ і А, сигналізації і диспетчерських щитів. Вся потрібна для цього інформація зберігається в реляційних БД, як інформаційна частина моделі ЕЕС або ОЕС. Математична модель режимів роботи ЕЕС і ОЕС використовується у вигляді системи нелінійних рівнянь для балансів потужностей вузлів або контурних струмів.

Приклад редагування динамічних елементів електричної схеми для підготовки ТрЗ у вигляді меню, що випадає, приведено на Рис. 5.12 за допомогою функції "Редагування схеми".

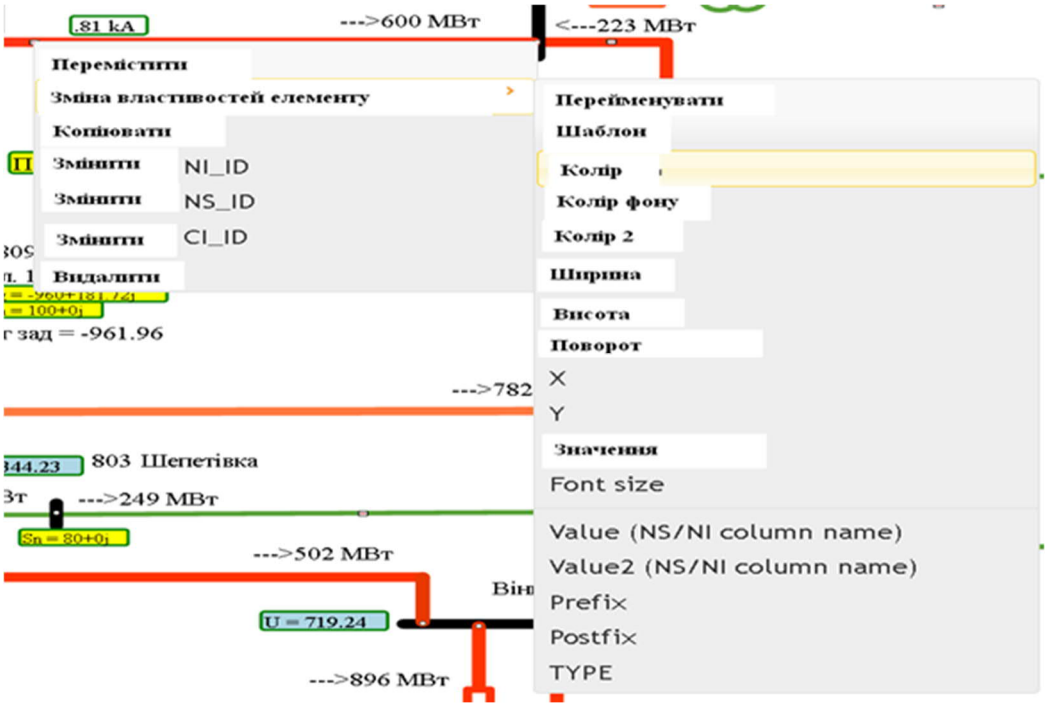


Рис. 5.12. Меню редагування динамічних елементів електричної схеми

Статична (незмінна) частина схеми редагується за допомогою стандартних відомих редакторів файлів у форматі SVG. До складу конструктора-редактора конструювання ТрЗ входять інструментальні програмні засоби створення панелей сигналізації (Рис. 5.13), засобів РЗА і струмових кіл (Рис. 5.14), а також адаптивних телефонних комутаторів (Рис. 5.15).

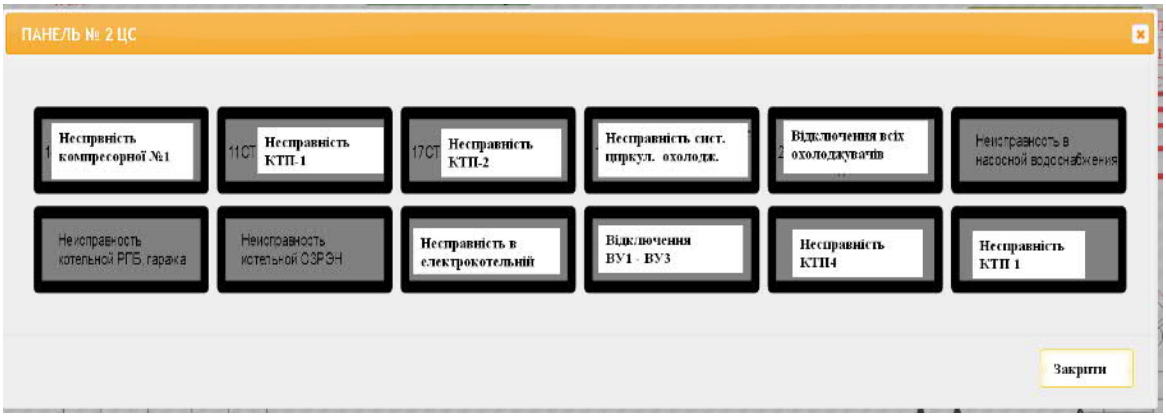


Рис. 5.13. Панелі сигналізації ТрЗ

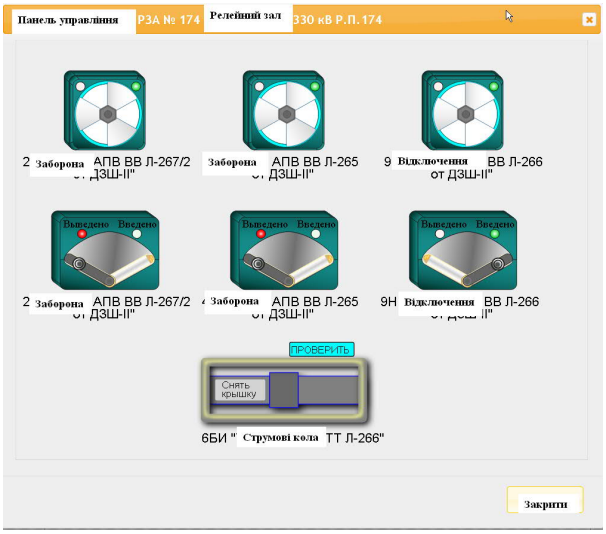


Рис. 5.14. Панелі РЗА і струмових кіл

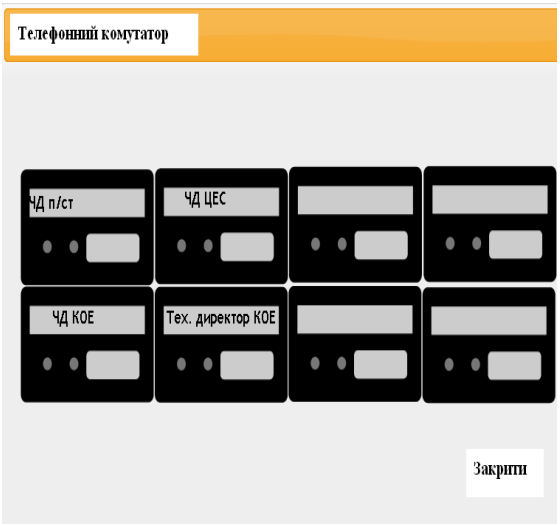


Рис. 5.15. Зразок адаптованого телефонного комутатора ТрЗ

Після завершення формування початкового стану схеми ТрЗ його слід запам’ятати в БД для подальшого використання для створення або редагування ТрЗ та проведення ТрЗ.

Така можливість з’являється відразу після виклику функції "Редагування тренувань" (Рис. 5.16). За допомогою даної функції потрібно сформувати назву ТрЗ та описати умови і стан схеми перед запуском тренування. У подальшому цю інформації можна буде редагувати в будь-який час.

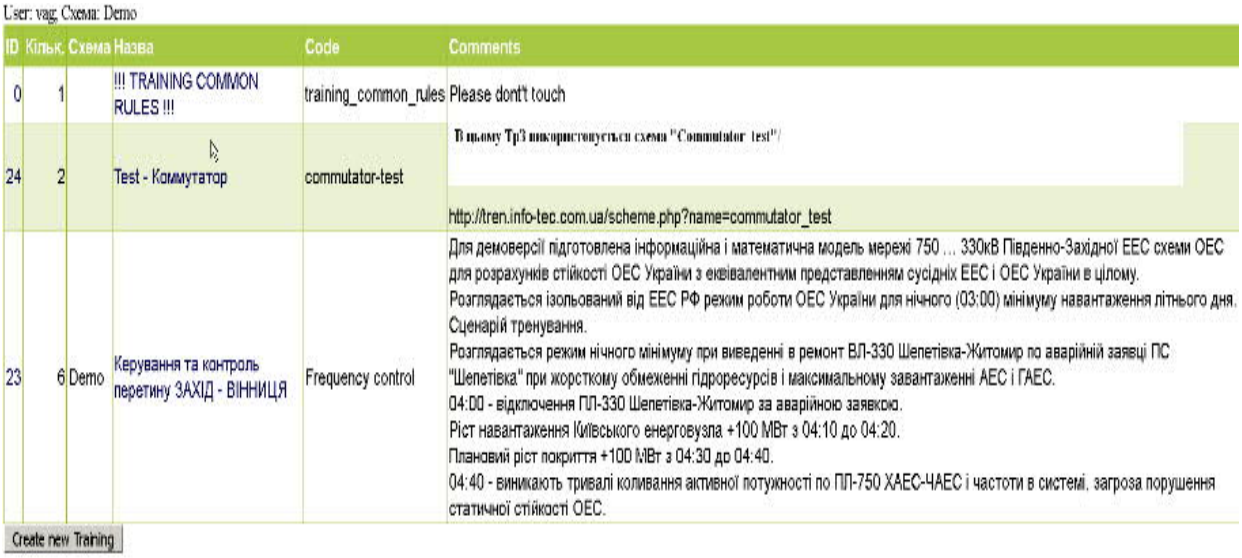


Рис. 5.16. Стартова сторінка створення або редагування назви і опису ТрЗ

Після виклику назви будь-якого ТрЗ можливо для нього створювати поточні логічні правила операцій і дій персоналу ТрЗ (Рис. 5.17).

Функція "Нове правило" дозволяє використати зручний шаблон і заповнити його поля потрібними елементами (Рис. 5.18). Розробник ТрЗ може вибрати дію або операцію з динамічним елементом (включити, відключити, оглянути і т. інше), його диспетчерське найменування, умови послідовності виконання, час спрацьовування відносно початку тренування. Після вибору і заповнення потрібних характеристик потрібно підтвердити створення правила або скасувати його. Після створення будь-якого правила можливо перевірити його результат за допомогою функції "Go". За результатами виконання можливо редагувати будь-яке правило. Всі створені правила зберігаються в таблицях БД і можуть буди відредаговані з використанням інструментальних можливостей БД.

Рис. 5.17. Меню створення (редагування) логічних правил операцій і дій персоналу для поточного ТрЗ

Реалізація цього методу передбачає наявність заздалегідь створеного сценарію ТрЗ, який складається із ГДС моделі об’єкта і системи ПНЗ із операціями над об’єктами і діями, які моделюють виробничу діяльність персоналу згідно ПІ і реакцію системи управління об’єктом.

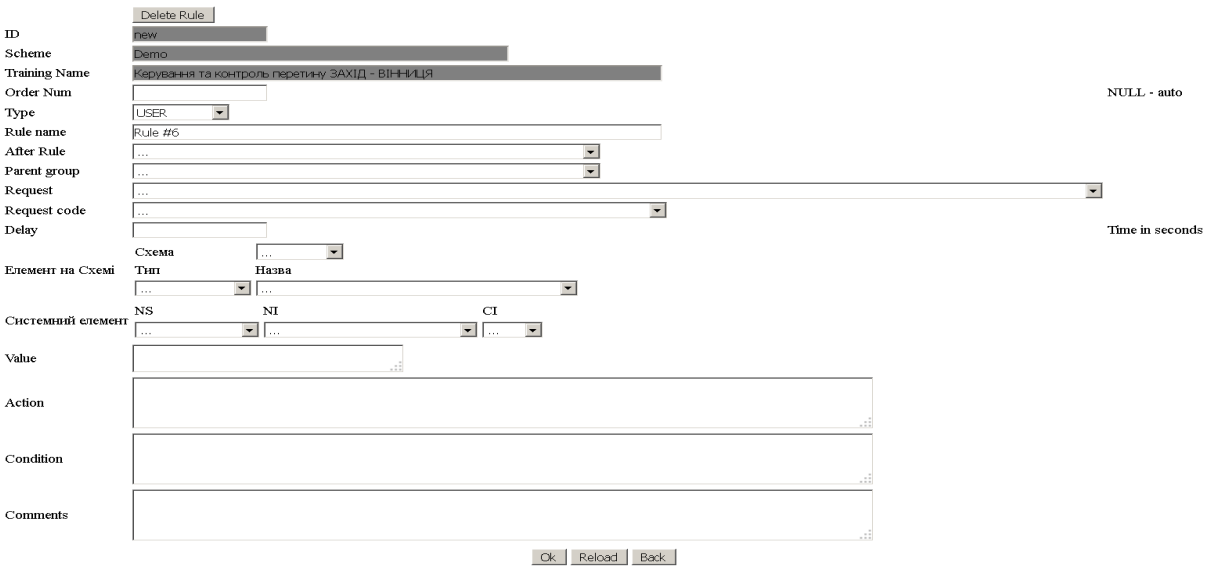


Рис. 5.18. Приклад шаблону для створення нового логічного правила ТрЗ

Логічні правила, які моделюють діяльність (операції і дії) персоналу розділяються на три типи: операції, пов’язані із об’єктами електричної схеми (наприклад, включити, відключити, перевірити, оглянути і таке інше), дії, які не пов’язані безпосередньо з елементами схеми (наприклад, потрібно викликати пожежну команду), і дії, пов’язані із телефонними переговорами для отримання персоналом уточнювальної інформації в процесі ТрЗ.

Також передбачена можливість моделювання реакції тренажерної системи за допомогою моделюючого комплексу на збурення в процесі проведення тренажерної підготовки. Важливою є можливість створювати різноманітні форми діалогу диспетчерів за допомогою моделі телефонного комутатора (зміст телефонних дзвінків і репліки на них).

Розглянемо невеликий приклад формування ТрЗ на наступну тему: "Керування та контроль перетину ЗАХІД-ВІННИЦЯ".

Перетин складається із 12 високовольтних ліній електропередачі 330 … 750 кВ: Хмельницька АЕС – Київська 750, Західно-Українська АЕС тощо. Розглядається режим нічного мінімуму при виведенні в ремонт ВЛ-330 Шепетівка-Житомир за аварійною заявкою ПС "Шепетівка" при жорсткому обмеженні гідроресурсів і максимальному завантаженні АЕС і ГАЕС:

- 04:00 - відключення ПЛ-330 Шепетівка-Житомир за аварійною заявкою;
- ріст навантаження Київського енерговузла +100 МВт з 04:10 до 04:20;
- плановий ріст покриття +100 МВт з 04:30 до 04:40;
- 04:40 - виникають тривалі низькочастотні коливання активної потужності по ПЛ-750 ХАЕС-ЧАЕС і частоти в системі, виникає загроза порушення статичної стійкості ОЕС України.

У роботі запропоновано, розроблено та реалізовано автоматизовану систему конструювання-редагування ТрЗ з використанням ІМ.

Кожне ТрЗ завжди має конкретну мету у відповідності з навчально-педагогічною базою тренажерної підготовки і структурно складається з двох

пов’язаних етапів: аналізу розвитку аварії і етапу можливого варіанту еталонного (пропонованого інструктором) методу її ліквідації.

Сценарно-моделююча структура (СМС) ІТМ базується на системі логічних правил у вигляді ПНЗ, які використовуються для опису моделі діяльності персоналу (послідовності відповідних операцій) відповідно до правил технології диспетчерського управління.

З метою автоматизації процесів конструювання логічних правил створена інтерактивна інтерфейсна таблиця (Таблиця 5.1), кожна строчка якої є унікальним правилом виконання операцій або дій з певною умовою або часом виконання цього правила відносно початку ТрЗ. Передбачена можливість формувати правила для опису еталонної послідовності етапів ліквідації аварій (тип USER), які призначені для можливого використання користувачами і тих, які можуть спрацювати автоматично в якості запланованих в сценаріях ТрЗ збурень в процесі створення умов виникнення або ліквідації аварій – тренажери типу TREN (файл запланованих подій). Останні, як правило, використовуються для формування першої частини ТрЗ – переліку послідовних дискретних етапів розвитку аварій у вигляді логічних правил виконання операцій і дій із необхідною і достатньою мірою їх деталізації. В процесі створення логічних правил інструктор-викладач використовує схему ЕЕС або ОЕС із параметрами режиму (Рис. 5.10), конструктор-редактор для створення послідовних логічних правил із допоміжними функціями: запустити або зупинити ТрЗ, зберегти вихідний стан схеми для ТрЗ, відновити вихідний стан схеми для ТрЗ, запустити на виконання для перевірки коректності будь-якого логічного правила і таке ін. Номер чергового наступного правила у конструкторі-редакторі формується автоматично.

Передбачена можливість конструювати логічні дії для моделювання телефонних діалогів диспетчерів із використанням подібного до реального телефонного комутатора даної диспетчерської служби, а також будь-яку дію

без залучення елементів електричних схем, наприклад, дії, пов’язані із викликом пожежної команди на підстанцію для гасіння пожежі.

Конструктор-редактор логічних правил виконання операцій і дій дозволяє також створювати правила для моделювання роботи пристроїв РЗ і А. Дія пристроїв РЗ і А основана на перевірці виникнення певних умов загрози електроенергетичному обладнанню, сформованих у вигляді сукупності відповідних логічних правил, наприклад, дія пускового органу РЗ і А струмової відсічки лінії електропередачі можлива при умові досягнення струму, більше максимально заданої величини – уставки струму.

ТрЗ із логічними правилами виконання операцій і дій можна редагувати, імпортувати та експортувати у файли текстового формату, а саме – файли типу file.xml. Це дозволяє редагувати сценарії та правила ТрЗ звичайними доступними редакторами: Microsoft Word, Notepad та ін. А потім імпортувати їх в БД для подальшої перевірки і виконання. Приклад такого файлу для ТрЗ frequency_control.xml (контроль частоти) наведено нижче.

```
<trainings>
<training code="Frequency control" scheme="demo" name="Керування та контроль перетину ЗАХІД - ВІННИЦЯ" >
<comments><![CDATA]
```

Для демоверсії підготовлена інформаційна і математична модель мережі 750 … 330кВ Південно-Західної ЕЕС схеми ОЕС України для розрахунків стійкості ОЕС України з еквівалентним представленням сусідніх ЕЕС і ОЕС України в цілому.

Розглядається ізольований від ЕЕС Російської Федерації режим роботи ОЕС України для нічного (03:00) мінімуму навантаження літнього дня.

Мета ТрЗ: ліквідувати загрозу порушення статичної стійкості ОЕС України.

Сценарій ТрЗ:

– час 04:00 - відключення ПЛ-330 Шепетівка-Житомир за аварійною заявкою;

- ріст навантаження Київського енерговузла +100 МВт з 04:10 до 04:20;
- плановий ріст покриття +100 МВт з 04:30 до 04:40;
- час 04:40 - виникають тривалі коливання активної потужності по ПЛ-750 ХАЕС-ЧАЕС і частоти в системі, загроза порушення статичної стійкості ОЕС України.

Розглядається режим нічного мінімуму при виведенні в ремонт ВЛ-330 Шепетівка-Житомир по аварійній заявці ПС "Шепетівка" при жорсткому обмеженні гідроресурсів і максимальному завантаженні АЕС і ГАЕС (Таблиця 5.**1**). Можливо також видалити ТрЗ із списку у будь-який момент часу.

Передбачена можливість виконання будь-якого правила до або після будь-якого конкретного правила. Це дозволяє об’єднувати правила у відповідні блоки обов’язкових або не обов’язкових (альтернативних) послідовностей їх виконання.

Створення системи логічних правил дій і операцій персоналу та асинхронна перевірка умов їх виконання реалізована за допомогою вбудованого у БД тригерного механізму: перевірка правил починається після виконання будь-якої виконаної персоналом поточної дії або операції згідно певного сценарію ТрЗ.

Використання розробленої автором системи автоматизованого конструювання ТрЗ за тематикою перемикань в електричних мережах і диспетчерського керування режимами ЕЕС і ОЕС дозволяє значно (в десятки разів) скоротити час підготовки складних ТрЗ за умови підготовленої заздалегідь схеми з початковим станом динамічних елементів.

Таблиця 5.1

Фрагмент конструктора-редактора логічних правил

№ логічного правила	*Тип*	*Правило*	*Назва дії*	*Назва об'єкта (вибір із меню)*	*Диспетчерське найменування (автоматично із БД)*	*Затримка відносно старту ТрЗ (сек.)*	*Виконати до правила №*	*Виконати після правила №*	*Значення параметра*
1	TREN	Змінити стан	Відключення ПЛ-330 Шепетівка-Житомир	ПЛ	ПЛ-330 Шепетівка-Житомир	10	-	-	-
2	TREN	Змінити стан	Встановити активну потужність у вузлі 723	Вузли	Північна	30	1	1	440
3	TREN	Змінити стан	Встановити активну потужність у вузлі 727	Вузли	ЧАЕС 330	50	-	2	270
4	TREN	Змінити стан	Встановити активну генерацію на бл. 1 ХАЕС	Вузли	бл. 1 ХАЕС	70	-	3	-1030
5	TREN	Змінити стан	Встановити активну генерацію на бл. 2 ХАЕС	Вузли	бл. 2 ХАЕС	90	-	4	-1030
6	USER	Змінити стан	Включити ПЛ Шепетівка - Житомир	ПЛ	ПЛ-330 Шепетівка-Житомир	-	-	-	-

5.3 Сценарно-педагогічний метод конструювання тренажерних занять

Сценарно-педагогічний метод (СПМ), запропонований д.т.н., проф. Самойловим В.Д. [333], базується на застосуванні методів ситуаційного моделювання. У цьому методі для підготовки ТрЗ моделюючий комплекс і модель об'єкту – ЕЕС і ОЕС, використовується тільки на етапі їх конструювання. Фокус методу спрямований на створення і використання моделі виробничої діяльності персоналу згідно посадових інструкцій в процесі диспетчерського управління ЕЕС і ОЕС.

Сценарно-моделююча структура СПМ формується наступним чином. Після вибору найменування, мети і задачі ТрЗ створюється бібліотека модельних процедур за допомогою моделюючого комплексу ПОРТ. Для побудови регресійних моделей у вигляді поліномів не вище другого порядку використовується метод повного факторного експерименту. Модель діяльності оперативно-диспетчерського персоналу формується за допомогою ПІ, які регламентують потрібний набір операцій диспетчерського управління і використовуються в якості моделі управління об'єктом.

Цей метод доцільно використовувати у випадках конструювання неоднозначних за можливостями розвитку і шляхами ліквідації складних системних і міжсистемних аварій, а також коли можливий альтернативний варіант розвитку аварії може призвести до неочікуваних результатів з точки зору фізичного існування моделюючих режимів.

Розроблена методика і алгоритми формування регресійних моделей режимів роботи МЕМ, запропоновані шляхи їх використання для рішенні завдань управління в процесі проведення ТрЗ з використанням тренажерних систем.

Це дозволяє отримувати результати моделювання різних режимів роботи ЕЕС і ОЕС в необхідному для тренажерної підготовки темпі часу і з комфортним часом реакції тренажерної системи.

Проведена порівняльна оцінка використання регресійних моделей 1-го і 2-го порядку для моделювання режимів. Це дозволило запропонувати зручну методику побудови і організації моделей тренажерних систем і ТрЗ, що дозволяє конструювати і використовувати їх безпосередньо фахівцями галузі, які не мають навичок роботи в області програмування.

Технологія комутаційних перемикань в електричних мережах реалізується за спеціальними програмами оперативних перемикань, обов'язково затвердженими керівництвом енергетичного підприємства, для нормальних умов експлуатації підстанцій і мереж. Програми перемикань, які щорічно обов'язково переглядаються, є основою для створення протиаварійних тренувань, що проектуються з використанням спеціально розробленого конструктора (редактора) різноманітних сценаріїв аварій і порушень в роботі підстанцій і електричних мереж.

Програми перемикань, які обов'язково попередньо створюють для кожної підстанції, є унікальними, їх кількість для підстанцій напругою 110/35/10 кВ обчислюється сотнями. Кількість операцій (перемикань або дій) в кожній програмі коливається приблизно в діапазоні від 20 до 100. У енергетиці України нині функціонують близько 30 енергопостачальних організацій і кожна з них має у своєму складі приблизно 600 підстанцій цих класів напруги. Така велика кількість програм і операцій перемикань часто призводить до помилок і обумовлює необхідність автоматизації процесів розробки бланків оперативних перемикань.

Програми перемикань можуть бути записані у вигляді формальної системи логічних правил перемикань типу «виконати», «відключити», «оглянути» тощо. Це дозволяє створити мінібазу знань для перевірки умов виконаних або пропонованих операцій у вигляді системи простих правил «якщо щось сталося або виконано, то результат буде наступним», яка в подальшому використовується для створення сценаріїв протиаварійних тренувань і бланків оперативних перемикань.

Пропонується три типи правил діалогового формування мінібази знань [56, 57, 62, 63]:

- перший – операції з наявним устаткуванням на підстанції;

- другій – з телефонними переговорами персоналу;

- третій – з усіма іншими операціями, не пов'язаними з перемиканнями, наприклад виклик пожежної машини. Передбачено можливість формування переліку необхідних операцій від імені персоналу, що навчається, і від імені моделюючого комплексу тренажера, що дозволяє моделювати роботу релейного захисту і автоматики та різних зовнішніх збурень або відмов устаткування в заданий час і залежно від ситуації, що склалася.

У

Таблиця 5.2 показано фрагмент конструктора-редактора правил, який відображає типову структуру правил (номер, назву операції, місце розташування та назву комутаційного обладнання, що потрібно зробити).

На Рис. 5.19 наведено фрагмент типової підстанції 110/35/10/0,4кВ, яка використовується в тренажерному навчанні. Реалізовано можливість виділення окремих груп обов'язкових послідовностей дій, передбачених в програмах перемикань, за допомогою введення типів умовних або обов'язкових поточних операцій з комутаційним устаткуванням.

Систему автоматизації процесів конструювання, редагування і створення сценаріїв штатних і протиаварійних тренувань розроблено для використання в науково-навчальних віртуальних тренажерних центрах сучасної професійної електронної системи навчання. Запропонована система конструювання значно прискорює процеси розробки і створення (редагування) сценаріїв протиаварійних тренувань.

Таблиця 5.2

Фрагмент конструктора із варіантами різних операцій

№ елемента сценарію	Приналежність	№ правила	Назва дії	Стан елемента	Назва елемента	Диспетчерська назва елемента
64	Автор сценарію	62	Змінити стан	Ремонтне положення	Вимикач	ПК 10 ТВП-1
65	Автор сценарію	63	Змінити стан	Ремонтне положення	Релейна панель	АВ 0.4 ТВП-1
66	Користувач	55 Включити автомат 0.4 кВ ТВП-1 у робоче положення	Змінити стан	Ремонтне положення	Вимикач	ПК 10 ТВП-1
67	Тренажерна система	32 "Включити візок ПК 10 ТВП 1 у робоче положення"	Змінити стан	Контрольне положення	Вимикач	ПК 10 ТВП-1

Середовище розподіленого моделювання забезпечує широкі можливості для ефективного використання нової сучасної електронної системи роботи з персоналом і дозволяє перейти до розробки єдиних стандартів навчання і тренажерної підготовки персоналу в енергетиці України.

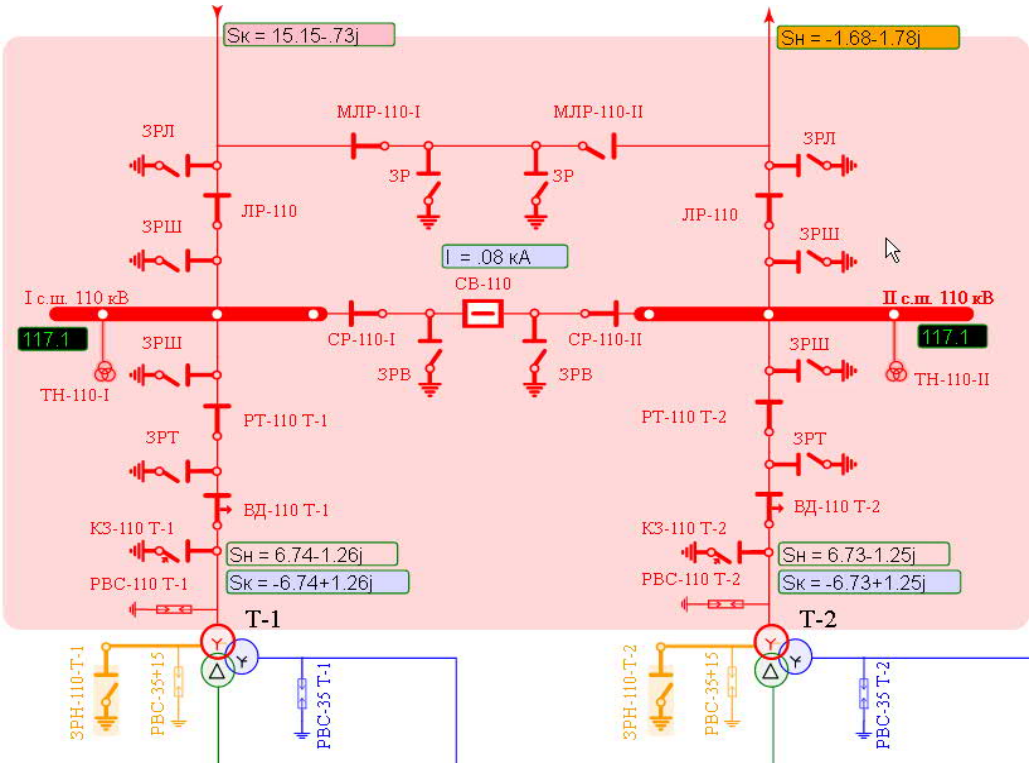


Рис. 5.19. Параметри режиму та стан обладнання принципової схеми підстанції 110 кВ

Об'єднання можливостей сучасних методів електронного навчання та інструментальних програмних засобів розподіленого віртуального моделюючого середовища дозволяє отримати нову якість системи підвищення кваліфікації і тренажерної підготовки оперативного персоналу підстанцій та енергосистем

5.4 Принципи та методичні рекомендації конструювання дистанційних курсів за тематикою тренажерної підготовки персоналу

Підсумуємо результати досліджень у вигляді принципів конструювання ДК за тематикою тренажерної підготовки персоналу МЕМ. Методичні рекомендації призначені для організації самостійної роботи на практичних і семінарських заняттях, а також для виконання комп’ютерного практикуму в

рамках ДК, представленого наборами тематичних та календарних розділів, в яких розміщені ресурси (теоретичні матеріали у вигляді лекцій) та активні елементи ДК (завдання, семінари, тести). Методичні рекомендації охоплюють загальні відомості щодо призначення та структури ДК, організації навчального процесу, стислі теоретичні відомості, приклади завдань для практичних та семінарських занять, комп'ютерний практикум та вимоги до їх виконання, а також контрольні запитання.

Метою подібних ДК є формування та забезпечення ефективної підтримки стійких навичок швидкого розпізнавання, попередження та ліквідації умов виникнення або розвитку великих та малих системних аварій і порушень у роботі електроенергетичного обладнання у оперативно-диспетчерського персоналу МЕМ. Для реалізації вищезгаданої мети використовується побудований автором повнофункціональний режимний веб-тренажер ПОРТ, послідовно формується база знань ПТ та набувається практичний досвід з організації тренажерної підготовки і проведення ПТ оперативного персоналу. Контент ДК враховує правила і рекомендації з проведення протиаварійних тренувань персоналу МЕМ та базується на затверджених інструкціях по ліквідації аварійних ситуацій і порушень в роботі електроенергетичного устаткування МЕМ ЕЕС.

Після вивчення матеріалу модулю ДК фахівець отримає:

компетентність (здатність):

- організовувати та проводити тренажерну підготовку за тематикою оперативних перемикань в МЕМ ЕЕС;
- розробляти сценарії тренажерної підготовки та ПТ на базі аналізу аварій, які прогнозуються або що вже сталися;
- швидко розпізнавати умови виникнення та розвитку аварійних ситуацій на підстанціях МЕМ ЕЕС, вчасно попереджати їх;
- швидко ліквідувати наслідки аварій на підстанціях МЕМ ЕЕС;
- перевіряти знання персоналу та забезпечувати передачу набутого досвіду.

знання:

- принципів виконання оперативних перемикань на підстанціях МЕМ ЕЕС;
- принципів інтерактивної взаємодії між викладачами-інструкторами та персоналом, що навчається за допомогою інтерфейсу тренажеру ПОРТ;
- методів проектування та конструювання сценаріїв ПТ з використанням ПОРТ;
- методів швидкого визначення умов виникнення аварійних ситуацій та порушень в роботі енергетичного обладнання підстанцій МЕМ ЕЕС;
- основ теорії планування оперативних перемикань та питань автоматизації підготовки бланків перемикань;
- умов застосування дистанційного навчання та тренажу персоналу за тематикою організації та проведення протиаварійних тренувань на підстанціях МЕМ ЕЕС;
- тенденцій розвитку інформаційних технологій і техніки управління електричним устаткуванням в нормальних та аварійних режимах.

уміння:

- управління комутаційними елементами електричних мереж та підстанцій за допомогою інтерфейсу ПОРТ;
- організувати та проводити навчальні (з підказкою) і контрольні (без підказки) тренажерну підготовку і протиаварійні тренування в умовах учбово-тренажерного центру та на робочих місцях;
- користуватися сучасними технічними та програмними засобами інформаційних технологій;
- аналізувати і обробляти результати ПТ;
- самостійно орієнтуватися в літературі з технології оперативних перемикань на підстанціях та в електричних мережах енергопостачальних компаній;

- використовувати веб-технології для дистанційної підготовки, перепідготовки та підвищення кваліфікації персоналу МЕМ ЕЕС у частині організації та проведення ПТ з використанням ПОРТ.

досвід:

- опанування технології оперативних перемикань в електричних мережах у штатних і аварійних режимах;
- управління комутаційними апаратами з використанням щитів керування підстанцій, мнемосхем і електричних схем;
- організації і проведення тренажерної підготовки та протиаварійних тренувань;
- розпізнавання умов виникнення, попередження та розвитку аварій на підстанціях та в електричних мережах;
- швидка ліквідації аварійних ситуацій.

Навчальний план ДК складається з загальної та функціональної складових. Загальна складова передбачає удосконалення та оновлення знань і умінь з фахової підготовки.

Коротко організація навчального процесу зводиться до наступного.

Доступ до системи дистанційного навчання з тренажерної підготовки і протиаварійних тренувань має право тільки зареєстрований користувач, який отримав логін та пароль від адміністратора системи дистанційного навчання. Подальшу роботу користувач виконує відповідно до розміщених у дистанційному курсі методичних вказівок, які містять і контент лекційного матеріалу і порядок його вивчення, а також перелік відповідних практичних та семінарських занять.

Комп’ютерний практикум полягає в отриманні практичних навичок щодо ознайомлення та роботи користувачів з матеріалами дистанційного курсу на головній сторінці ДК у блоці "Методичні рекомендації" та з інтерфейсом повнофункціонального режимного веб-тренажеру ПОРТ.

Відповідно до методичних вказівок, слухач ознайомлюється з лекційним матеріалом тренажерної підготовки, можливостями інтерфейсу ПОРТ щодо

технології оперативних перемикань, загальними питаннями організації та проведення тренувань, переліком можливих дій при створенні і проведенні тренувань, можливостями аналізу результатів тренувань, вирішує практичні завдання створення сценаріїв тренувань, приймає участь у семінарських заняттях та у рамках самостійної роботи готується до перевірки якості засвоєння знань.

Засвоєння навчального матеріалу лекцій та виконання практичних та семінарських завдань відбувається згідно тематичного плану, який розробляється та затверджується відповідною службою, що організує тренажерну підготовку, у встановленому порядку. Відповідальність за дотримання тематичного плану несе особа, яка займається дистанційним навчанням та тренажем персоналу.

У разі підвищення кваліфікації без відриву від виробництва рекомендується запланувати 4 години щоденно на засвоєння навчального матеріалу лекцій та виконання практичних та семінарських завдань, а при підвищення кваліфікації з відривом від виробництва щоденне навантаження збільшується до 8 годин.

Семінарські заняття полягають у поглибленому вивченні навчального матеріалу, використовуючи додаткову літературу, а також дозволяють отримати результати та виконати аналіз робіт інших слухачів групи та обмінюватись з ними досвідом.

Практичні заняття мають за мету закріплення отриманих в процесі роботи з ДК знань, набуття здатності та вміння застосовувати знання шляхом демонстрації результатів створення та редагування схем підстанцій, електричних мереж тощо, створення різноманітних сценаріїв протиаварійних тренувань, а також здатності застосування навичок швидкого розпізнавання умов виникнення та розвитку аварій на підстанціях та в електричних мережах.

Самостійна робота слухача (СРС) запланована для підготовки до підсумкового тестування та поглиблення знань з тематики технології оперативних перемикань в електричних мережах. У рамках підготовки слухач,

використовуючи схему своєї підстанції (підстанцій), самостійно розробляє сценарій виникнення та розвитку прогнозованої аварії та створює протиаварійне тренування.

Останні заняття курсу присвячені тестуванню, яке складається з теоретичних та практичних питань. У даному курсі передбачені види питань множинного типу з однією або декількома вірними відповідями та питання на відповідність, де відповідь на кожний із декількох питань повинна бути обрана із списку можливих.

За кожний вид роботи слухач отримує рейтингові бали. Максимальна кількість балів, яку може набрати слухач після вивчення курсу – 100, з яких 20% - за роботу на практичних заняттях, 10% - за участь у семінарських заняттях, 20% - за питання для самоперевірки, які включені в лекційні заняття та 50% за підсумкове тестування.

Рівень «відмінно» присвоюється слухачу, який набрав більше 80 балів, «добре» - від 70 до 79 балів, «задовільно» - від 60 до 69 балів.

Семінарське заняття передбачає поглиблення знань слухачів та перевірки ступеня засвоєння навчального матеріалу. На семінарських заняттях слухачі у формі дискусії обговорюють питання, які представлені для самостійного опрацювання, згідно теми семінарського заняття. Матеріали можуть оцінюватись з використанням декількох критеріїв оцінки, визначених викладачем. Слухачам може надаватись можливість оцінити роботу одного або кількох з представлених своїх колег. Семінарські заняття дозволяють опанувати збір та аналіз робіт слухачів з виставленням колегіальної оцінки.

Питання, які виносяться на семінар:

- структура і зміст тренування;
- пропозиції щодо покращення змісту тренувань;
- розпізнавання умов виникнення та розвитку аварійних ситуацій;
- варіанти аварійних ситуацій (із досвіду роботи).

Вимоги до семінарського заняття:

– постановка питань на форумі;

– надання відповідей на поставлені питання;

– використання додаткової літератури.

Всі слухачі готують повідомлення з основних питань, базуючись на власному досвіді, та виносять їх на форум для обговорення.

Тестування рівня знать слухачів проводиться після засвоювання ними теоретичної частини інформаційного матеріалу у тому ж середовищі дистанційного курсу в інтерактивному режимі. Відповідні набори тестів в курсі містять групи питань з використанням методу множинного вибору, який дозволяє обрати одну або декілька вірних відповідей із завданого списку. В системі передбачена можливості проходження тесту слухачами за декілька спроб, питання можуть перемішуватися або вибиратися кожного разу випадковим чином з банку питань. Також викладач може встановити обмеження часу для відповіді.

До слухачів попередньо доводиться програма проведення тестування та порядок їх дій в процесі тестуванні.

5.5 Методи оцінювання компетентності оперативно-диспетчерського персоналу МЕМ ОЕС України

Перед початком процесу створення оцінки правильності дій тренованого необхідно визначити спосіб оцінки, а саме чи буде він: "жорстким", коли задана чітка послідовність дій і відхилення від неї вважатиметься грубою помилкою з подальшим припиненням тренування; "лояльним", коли існують "необов'язкові" дії, невиконання яких знижує оцінку, але не припиняє тренування; "повчальним", коли при виконанні неправильної дії видаватиметься повідомлення про помилку і вказуватися правильна подальша дія. За бажанням розробників тренувань можна створювати комбіновані способи оцінки.

У складі програмних засобів режимного тренажера реалізований варіант системи інтегральної оцінки дій [135].

У спорті використовується класифікація, заснована на впорядкуванні спортсменів за результатами змагань з привласненням кожному з них певної оцінки у вигляді так званого рейтингу умовного числового коефіцієнта [110]. В межах окремих змагань цими оцінками служать бали, що набирають учасниками.

Такий підхід застосовується в змаганнях по спортивній гімнастиці, фігурному катанню і тому подібне

Проте в таких спортивних іграх як шахи доцільно мати не разову, а інтегральну оцінку, в якій враховуються результати серії зустрічей з різними супротивниками в різних турнірах упродовж певного відрізку часу.

Суть систем класифікації на основі рейтингів полягає в наступному [110].

При розгляді результатів зустрічі двох гравців робиться припущення про те, що відношення середнього числа перемоги гравця до середнього числа його поразок в серіях із зустрічей з гравцем знаходиться в певній залежності від різниці рейтингів гравців.

Вірогідність перемоги гравця в даній зустрічі гравців і дорівнює відношенню середнього числа зустрічей, що виграються, до загального числа зустрічей з іншим гравцем.

При необмеженому збільшенні різниці рейтингів (тобто, при необмеженому зростанні рейтингу гравця N в порівнянні з рейтингом гравця M) вірогідність прагне до одиниці: гравець N майже напевно виграє у M. Якщо ж різниця рейтингів стає негативною, то вірогідність перемоги N над M необмежено наближається до нуля.

Проблема побудови класифікації зводиться до вибору числового значення вірогідності перемоги і масштабу для оцінювання різниці в класі (рейтингів) гравців.

Один з підходів до створення системи класифікації шахістів був запропонований американським професором А. Ело.

Статистика шахових турнірів свідчить про те, що якщо один з шахістів на один розряд в шаховій ієрархії став вищий за інше, то перший виграє у другого, в середньому, 75 очок з 100 можливих, тобто, з вірогідністю, рівною 0,75.

Можна побудувати залежність вірогідності перемоги гравця для різних значень різниці рейтингів (таблиця А. Ело). Ця залежність може бути виражена у вигляді лінійної функції.

Якщо фактично набране шахістом в турнірі число балів співпаде з очікуваним, то в цьому випадку його рейтинг залишиться без зміни. У системі А. Ело в якості коефіцієнта, що є ціною одного очка, вибрано число 10.

Описана система класифікації прийнята Міжнародною федерацією шахів (ФІДЕ) і використовується з 1970 року.

По аналогії з шаховим рейтингом розроблена система класифікації рівня тренованості (навченій) персоналу з урахуванням наступних вимог, умов і допущень.

Обов'язковою вимогою до системи оцінки персоналу в процесі тренажу є використання не разовим, а інтегральної оцінки стосовно різних умов виникнення і розвитку багатоваріантних аварійних ситуацій упродовж безперервного відрізку часу.

Сценарій тренування у вигляді групи питань або дій, що пред'являються учасникам тренування, розробляється кваліфікованими фахівцями в цій проблемній області. Тому вважається, що сценарій завжди задовольняє вимогам повноти, системності і узагальненості, а навченому пред'являється повна система знань по цій аварії.

Враховуючи те, що будь-які невірні дії або відповіді на поставлені питання залежно від умов можуть привести до погіршення аварійної ситуації, їх важливість вважається пропорційною їх ваговим коефіцієнтам важливості.

Відсутність помилок дозволяє зробити висновок про достатню міру відповідності рівня навченій персоналу рівню розробників сценарію.

Припустимо, що в початковий момент тренування навчаний має необхідний обсяг знань, навичок і умінь для ліквідації аварійної ситуації, що вивчається. З урахуванням викладеного вище, правильна дія або вірна відповідь відповідає нічийному результату між тренованим і системою тренажу, а помилкові дії або неправильні відповіді - поразці. Кількість набраних в процесі тренажу очок відповідає кількості правильних дій і відповідей, згідно з ваговими коефіцієнтами дій. Очікувана кількість очок, яку учасник тренування міг би набрати відповідно до свого значення рейтингу, визначається по таблиці, подібній А. Эло.

Якщо в процесі тренажу учасник тренування здійснює хоч би одну помилку, то його рейтинг різко зменшується. За відсутності помилок, починаючи з цього стану, рейтинг повинен збільшуватися трохи. Це відповідає тому, що правильне розуміння способів ліквідації аварії учасник тренування повинен підтвердити кілька разів.

Затвердження цих вимог може бути виконане за допомогою методу "золотого перерізу". Якщо навчений в процесі тренування вчинив хоч би одну помилку, то його рейтинг зменшується в два рази. Якщо в процесі будь-якого з подальших тренувань навчений не вчинить жодної помилки, то його рейтинг спочатку зафіксується, а потім у кінці чергового тренування подвоїться. Чим більше помилок вчинить учасник тренування, тим більша кількість тренувань йому необхідно виконати без помилок.

Описана вище система оцінки реалізована в розробленому комплексі програм комп’ютерного тренажера ПОРТ і забезпечує досить високу ефективність класифікації рівня і знань персоналу за допомогою інтегральної оцінки, а також стимулює персонал до повторення пройденого матеріалу.

Запропонований підхід використовується також для інтегральної оцінки групи (колективу) персоналу, що бере участь в ліквідації аварії, при групових протиаварійних тренуваннях в локальній або глобальній мережі.

5.6 Висновки до п’ятого розділу

Виконані дослідження, запропоновані та побудовані головні принципи конструювання сучасної електронної системи дистанційного навчання та тренажу персоналу у вигляді мережі об’єднаних реальних і віртуальних центрів навчання і тренажерної підготовки оперативно-диспетчерського персоналу. Виконано дослідження та розроблені ефективні методи побудови моделей робочої діяльності оперативно-диспетчерського персоналу, які базуються на детальному аналізі тієї професійної діяльності, оволодіння якої складає мету навчання і тренажерної підготовки. Завдання побудови моделей робочої діяльності оперативно-диспетчерського персоналу з фіксацією і представленням змісту професійній діяльності у вигляді виробничих інструкцій з різноманітними відеограми органів управління, технологічними схемами, діаграмами, таблицями і довідковими матеріалами є головним контентом тренувальних занять для веб-орієнтованих тренажерних систем. Удосконалений та реалізований у вигляді конструктора-редактора імітаційний метод конструювання тренувальних занять, сценаріїв штатних і протиаварійних тренувань за допомогою веб-орієнтованих тренажерних систем. Дозволяє радикально прискорити процес побудови системи протиаварійних навчань і тренувань силами кваліфіелваного оперативно-диспетчерського персоналу. Удосконалена та реалізована технологія сценарно-педагогічного методу конструювання тренувальних занять. Дозволяє значно спростити моделі ОУ для певного класу тренувальних завдань в реальному часі. Сформовані і реалізовані головні принципи та методичні рекомендації конструювання дистанційних курсів за тематикою тренажерної підготовки персоналу, запропонована типова структура дистанційних курсів для організації підготовки персоналу за допомогою веб-орієнтованих тренажерних систем. Запропонована автором система оцінки реалізована в розробленому комплексі програм веб-орієнтованого комп’ютерного тренажера ПОРТ і забезпечує безперервне формування і підтримку ключових компетентностей оперативно-диспетчерського персоналу за допомогою інтегральної оцінки та стимулює персонал до повторення пройденого матеріалу.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена науково-технічна проблема створення моделей, принципів, алгоритмів, методів моделювання і комп'ютерних технологій веб-орієнтованих тренажерних систем оперативно-диспетчерського персоналу МЕМ великих електроенергетичних систем.

Отримані результати дають підстави сформулювати відповідні висновки та рекомендації, що мають теоретичне й практичне значення.

1. Побудова сценаріїв протиаварійних тренувань та тренувальных занять є найбільш важливими функціями компьютерних тренажерів, які базуються на отриманих в роботі математичних моделях, методах і алгоритмах розрахунків режимів роботи електричних мереж. З цією метою також були досліджені динамічні властивості об'єктів МЕМ ЕЕС і ОЕС, виявлені особливості штатних та аварійних режимів їх роботи, що дозволяє будувати моделі тренувальних занять у вигляді семантичної мережі управління об'єктами електричних мереж. Такі моделі базуються на моделях професійної діяльності персоналу і це створює умови та можливості для поетапної розробки мережі сучасниої веб-орієнтованої професійної системи підготовки оперативно-диспетчерського персоналу МЕМ ОЕС України на базі існуючих освітніх організацій та із залученням веб-орієнтованих комп'ютерних технологій.

2. При вирішенні задачі формування інформаційної частини моделі ОЕС України для використання у веб-орієнтованих тренажерних системах застосування нового методу організації процесів моделювання, зокрема: визначення складу та структури концептуальної схеми предметної області досліджень і підготовка первинної інформації для моделюючого комплексу комп'ютерних тренажерів дозволяє використати переваги розподіленого моделюючого середовища та методи діакоптики: зберігати окремі частини моделі ОЕС з необхідною мірою деталізації в різних БД та значно спростити доступ до потрібної інформації.

3. Запропонована та реалізована в роботі система автоматизації розрахунків режимів роботи великих енергосистем на базі багатоопорної

топологічної моделі мережі ЕЕС та ОЕС орієнтована на можливість використання розподіленого моделюючого середовища. Ця система дозволяє забезпечити довільну міру деталізації моделей елементів розрахункових схем.

4. Вирішена проблема побудови структурованої системи сценаріїв тренувальних занять з доступом до інформації загальної моделі розосередженого на великій території енергообладнання і керуючого ним висококваліфікованого персоналу МЕМ великих ЕЕС. Це дозволяє формувати і контролювати важливі стійкі ключові компетентності оперативно-диспетчерського персоналу шляхом аналізу особливостей штатних режимів та швидкої ліквідації великих системних аварій.

5. Теоретично обґрунтовано і практично підтверджено можливість застосування нового підходу до моделювання великих ЕЕС. Це дозволяє використання заступних схем не тільки окремих елементів енергосистем (генераторів, ПЛ, трансформаторів і т. інше), а і окремих адміністративно-територіальних підприємств шляхом їх інтелектуального розосередження на окремих віртуальних комп'ютерах розподіленого інформаційного середовища.

6. Запропоновано та теоретично обґрунтовано новий підхід до вирішення проблеми побудови швидкодіючих методів розрахунку режимів роботи великих ЕЕС та ОЕС. Доведена практична можливість використовувати нові методи моделювання в розподіленому середовищі віртуальних тренажерних систем підготовки персоналу МЕМ ЕЕС та ОЕС. Результати розрахунків підтвердили можливість і ефективність асинхронного урівноваження результатів розрахунків в окремих віртуальних структурах, що досягається системою тригерних алгоритмів.

7. Розвинені теоретичні основи технології модельного конструювання повнофункціональних тренажерних систем МЕМ. Це дозволяє спростити розробку та створення веб-орієнтованих режимних диспетчерських тренажерів для різних рівнів ієрархічної системи керування великими ЕЕС з використанням розробленою авто-ром розосередженої інформаційної частини моделі ОЕС.

8. Розроблені нові алгоритми і методи візуалізації результатів моделювання штатних і аварійних режимів роботи великих ЕЕС і ОЕС у веб-браузерах користувачів повнофункціональних режимних тренажерних систем. Реалізовані алгоритми і методи візуалізації можуть також застосовуватися для використання в тренажерних системах для оперативного персоналу систем енергопостачання "Укрзалізниці", операторів нового ринку електроенергії та навчання спеціалістів в області кібербезпеки енергетики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Д. Вовк, “національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг,” 27 03 2018. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.nerc.gov.ua/?id=31909.
2. “Організація роботи з персоналом підприємств електроенергетики. Положення (СОУ-НМПЕ 40.1.12.104:2005),” 2005. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0559558-05.
3. “Положення про спеціальну підготовку і навчання з питань технічної експлуатації об'єктів електроенергетики,” 2004. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0418-04.
4. “Правила организации работы с персоналом на предприятиях и в учреждениях энергетического производства,” 1994. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://dokipedia.ru/document/5146151.
5. “Закон України «Про професійний розвиток працівників»,” Текст. дан., 2012. [Електронний ресурс]. Режим доступу: Режим доступу до ресурсу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/4312-17.
6. “Про затвердження Положення про дистанційне навчання,” 2013. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0703-13.
7. “Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила,” 2003. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/document?id=245088130.
8. В. О. Гурєєв, «Розробка алгоритмів і програм швидкодійних методів розрахунку режимів роботи великих електроенергетичних систем (ЕЕС) і енергооб'єднань (ЕО) для тренажерів,» *Наукові праці ВНТУ*, № 1, стр. 1-5, 2018.
9. В. О. Гурєєв, “Моделювання великих енергосистем для побудови комп'ютерних розподілених тренажерних систем в енергетиці,” *Моделювання та інформаційні технології. Збірник наукових праць ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова*, № 83, p. 94–105, 2018.
10. В. О. Гурєєв , «Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір Комп’ютерна програма "Повнофункціональний режимний веб-тренажер "ПОРТ" (ПОРТ) зареєстрована у у Державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір». Україна Патент 66010, 06 13 2016.

11. В. А. Гуреев, “Применение распределенных архитектур для систем и средств автоматизации процессов сбора данных и управления в энергетических системах Украины,” *Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej*, № 3, p. 903–908, 1997.
12. В. О. Гурєєв, «Розробка алгоритмів і програм швидкодійних методів розрахунку режимів роботи великих електроенергетичних систем (ЕЕС) і енергооб’єднань (ЕО),» в *Матеріали IVI міжнародної науково-технічної конференції "Оптимальне керування електроустановками". - Наукові праці ВНТУ*, Вінниця, 2018.
13. В. О. Гурєєв, “Моделі кібербезпекової компетентності оперативно-диспетчерського персоналу магістральних електромереж України,” в *Збірка праць науково-практичної конференції "Кібербезпека енергетики"*, Одеса, 2019.
14. В. О. Гурєєв, “Веб-орієнтовані технології побудови і організації функціонування тренажерних систем підготовки персоналу енергосистем України,” в *Матеріали науково-практичної конференції «Побудова інформаційного суспільства: ресурси і технології»*, Київ, 2019.
15. В. О. Гурєєв, «Контурна модель розрахунку режимів роботи електроенергетичних систем в комп’ютерних тренажерах,» в *Тези науково-практичної конференції Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України «Безпека енергетики в епоху цифрової трансформаці*, Киїі, 2019.
16. В. Н. Сулейманов, В. А. Гуреев и У. О. Саидов, «Оптимизация режимов работы электроэнергетических систем методом экстремального планирования эксперимента,» *Вестн. Киевск. политехн. ин-та. Сер. электроэнергетики*, стр. 61-64, 1982.
17. В. А. Гуреев, С. В. Колесников, И. В. Пашкова и др., «Цифровые имитационные тренажеры,» *Известия вузов, Энергетика,* № 4, стр. 3-9, 1989.
18. А. И. Ришкевич, С. В. Колесников и В. А. Гуреев, “Система противоаварийной диагностики персонала на основе микро ЭВМ,” *Моделирование в тренажерных системах: Сб. науч. тр./АН УССР. Ин-т пробл. моделирования в энергетике*, стр. 50-56, 1990.
19. В. А. Гуреев и Н. Н. Редковский, «Метод решения систем уравнений для определения режимов работы электрических сетей,» *Кибернетика и системный анализ*, т. №2, p. 3–12, 1993.

20. В. А. Гуреев и Н. Н. Редковский, «О решении нелинейных уравнений в задачах управления режимами электрических сетей,» *Кибернетика и системный анализ,* № №4, p. 122–130, 1993.
21. В. А. Гуреев и Н. Н. Редковский, «О параметрическом методе вычисления характеристик установившегося режима работы электрических сетей,» *Кибернетика и системный анализ,* № №4, p. 140–146, 1994.
22. В. А. Гуреев и Н. Н. Редковский, «Метод одновременного вычисления установившихся режимов и минимальных потерь в электрических сетях,» *Кибернетика и системный анализ,* № №6, p. 145–152, 1994.
23. В. А. Гуреев и Н. Н. Редковский, «О численном определении установившихся режимов работы электрических сетей,» *Электронное моделирование,* № №4, p. 59–62, 1994.
24. V. A. Gureev and N. N. Redkovsii, “On Some Special Features of Numerical Calculation of Steady State Conditions for Electric Power Systems,” *Gordon and Breach Science Publishers,* p. 165–172, 1995.
25. В. А. Гуреев и Н. Н. Редковский, «О некоторых особенностях численного расчета напряжений при моделировании установившихся режимов электроэнергетических систем,» *Электронное моделирование,* № №1, p. 92–96, 1995.
26. В. А. Гуреев и Н. Н. Редковский, «О стратегиях поведения итерационных методов при вырождении якобиана,» *Кибернетика и системный анализ,* № №2, p. 90–102, 1996.
27. Н. Н. Редковский и В. А. Гуреев, «О численном решении нелинейных уравнений,» *Доклады Академии Наук России,* № №5, p. 590–592, 1995..
28. N. N. Redkovsky and V. A. Goureev, “Optimization problems and calculation of electrical networks work regimes,” *Gordon and Breach Science Publishers,* p. 139–155, 1997.
29. В. А. Гуреев, В. Н. Сулейманов и Р. Надеран, «Методы и средства разработки полнофункциональных систем управления электрическими подстанциями,» *Технічна електродинаміка, тем. випуск. Проблеми сучасної електротехніки,* № Част.1, p. 83–89, 2002.
30. В. О. Гурєєв, О. В. Аветісян та О. В. Сангінова, «Розробка та застосування віртуальних ієрархічних структур для моделювання режимів, навчання і тренажу персоналу ОЕС України,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту,* № №1, p. 101 – 107, 2016..

31. В. А. Гуреев и О. В. Сангинова, “Распределенная среда моделирования режимов в полнофункциональном режимном тренажере (ПОРТ) для энергосистем Украины,” *Технічна електродинаміка*, №5, p. 67–69, 2016.
32. V. Gurieiev and O. Sanginova, “Simulation and study of modes for full-scale mode simulator for Ukrainian energy systems,” in *Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Kyiv, 2016.
33. В. А. Гуреев та О. В. Сангинова, «Методы и средства компьютерной системы обучения и тренажа (КСОТ) персонала объединенной электроэнергетической системы Украины,» *Моделювання та інформаційні технології. Збірник наукових праць ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова*, № 76, p. 95–99, 2016.
34. В. А. Гуреев, В. Д. Самойлов и О. В. Сангинова, «Принципы организации национальной системы обучения и тренажа персонала объединенной электроэнергетической системы Украины,» *Электронное моделирование*, № 4, p. 109–121, 2016.
35. В. М. Авраменко, Н. Т. Юнєєва, Т. М. Гурєєва та В. О. Гурєєв, «Комп'ютерний протиаварійний тренажер диспетчерів об'єднаної енергосистеми України,» *Електроніка та зв'язок*, т. 22, № 4, p. 69–74, 2017.
36. В. А. Гуреев и О. В. Сангинова, «Построение обучающего дистанционного тренажера для подготовки персонала энергетической отрасли,» *Праці Інституту електродинаміки НАНУ*, p. 52–58, 2017.
37. В. О. Гурєєв, Ю. Г. Куцан та Л. П. Заікіна, «Концепція освітньої професіональної мережі центрів системи підготовки персоналу департаменту електрифікації та електропостачання ПАТ "Українська залізниця,» *Моделювання та інформаційні технології. Збірник наукових праць ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова*, № 81, стр. 52-61, 2017.
38. Ю. Г. Куцан, В. О. Гурєєв, Є. М. Лисенко и О. В. Аветісян, “Кіберзагрози в електроенергетичних системах України,” *Электронне моделювання*, № 2, p. 63–80, 2019.
39. В. О. Гурєєв, О. В. Сангінова и Є. М. Лисенко, “Дослідження впливу параметрів прискорення збіжності ітераційних процесів моделювання режимів роботи великих енергосистем,” *Збірник наукових праць ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова*, № 84, p. 84–94, 2019.
40. В. О. Гурєєв, О. В. Сангінова та О. В. Аветісян, Методи моделювання та засоби побудови і функціонування віртуальних науково-навчальних центрів в енергетиці : монографія, К.: ВП «Едельвейс», 2019.

41. В. М. Авраменко, О. В. Мартинюк, Н. Т. Юнєєва та та ін., Комп’ютерне моделювання електроенергетичних об’єднань як нелінійних динамічних систем : монографія, К.: ВП «Едельвейс», 2019.
42. V. Babak, V. Isaienko, A. Zaporozhets and (Eds.), Systems, Decision and Control in Energy I. Studies in Systems, Decision and Control, Springer Nature Switzerland AG, 2020, p. 279.
43. Ю. Г. Куцан, В. О. Гурєєв та Є. М. Лисенко, «Моделювання і розробка адаптивної автоматизованої системи конструювання сценаріїв проти-аварійних тренувань,» *Электронне моделювання*, № 4, p. 55–64, 2018.
44. В. О. Гурєєв, Є. М. Лисенко та О. В. Аветісян, «Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір База даних "Інформаційно-режимна модель об’єднаної енергосистеми України" зареєстрована у Державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір». Україна Патент 86526, 04 03 2019.
45. В. Гуреев, Н. Н. Редковский и В. Г. Суманенков, “Информационная технология управления сложными распределенными техническими системами. тези доповідей I Українська конференція з автоматичного керування,” в *"Автоматика-94"*, Київ, 1994.
46. Е. В. Аветисян, В. А. Гуреев и О. В. Сангинова, “Разработка и применение виртуальных иерархических структур для моделирования режимов, обучения и тренажа персонала ОЕС Украины,” в *Матеріали III міжнародної науково-технічної конференції "Оптимальне керування електроустановками"*, Вінниця, 2015.
47. Y. Kutsan and V. Gurieiev, “Creating an international virtual energy cluster for radical increase of staff training and skills level,” in *The third Chinese – Ukraine Science and Technology Forum "Theoretical Basis of Simulation Technology in Energy Sector"*, Harbin, China, 2018.
48. Y. Kutsan and V. Gurieiev, “Technology of using of corporate cloudy infrastructure for development of universal simulators for operatively-controller's personnel of nuclear power plants Ukrain,” in *The Fourth China – Ukraine Forum on Science and Technology*, Harbin, China, 2018.
49. В. О. Гурєєв и Є. М. Лисенко, “Дослідження збіжності ітераційних методів розрахунку режимів роботи безконтурних електричних мереж,” в *Збірник тез XXXVII науково-технічна конференція молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України*, Київ, 2019.

50. В. О. Гурєєв и Є. М. Лисенко, “Модельне конструювання електронних ресурсів для навчання та тренажерної підготовки оперативно-диспетчерського персоналу енергосистем України,” в *Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформація, аналіз, прогноз – стратегічні важелі ефективного державного управління»*, Київ, 2019.
51. В. О. Гурєєв и Є. М. Лисенко, “Система автоматизації розрахунків в комп’ютерних тренажерах персоналу магістральних електричних мереж ОЕС України,” в *Тези науково-практичної конференції Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України «Безпека енергетики в епоху цифрової трансформації»*, Київ, 2019.
52. В. О. Гурєєв и Є. М. Лисенко, “Автоматизація конструювання та принципи організації тренувальних занять в комп’ютерних тренажерах оперативно-диспетчерського персоналу,” в *Тези науково-практичної конференції Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України «Безпека енергетики в епоху цифрової трансформації»*, Київ, 2019.
53. В. Н. Сулейманов , В. А. Гуреев и У. О. Саидов, «Многоцелевая оптимизация режимов работы энергетических систем методом экстремального планирования эксперимента,» *Энергетика и электрификация*, № 1, стр. 37-39, 1981.
54. В. Н. Сулейманов, В. А. Гуреев и У. О. Саидов, “Оптимизация режимов электроэнергетических систем модифицированным методом наискорейшего спуска и экстремального планирования эксперимента,” *Электрические сети и системы: Респ. межвед. научн.-техн. сб.*, № 1, стр. 96-100, 1981.
55. В. А. Гуреев и А. И. Ришкевич, “Программное обеспечение диагностирования персонала,” *Совершенствование технической диагностики энергетического оборудования*, стр. 101-103, 1984.
56. В. А. Гуреев и О. В. Сулейманова, «Синтез моделей предметной области противоаварийных тренировок,» *Энергетика и электрификация*, № 4, стр. 16-17, 1986.
57. В. А. Гуреев и О. В. Сулейманова, «Разработка архитектуры мини базы знаний противоаварийных тренировок,» *Энергетика и электрификация*, № 1, стр. 44-46, 1987.
58. А. В. Васильев, В. А. Гуреев и В. Д. Заикин, «Система автоматизированного проектирования технологических схем для задач

тренажа оперативного персонала с использованием ПЭВМ,» *Энергетика и электрификация,* № 1, стр. 25-28, 1994.

59. В. А. Гуреев, С. В. Колесников и Н. А. Сябер, “Автоматизация противоаварийных тренировок оперативного персонала Минэнерго УССР на базе сети микро ЭВМ,” *Энергетика и электрификация*, № 4, стр. 55-56, 1989.
60. В. А. Гуреев, В. Н. Сулейманов и Р. Надеран, «Современные методы и средства построения компьютерных тренажерных и обучающих систем,» *Новини енергетики,* № 5, стр. 39-43, 2003.
61. Н. А. Сябер и В. А. Гуреев, «Применение современных тренажерных технологий для обучения персонала в энергетике Украины,» *Энергетика и электрификация,* № 6, стр. 45-50, 2005.
62. В. А. Гуреев, В. Н. Сулейманов, О. В. Сулейманова и Р. Надеран, “Принципы построения информационной части модели электро-энергетики Украины,” *Электропанорама,* № 12, стр. 42-44, 2011.
63. В. А. Гуреев, В. Н. Сулейманов, О. В. Сулейманова и Р. Надеран, «Сущности и связи информационной части модели энергетики Украины,» *Электропанорама,* № 1-2, стр. 36-38, 2012.
64. Е. В. Аветисян, В. А. Гуреев и О. В. Сангинова, “Моделирование режимов, обучение и тренаж персонала с использованием виртуальной объединенной энергосистемы (ВОЄС) Украины,” *Энергетика и электрификация,* т. 9, стр. 28-35, 2014.
65. В. Н. Авраменко, Т. М. Гуреева и В. А. Гуреев, “Методика и программные средства для противоаварийного обучения диспетчерского персонала ОЕС Украины,” *Электрические сети и системы,* т. 2, стр. 14-20, 2016.
66. В. Ф. Скляров, Ю. М. Булавицкий, Н. Н. Красноштан и др., «Учебно-тренировочный центр Минэнерго УССР для подготовки оперативного персонала энергоблоков 300 МВт,» *Электрические станции,* № 10, стр. 10-15, 1981.
67. “Информация об авариях на Чернобыльской АЭС и ее последствия, подготовленная для МАГАТЭ,” *Атомная энергия,* т. 61, № 5, стр. 301-320, 1985.
68. А. А. Абагян и А. Е. Крошилин, “Проблемы разработки тренажеров и технических средств обучения для персонала АЭС,” *Теплоэнергетика,* № 8, стр. 34-37, 1990.

69. В. А. Машин, “Компьютеризированные системы поддержки операторов АЭС (психологические проблемы),” *Электрические станции*, № 7, стр. 2-7, 1995.
70. В. В. Охотин, “Принципы создания технологических программных систем с перестраиваемой структурой для тренажеров АЭС,” *Электронное моделирование*, № 1, стр. 77-80, 1989.
71. “Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2035 року “Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність” Розпорядження КМУ № 605-р,” 18.08.2017. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.kmu.gov.ua/ua/npas/250250456.
72. “Закон України «Про ринок електричної енергії України»,” Текст. дан., 2017. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/2019-19.
73. “Закон України «Про професійну (професійно-технічну)освіту»,” Текст. дан., 1998. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/103/98-%D0%B2%D1%80.
74. “Стратегія реформування ДП «НЕК «Укренерго»,” [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.slideshare.net/Ukrenergo/ss-102780816.
75. “Стратегія розвитку ДП «НЕК «Укренерго» 2017-2026,” 2017. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://ua.energy/wp-content/uploads/2017/04/170503-Ctrategiya.pdf.
76. “Закон України «Про електроенергетику»,” Текст. дан., 1997. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/575/97-%D0%B2%D1%80.
77. “Про Стратегію сталого розвитку "Україна - 2020",” 12.01.2015. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/5/2015.
78. “Інтеграція ОЕС України до загальноєвропейської енергосистеми ENTSO-E,” 2017. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://ua.energy/majbutnye-ukrenergo/integratsiya-do-entso-e/.
79. P. Cordel, J.-L. Chaze and G. Hodayer, “Les simulators de fonctionnement des reacteurs nuclearies français,” *Technica (Fr.)*, № 463, pp. 82-84, 1989.
80. E. Gaglioti, A. Iaria, D. Panasetsky, N. Voropai, G. Gianuzzi and A. Gubernali, “Inter-area oscillations in GE,” in *Turkey and IPS/UPS Power systems / Proceedings of SIGRE 2011. Bologna Symposium*, Bologna, 2011.

81. W. H. Miller, “Design and implementation of a simple nuclear power plant simulator,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research,* vol. 205, № 3, pp. 511-516, 1983.
82. В. И. Баланчевадзе, А. Ф. Бондаренко и Е. И. Кириенко, “Применение программного комплекса КАСКАД для проведения международной межсистемной противоаварийной тренировки,” *Электрические станции,* № 11, стр. 32-38, 1997.
83. M. Grabish, M. J. Nacbeth and G. I. Bereznai, “Microsimulation of a nuclear steam generator and ist in operator training,” in *Compint 85:1st. Int. Cont. Aid Technol.*, Washington. D. C., 1985.
84. M. Gueben, “Le simulateur "compact" de la centrale nucleare de Tihange,” *Electricite (Belg.),* № 174, pp. 19-24, 1982.
85. Р. Л. Тян, *Разработка и исследование методик и алгоритмов расчета электроєнергетических режимов в тренажере диспетчера энергосистемы,* Ставрополь, 2017.
86. «EPRI Operator Training Simulator,» [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.dsipower.com/Software/EPRI-OTS/tabid/1879/Default.aspx.
87. Р. Л. Тян, Е. Д. Карасев и В. П. Будовский, “Расчеты режима в диспетчерских тренажерах,” *Известия вузов. Электромеханика.,* т. 4, стр. 68-72, 2012.
88. «Dispatcher training simulator,» [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.fp7-pegase.com/training-simulator.php.
89. “Eurostag and associated products,” [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.eurostag.be.
90. J. Stoer and R. Bulirsch, Introduction to numerical analysis. – 3rd edition, New York: Springer, 2002.
91. Е. А. Волков, Численные методы, М.: Физматлит, 2003.
92. J. Grainger and W. Stevenson, “Power System Analysis,” New York, McGraw–Hill, 1994, pp. 41-82.
93. В. Т. Воронин, “Режимные тренажеры как средство обеспечения надежной работы оперативного персонала,” *Оперативное управление в энергетике,* т. 1, стр. 39-45, 2005.
94. «Закон України «Про вищу освіту»,» Текст. дан., 2014. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1556-18.

95. B. S. Bloom, Taxonomy of educational objectives: The classification of educational goals, Addison-Wesley Longman Ltd, 1956.
96. L. W. Anderson, D. R. Krathwohl, P. W. Airasian, K. A. Cruikshan, R. E. Mayer, P. R. Pintrich , J. Raths and M. C. Wittrock , A Taxonomy for Learning, Teaching, and Assessing: A Revision of Bloom's Taxonomy of Educational Objectives, Allyn and Bacon, 2001.
97. “IEEE 1484.20.1-2007 - IEEE Standard for Learning Technology-Data Model for Reusable Competency Definitions,” 27 Sep 2007. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://standards.ieee.org/standard/1484_20_1-2007.html.
98. “Pursuit of relevance. How higher education remains viable in today’s dynamic world. Executive Report,” 2015. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.ibm.com/downloads/cas/WQOK1GDN.
99. “ISO 10015:1999 - Quality management -- Guidelines for training,” 2005. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.iso.org/standard/21231.html.
100. “Аналитическая записка ЮНЕСКО «Диверсификация учебных платформ»,” 07 2011. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://iite.unesco.org/pics/publications/ru/.
101. “Закон України «Про освіту»,” Текст. дан., 2017. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2145-19.
102. “Системи дистанційного навчання,” [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://e-learning.co.ua/lms/. [доступ 2019].
103. В. И. Власенко, О. В. Дубровская и В. В. Вех, “Разработка методов оценки уровня профессионально важных качеств у слушателей военно-медицинских факультетов. Итоговый отчет о КНИР (шифр "Становление"),” Томск, 1998.
104. А. Ф. Дьяков, Надежная работа персонала в энергетике, М.: МЭИ, 1991.
105. А. Ф. Дьяков и Г. В. Меркурьев, “Поддержание надежности работы оперативно-диспетчерского персонала энергосистем,” *Электрические станции*, № 12, стр. 17-20, 1997.
106. А. Ф. Дьяков, И. И. Левченко, В. Н. Кулешов и и др., “Дистанционное обучение при переподготовке персонала энергетических предприятий,” *Электрические станции*, № 7, стр. 2-7, 1997.
107. Я. М. Магазаник, Дидактические и инженерно-психологические основы обучения операторским специальностям в теплоэнергетике, М.: Энергоатомиздат, 1988, p. 248.

108. А. Ф. Дьяков, И. Е. Лесковец, Г. В. Меркурьев и А. Д. Щербаков, “Оценка противоаварийных тренировок оперативно-диспетчерского персонала энергосистем,” *Электрические станции*, № 2, стр. 2-7, 1997.
109. В. В. Охотин и В. Б. Хозиев, “Современные тенденции тренажеростроения и компьютеризации подготовки персонала энергоблоков,” *Электрические станции*, № 10, стр. 23-27, 1994.
110. П. Я. Гальперин, Психология мышления и учение о поэтапном формировании умственных действий . - Исследования мышления в советской психологии, М.: Наука, 1966.
111. “НВ ТОВ "Інфотех",” Infotec Ltd, [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.infotec.ua/.
112. Базы данных. Проектирование, реализация и сопровождение. Теория и практика. 3-е издание. : Пер. с англ., М.: Издательский дом "Вильямс", 2003, p. 1440 .
113. Д. Крёнке, Теория и практика построения баз данных. 8-е изд., СПб: Питер, 2003, p. 800.
114. С. В. Глушаков и Д. В. Ломотько, Базы данных, Харьков: Фолио, 2000.
115. Администрирование баз данных Oracle в операционной системе UNIX, М.: ЦКТиП Газпром, 2003, p. 300.
116. L. Balmelli, D. Brown, M. Cantor and et al., “Model-driven systems development,” *IBM Systems Journal*, vol. 45, p. 569 – 585, 2006.
117. T. Erl, SOA Principles of Service Design, Boston: Prentice Hall, 2007.
118. С. Архипенков, Д. Голубев and О. Максименко, Хранилища данных. От концепции до внедрения, М.: Диалог-Мифи, 2002, p. 528.
119. О. Л. Голицына, Базы данных, М.: Форум, 2007, p. 399.
120. Р. Райордан, Основы реляционных баз данных/Пер, с англ., М.: Издательско-торговый дом «Русская Редакция», 2001, p. 384.
121. Информационные технологии. Основы работы с реляционной БД Oracle, М.: McGraw-Hill, 2002, p. 200.
122. Расширенное администрирование и настройка оптимальной производительности баз данных Oracle 9i, СПб: ЦКТиП Газпром, 2005.
123. Є. В. Буров, Концептуальне моделювання інтелектуальних програмних систем, Львів: вид-во Львівської політехніки, 2012.
124. N. F. Noy and D. L. McGuinness, “Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology,” [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://protege.stanford.edu.

125. J. Charvat, Project Management Methodologies, Wiley, 2003, p. 264.
126. И. П. Норенков, “Интеллектуальные технологии на основе онтологий,” *Информационные технологии,* т. 1, стр. 17-23, 2010.
127. Н. Ф. Ильинский и В. А. Цаценкин, Приложение теории графов к задачам электромеханики, М.: Энергия, 1968, p. 200.
128. Н. Кристофидес, Теория графов. Алгоритмический подход, М.: Мир, 1978, p. 429.
129. М. Свами и К. Тхуласираман , Графы, сети и алгоритмы, М.: Мир, 1984.
130. В. Т. Холмский, Расчет и оптимизация режимов электрических систем, М.:: Высшая школа, 1975.
131. Л. Р. Нейман и К. С. Демирчян, Теоретические основы электро-техники: в 2-х т. Учебник для вузов. Том I., 3 ed., т. 1, Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981, p. 536.
132. W. H. Hayt and J. E. Kemmerly, Engineering Circuit Analysis (5th ed.), New York: McGraw Hill, 1993.
133. Т. . Х. Кормен, Ч. И. Лейзерсон, Р. Л. Ривест и К. Штайн, Алгоритмы: построение и анализ, М.: Вильямс, 2012.
134. “Power Systems glossary. IBM Knowledge Center,” [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/ 9119-MME/p8hav/glossary.htm#gloss_V. [2019].
135. N. N. Bakhtadze, I. B. Yadykin, V. A. Lototsky, E. Maximov and E. Sakrutina, “Multi-agent Approach to Design of Multimodal Intelligent Immune System for Smart Grid,” in *7th IFAC Conference on Manufac-turing Modelling, Management and Control*, Saint Petersburg, 2013.
136. A. Grobovoi, V. Shipilov, A. Arestova, I. Yadykin, V. Afanasyev, A. Iskakov and D. Kataev, “Application of Gramians method for Smart Grid investigations on the example of the Russky Island Power Network,” in *Proceedings of IREP 2013 Symposium “Bulk Power Systems Dynamics and Control”*, Rethymno, 2013.
137. E. Jurmu and T. Åhman, “NOPS Nuclear power plant simulator for demonstration purposes,” in *Numerical simulation of processes: SIMS-88 Symposium*, Espoo, 1988.
138. C. M. Kand, “Compact Simulator for on-side reactor transient analysis and operator training,” in *Trans. Amer. Nucl. Soc., 1983, 45: Winter Meet.*, San Francisko, Calif., 1983.

139. H. D. Martin and F. Bennewitz, “Nuclear plant analyser aids analysis and training,” *Nuclear Engineering International,* vol. 34(418), pp. 47-48, 1989.
140. M. Pavella, D. Ernst and D. Ruiz-Vega, Transient stability of Power Systems. Unified Approach to assessment and Control, Boston-Dorndrecht-London: Kluwer Academic Publishers, 2000.
141. I. B. Yadykin, A. V. Ahmetzyanov and A. B. Iskakov, “Stability analysis of large scale electric power systems by Subgramian approach,” *International Journal of Robust and NЕлектронний ресурсar Control,* 2014.
142. Н. А. Абраменкова, Н. И. Воропай и Т. Б. Заславская, Структурный анализ электроэнергетических систем, Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1990.
143. З. М. Али и А. И. Маликов, “Локальное управление для улучшения устойчивости многомашинной энергетической системы,” *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики,* № 1-2, стр. 75-83, 2010.
144. В. К. Алтунин, “Обучающие системы и тренажеры,” *Приборы и системы управления,* № 3, стр. 15-17, 1995.
145. С. С. Ананичева и А. Л. Мызин, Схемы замещения и установившиеся режимы электрических сетей: Учеб. пособие, Екатеринбург: УрФУ, 2011.
146. С. С. Ананичева, А. А. Алексеев и А. Л. Мызин, Качество электроэнергии. Регулирование напряжения и частоты в энергосистемах: Учеб. пособие, Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2009.
147. П. Андерсон и А. Фуад, Управление энергосистемами и устойчивость, М.: Энергия, 1980, p. 568.
148. С. Анисимов, Н. Райбман, В. Дынькин, А. Касавин, В. Лотоцкий, А. Мандель и В. Чадеев, Основы управления технологическими процессами, М.: Наука, 1978.
149. А. Ахо, Д. Хопкрофт и Д. Ульман, Построение и анализ вычислительных алгоритмов, М.: Мир, 1979.
150. О. В. Балашов и В. В. Круглов , “Подход к извлечению продукционных правил для систем поддержки принятия решений,” 2006. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.sci.rostele com67.ru/user/sgma/MMORPH/N-12-html/borisov/balashov-2/balashov-2.htm.
151. В. Ф. Бардаченко, Ю. В. Королев, Ю. М. Волков и Г. И. Радельчук, “О реализации распределенных обучающих и тренажерных комплексов таймерного типа на базе персональных ЭВМ,” *Электронное моделирование,* № 5, стр. 101-103, 1989.

152. Н. Н. Бахтадзе, Ю. Н. Моржин и И. Б. Ядыкин, «Мультиагентная интеллектуальная иммунная система электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью,» *Автоматизация в промышленности*, № 4, стр. 61-64, 2012.

153. В. С. Беднаржевский, “Математические модели основа систем автоматизированного проектирования паровых котлов,” *Теплоэнергетика*, № 9, стр. 20-23, 1997.

154. В. П. Березников и Н. А. Богданович, “Организация воспроиз-ведения диалога и его автоматизированного построения в системе профессионального обучения оперативного персонала,” в *Модели-рование в тренажерных системах*, К., Наукова думка, 1990, с. 15-20.

155. В. Е. Бондаренко, “Семантические структуры для синтеза ситуационных тренажеров,” в *Моделирование в тренажерных системах*, К., Наукова думка, 1990, стр. 61-67.

156. О. А. Будникова и В. Н. Михайлов, “Система создания и отладки моделей логико-динамических систем,” в *Тез. докл. IV-й Всероссийской н.-метод. конф. "Тренажеры и компьютеризация профессиональной подготовки"*, Москва, 1994.

157. В. Н. Бусленко, Автоматизация имитационного моделирования сложных систем, М.: Наука, 1977.

158. Н. П. Бусленко, Н. Н. Калашников и И. Н. Коваленко, Лекции по теории сложных систем, М.: Коваленко, 1973.

159. И. В. Василевский, Е. В. Калентионок, М. В. Негневицкий и В. А. Файбисович, “Опыт разработки и эксплуатации противоаварийного тренажера диспетчера энергосистемы на базе ЭВМ СМ-4,” *Электрические станции*, № 2, стр. 2-9, 1990.

160. С. Н. Васильев, И. Б. Ядыкин и Н. Н. Бахтадзе, “Мультиагентная система иерархического управления режимом электроэнергетической системы России с активно-адативной сетью,” в *Труды 4-й Международной научно-технической конференции «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем»* , Екатеринбург, 2013.

161. В. А. Веников и О. А. Суханов, Кибернетические модели электрических систем, М.: Энергоиздат, 1982.

162. О. П. Верста и Н. С. Долгоносов, “Вопросы создания автоматизированной системы построения учебных задач в АСОТ,” в *Моделиро-вание в тренажерных системах*, К., Наукова думка, 1990, стр. 85-89.

163. В. В. Вех, “Внутреннее представление энергетических схем,” НИИ Автоматики и Электромеханики при ТУСУР, Томск, 1999.

164. В. В. Вех, “Язык описания сценариев тренировок в компьютерных тренажерах оперативных переключений,” НИИ Автоматики и Электромеханики при ТУСУР, Томск, 1999.

165. В. В. Вех, В. Волдачинский и И. А. Ходашинский, “Создание компьютерных тренажеров производства оперативных переключений в электроустановках,” *Электрические станции*, № 4, стр. 6-10, 1995.

166. В. В. Вех, Н. Н. Котов и И. А. Ходашинский, “Опыт разработки компьютерных тренажеров и обучающих программ,” *Энергетик,* № 1, стр. 22-23, 1998.

167. В. А. Веников, Электрические системы. Электрические сети, М.: Высш. шк., 1998.

168. В. И. Плютинский и В. В. Охотин, «Требования к точности динамических моделей тренажеров,» *Электронное моделирование,* № 1, стр. 81-85, 1985.

169. Т. Б. Заславская, А. Т. Путилова и М. А. Тагиров, “Функция Ляпунова как критерий синхронной динамической устойчивости,” *Электричество,* № 7, 1967.

170. А. В. Жуков, А. С. Александров, В. Г. Неуймин и Д. М. Максименко, «Развитие технологического алгоритма системы мониторинга запасов статической устойчивости с учетом действия локальной противоаварийной автоматики,» в *Труды 4-й международной научно-технической конференции Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем*, Екатеринбург, 2013.

171. Л. Т. Груйич, А. А. Мартынюк и М. Риббенс-Павелла , Устойчивость крупномасштабных систем при структурных и сингулярных возмущениях, К.: Наукова думка, 1984, p. 308.

172. Ю. Е. Гуревич, Л. Е. Либова и А. А. Окин, Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах, М.: Энергоатомиздат, 1990.

173. А. В. Домышев, “Блок анализа динамической устойчивости для ПВК АНАРЭС-2000,” в *Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН*, Иркутск, 2002.

174. Н. Г. Филиппова и Е. В. Тузлукова, “Модальный метод устойчивости энергосистем: новый метод определения собственных значений,” *Электричество,* № 4, стр. 5-19, 2006.

175. И. М. Маркович, Режимы энергетических систем, М.: Госэнергоиздат, 1963, p. 360.
176. Л. Д. Рожкова и В. С. Козулин, Электрооборудование станций и подстанций, 2-е изд. ed., М.: Энергоатомиздат, 1987, p. 648.
177. А. А. Горев, Избранные труды по вопросам устойчивости энергетических систем, М.: Госэнергоиздат, 1960.
178. “Types of Cloud Computing,” 2019. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://aws.amazon.com/types-of-cloud-computing/?WICC=tile&tile=types_of_cloud.
179. А. А. Герасименко и В. Т. Федин, Передача и распределение электрической энергии: Учебное пособие, Ростов-н / Д.: Красноярск: Издательские проекты, 2006, p. 720.
180. Под ред. С.В.Усова, Электрическая часть электростанций, Л.: Энергоатомиздат, 1987, p. 616.
181. В. И. Идельчик, Электрические системы и сети: Учеб. для вуз., М.: Энергоатомиздат, 1989.
182. С. С. Под ред. Рокотяна и И. М. Шапиро, Справочник по проектированию электроэнергетических систем, М.: Энергоатомиздат, 1985.
183. К. Э. Шеннон , Работы по теории информации и кибернетике, М.: Изд-во иностр. лит., 1959.
184. С. В. Шиловский, “Закономерности формирования спектров и структур собственных электромеханических колебаний,” *Известия Томского политехнического университета. Энергетика*, т. 312, № 4, стр. 80-85, 2008.
185. Б. Н. Неклепаев, Электрическая часть электростанций и подстанций: Учебник для вузов, 2-е изд., перераб. и доп. ed., М.: Энергоатомиздат, 1986, p. 640.
186. И. П. Копылов, Математическое моделирование электрических машин: Учеб. для вузов, 3-е изд., перераб. и доп. ed., М.: Высш. шк., 2001.
187. Н. И. Воропай, Упрощение математических моделей динамики электроэнергетических систем, Новосибирск: Наука, Сиб. отделение, 1981.
188. Л. Т. Кузин, “Т. 2. Основы кибернетических моделей. Учебное пособие для вузов,” в *Основы кибернетики. В двух томах*, М., Энергия, 1979, стр. 6-12.
189. Г. Е. Пухов, “Математическая модель для расчета динамической устойчивости электрических систем,” *Электричество*, № II, стр. 17-20, 1978.

190. Г. Е. Пухов, Преобразования Тейлора и их применение в электротехнике и электронике, К.: Наукова думка, 1978, p. 260.

191. Р. С. Гутер, Л. Д. Кудрявцев и Б. М. Левитан, Элементы теории функций: Функции действительного переменного приближения функций почти-периодические функции, М.: Физматгиз, 1963.

192. А. Н. Борзых, *О новых методах решения частичной проблемы собственных значений : диссертация*, к. ф-м. н., 2008.

193. А. П. Ефремов, *Исследование кватернионных пространств и их взаимосвязи с системами отсчета и физическими полями : диссертация*, д. ф-м. н., 2005.

194. М. Д. Абдель, *Разработка алгоритмического и программного обеспечения библиотеки программ для решения итерационными методами некоторых классов систем линейных алгебраических уравнений большой размерности : диссертация*, к.т.н., 2008.

195. М. И. Германенко, *Комплекс программ для безошибочных дробно-рациональных вычислений и его применение для решения систем линейных алгебраических уравнений*, к. ф-м. н, 2009.

196. Е. Н. Акимова, *Параллельные алгоритмы решения задач грави-магнитометрии и упругости на многопроцессорных системах с распределенной памятью*, д. ф-м. н., 2009.

197. В. И. Иордан, *Эффективные методы определения энергетического спектра матриц большой размерности в задачах экспериментальной физики*, к. ф-м. н., 2003.

198. А. Е. Кочура, Л. В. Подкользина, Я. А. Ивакин и И. И. Нидзиев, “Разработка алгоритма решения систем линейных уравнений с варьируемыми параметрами, использующего разреженность матрицы,” *Труды СПИИРАН*, т. 2(33), стр. 79-98, 2014.

199. В. Н. Кублановская, “О связи спектральной задачи для линейных пучков матриц с некоторыми задачами алгебры.,” *Записки научных семинаров ЛОМИ "Численные методы и вопросы организации вычислений"*, т. 80, стр. 98-116, 1978.

200. P. Van Dooren, “Reducing subspaces: definition, principles и algorithms,” in *Ka gstro m B., Ruhe A. Matrix pencils. Proceedings, Pite Havsbad, 1982, Lecture Notes in Mathematics 973*, Berlin, 1983.

201. P. Van Dooren, “The computation of Kronecker's canonical form of a singular pencil,” *Lin. Alg. & Appl.*, vol. 27, стр. 103-141, 1979.

202. V. D. Borisevich and V. G. Potemkin, “Direct method for SNAE solving in modeling of gas flow in centrifuge,” in */Separation Phenomena in Liquids and Gases. Fourth Workshop procceedings. Ed. C. Ying. Tsinghua University*, Beijing, 1994.

203. В. Г. Потемкин, “Алгоритм решения систем нелинейных алгебраических уравнений на основе разложения сингулярного пучка матриц,” *Вестник Российской транспьютерной ассоциации*, т. 2(13), стр. 5-18, 1994.

204. Ф. Р. Гантмахер , Теория матриц. 4-е изд., М.: Наука, 1988.

205. B. Buchberger, “Gro bner Bases: An algorithmic method in polynomial ideal theory,” in *Multidimensional systems theory (Ed. N.K. Bose.)*, D. Reidel Publ. Comp., 1985, pp. 184-232.

206. “Ka gstro m B. RGSVD - An algorithm for computing the Kronecker structure and reducing subspaces of singular A-l B pencils,” *SIAM J. Sci. Stat. Comput*, vol. 7, № 1. Jan, pp. 185-211, 1986.

207. В. А. Уфнаровский, “Комбинаторные и асимптотические методы алгебры,” в *Итоги науки и техники. Современные проблемы математики. Фундаментальные направления. Т.57. Алгебра 6*, т. 57, М., ВИНИТИ, 1990, стр. 7-177.

208. Р. Уилкинсон, Справочник алгоритмов на языке АЛГОЛ. Линейная алгебра. : Пер. с англ, М.: Машиностроение, 1976.

209. G. H. Golub and C. F. van Loan, Matrix computations, North Oxford Academic Publishers Ltd, 1986.

210. И. А. Жуков, “Концепция создания параллельных вычислительных систем для решения задач большой размерности,” *Проблемы информатизации и управления*, № 2, стр. 3-7, 1997.

211. И. А. Жуков, “Методология синтеза параллельных вычислительных систем,” *Проблемы информатизации и управления*, № 2, стр. 7-10, 1997.

212. А. Н. Нестеренко, О. В. Попов и О. В. Рудич, “Розв’язування систем нелінійних рівнянь на комп’ютерах з паралельною організацією обчислень,” *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Фізико-математичні науки*, № 19, стр. 85-91, 2019.

213. А. Н. Химич, И. Н. Молчанов, А. В. Попов и и др. , Параллельные алгоритмы решения задач вычислительной математики, Киев: Наук. думка, 2008.

214. А. Н. Химич, А. В. Попов и А. В. Чистяков, “Гибридные алгоритмы решения алгебраической проблемы собственных значений с

разреженными матрицами,” *Кибернетика и системный анализ*, т. 53, № 6, p. 132–146, 2017.

215. А. Н. Нестеренко, А. Н. Химич и М. Ф. Яковлев, “Некоторые вопросы решения систем нелинейных уравнений на многопроцессорных вычислительных системах с распределенной памятью,” *Вестник компьютерных и информационных технологий*, т. 10, p. 54–56, 2006.
216. В. В. Охотин, А. И. Балашов и Г. А. Кузин, «К реализации тренажерных комплексов на базе специализированных ПЭВМ,» *Электронное моделирование*, № 1, стр. 84-85, 1993.
217. В. В. Охотин, Г. Б. Беляев, А. И. Балашов и и др., “Диалоговый тренажер систем подпитки и компенсации давления энергоблока ВВЭР-440,” *Электрические станции*, № 9, стр. 2-5, 1991.
218. В. В. Охотин, Н. Д. Кузнецов, Г. Б. Беляев и и др., “Автоматизированная обучающая система для подготовки персонала цехов ТАИ,” *Электрические станции*, № 3, стр. 15-17, 1993.
219. Л. Д. Пашков, “Опыт разработки логико-динамических моделей для тренажеров энергетического оборудования,” *Электрические станции*, № 11, стр. 25-28, 1995.
220. *Каталог тренажеров и обучающих систем, представляемых ГВЦ энергетики*, М.: ГВЦ, 1995.
221. А. П. Писаренко и О. Я. Стеценко, «Технология построения дисплейных тренажеров подсистем энергетических объектов управления,» в *Моделирование в тренажерных системах*, Киев, Наукова думка, 1990, стр. 21-26.
222. И. В. Прангишвили, А. А. Амбарцумян, А. Г. Полетыкин, Г. Г. Гребенюк и И. Б. Ядыкин, “Состояние уровня автоматизации энергетических объектов и системотехнические решения, направленные на его повышение,” *Проблемы управления*, № 2, стр. 11-17, 2002.
223. Б. Я. Прушинский, “По поводу статьи Машина В.А. «Компьютеризированные системы поддержки операторов АЭС (психологические проблемы)»,” *Электрические станции*, № 7, стр. 8-10, 1995.
224. М. А. Рабинович, Ю. И. Моржин и Д. М. Парфенов, «Многофункциональный тренажер советчик диспетчера с динамической моделью энергообъединения,» *Электрические станции*, № 9, стр. 33-39, 1994.
225. В. В. Румянцев, “Тренажеры и гармонизация взаимодействия человек-машина при управлении АЭС,” *Атомная техника за рубежом*, № 4, стр. 18-24, 1994.

226. В. Н. Стряпан, А. И. Скрыпник, Д. М. Косар и и др., “Тренажер по оперативным переключениям в электрических сетях,” *Электрические станции*, № 4, стр. 11-13, 1985.

227. В. Н. Стряпан, А. Д. Дембицкая и В. П. Кидыба, «Применение тренажеров для подготовки оперативного персонала АЭС,» *Атомная техника за рубежом*, № 4, стр. 13-17, 1989.

228. Р. Д. Ципцюра, Принципы обучения операторов в АСУТП с помощью комплекта тренажеров, Киев: Знание, 1980.

229. “Тренажеры для электростанций,” *Проспект фирмы Nokia Electronics (Финляндия)*, p. 15, 1985.

230. “Тренажеры МП "Таймен",” *Электрические станции*, № 10, стр. 79-80, 1992.

231. Б. И. Иофьев, “Пути создания единой системы автоматического и оперативного управления электроэнергетическим объектом в нормальных и аварийных условиях его работы,” *Электрические станции*, № 10, стр. 46-55, 1996.

232. В. П. Сучков и А. В. Татаринов, “Компьютерные тренажерные системы для технологических отраслей промышленности,” *Приборы и системы управления*, № 5, стр. 3-5, 1994.

233. И. О. Волкова, В. В. Бушуев, Ф. В. Веселов и и др., Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью, М.: ОАО "Федеральная сетевая компания Единой Электроэнергетической системы", 2012.

234. А. С. Катасёв и Ч. Ф. Ахатова, “Нейронечеткая система обнаружения продукционных зависимостей в базах данных,” *Программные продукты и системы*, № 3, стр. 26-32, 2011.

235. Е. А. Логунова, “Обзор методов формирования баз знаний,” в *Технические науки: теория и практика: материалы Междунар. науч. конф.*, Чита, 2012.

236. Г. Крон, Исследование сложных систем по частям - диакоптика, Москва: Наука, 1972.

237. H. E. Brown, Solution of Large Networks by Matrix Methods, New York: Wiley, 1985.

238. Н. П. Бадалян, Анализ и расчёт методов коррекции установившихся режимов электрических систем : учеб. пособие, Владимир: ВлГУ ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых, 2017.

239. Б. И. Аюев, В. В. Давыдов и В. Г. Неуймин , “Анализ эффективности вычислительных моделей расчета установившихся режимов электрических систем / Б. И. Аюев, В. В. Давыдов, В. Г. Неуймин,” *Электричество,* т. 8, стр. 2-14, 2008.

240. С. А. Совалов, Режимы Единой энергосистемы, М.: Энергоатомиздат, 1983, p. 384.

241. В. А. Баринов и С. А. Совалов, Режимы энергосистем: Методы анализа и управления, М.: Энергоиздат, 1990, p. 440.

242. Н. Н. Редковский, “Численный метод решения систем нелинейных уравнений,” *Докл. АН СССР*, т. 6, p. 1319 — 1321, 1982.

243. Н. Н. Редковский, “Численный метод решения систем нелинейных уравнений при помощи криволинейного спуска,” *Журн.вычисл.математики и мат.физики,* т. 2, стр. 261-266, 1983.

244. А. Пер.с англ. Брамеллер, Р. Аллан и Я. Хэмэм, Слабозаполненные матрицы: Анализ электроэнергетических систем, М.: Энергия, 1979, p. 192.

245. О. Эстербю и З. Златев, Прямые методы для разреженных матриц / Пер. с англ., М.: Мир, 1987, p. 120.

246. Х. Ф. Фазылов, Методы режимных расчетов электрических систем, Ташкент: Наука, 1964, p. 100.

247. Н. Н. Редковский, “Об одном численном методе решения систем нелинейных уравнений,” *Кибернетика*, т. 3, стр. 60-69, 1990.

248. А. С. Рубашкин, “Построение математической модели энергоблока для обучения и тренировки оперативного персонала,” *Теплоэнергетика,* № 11, стр. 9-14, 1990.

249. Ф. Ф. Родюков, “Построение корректной математической модели большой электроэнергетической системы методами аналитической механики,” *Электронный журнал "Математика в ВУЗе"*, № 6, 2004.

250. В. А. Прянишников и Н. Н. Губанов, «Метод обводов и его применение к анализу электрических и электронных схем,» *Электронное моделирование,* № 2, стр. 45-50, 1990.

251. М. Ш. Мисриханов и В. Н. Рябченко, «Матричная сигнум-функция в задачах анализа и синтеза линейных систем,» *Автоматика и телемеханика,* № 2, стр. 26-51, 2008.

252. С. И. Магид, И. П. Гержой, В. З. Зарецкий и др., «Разработка и реализация моделей теплотехнических процессов для тренажеров учебно-тренировочного центра Мосэнерго,» *Электрические станции,* № 10, стр. 53-59, 1984.

253. В. А. Литвинчук, “Расчет параметров эквивалентной математической модели электростанции,” *Электронное моделирование,* № 1, стр. 97-98, 1990.

254. Н. Ю. Кудрявцев, В. А. Мартынов, М. В. Сидулов и и др., “Компьютерное моделирование режимов работы паровых котлов и теплосети ТЭЦ-26,” *Теплоэнергетика,* № 6, стр. 41-46, 1996.

255. А. С. Иванов, *Математические модели и алгоритмы функционирования продукционных баз знаний,* Саратов, 2007.

256. В. Г. Дубовой, “Моделирование переключений в электроустановках,” *Электричество,* № 11, стр. 2-9, 1996.

257. В. М. Дозорцев, “Динамическое моделирование в оптимальном управлении и автоматизированном обучении операторов технологических процессов. Ч. 1. Задачи оптимального управления,” *Приборы и системы управления*, № 7, стр. 46-51, 1996.

258. В. М. Дозорцев, “Динамическое моделирование в оптимальном управлении и автоматизированном обучении операторов технологических процессов. Ч. 2. Компьютерные тренажеры реального времени,” *Приборы и системы управления,* № 8, стр. 41-50, 1996.

259. Л. И. Григорьев, “Уровни моделирования в компьютерном обучении,” в *Тез. докл. IV-й Всероссийской н.-метод. конф. "Тренажеры и компьютеризация профессиональной подготовки",* М., 1994.

260. А. Ахо и Д. Ульман, Теория синтаксического анализа перевода и компиляции. В двух томах. Т. 1. Синтаксического анализ, М.: Мир, 1978.

261. Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков и Г. М. Кобельков, Численные методы, М.: Бином, 2007.

262. Б. П. Демидович, Основы вычислительной математики, М.: Наука, 1994.

263. Л. П. Фельдман, А. І. Петренко и О. А. Дмитрієва, Чисельні методи в інформатиці, К.: Видавнича група BHV, 2006.

264. Л. И. Турчак, Основы численных методов, М.: Наука, 1997.

265. О. В. Кириленко, М. С. Сегеда, О. Ф. Буткевич и Т. А. Мазур, Математичне моделювання в електроенергетиці: підручник, Львів: Вид. «Львівськаполітехніка», 2010, p. 608.

266. С. А. Ульянов, Электромагнитные переходные процессы в электрических системах, М.: Энергия, 1970, p. 518 .

267. G. Engl, A. Kroener and M. Pottmann, “Practical aspects of dynamic simulation in plant engineering,” in *20th European Symposium on Computer Aided Process Engineering ESCAPE 20*, Naples, Italy, 2010.

268. “Real time digital simulator,” RTDS Technologies Inc., 2019. [Електронний ресурс]. Режим доступу: www.rtds.com/.

269. “Режимный тренажер диспетчера Финист,” [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.monitel.ru/download/Finist.pdf. [2020].

270. А. С. Гусев, Р. А. Вайнштейн и С. В. Свечкарев, «Устройство для моделирования синхронной машины / Опубл. В БИ №16». Патент РФ Патент 2018953, 1994.

271. А. С. Гусев, “Гибридная модель ЭЭС,” в *ез. докл. всеросс. научн.-техн. сем. изд-во ТПУ*, Томск, 1994.

272. К. С. Демирчян, В. М. Волков и Е. Н. Карташев, “Сравнительный анализ методов численного интегрирования при расчёте переходных процессов в электрических цепях,” *Электричество*, т. 9, стр. 47-51, 1976.

273. Г. Е. Пухов и М. Н. Кулик, Гибридное моделирование в энергетике, Киев: Наукова думка, 1977.

274. А. С. Гусев, С. В. Свечкарев, А. Ф. Прутик и Ю. С. Боровиков, “Всережимный диспетчерский тренажер реального времени электроэнергетических систем,” *Известия вузов. Проблемы энергетики*, т. 3, стр. 140-146, 2010.

275. А. С. Гусев, С. В. Свечкарёв и И. Л. Плодистый, “Адаптируемая математическая модель систем возбуждения синхронных машин,” в *изд. ТПУ*, Т, 2005.

276. А. С. Гусев, С. В. Свечкарёв и И. Л. Плодистый, “Всережимные математические модели линий электропередачи,” в *Известия ТПУ изд. ТПУ*, Т, 2005.

277. А. С. Гусев, С. В. Свечкарев и И. П. Плодистый, “Основные аспекты проблемы моделирования электроэнергетических систем, перспективы и средства их решения,” *Известия Вузов. Электромеханика*, т. 3, стр. 92-95, 2006.

278. A. Buttari, “Software Tools for Sparse Linear Algebra Computations,” [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.132.7162&rep=rep1&type=pdf.

279. J. Demmel, “CS170: Efficient Algorithms and Intractable Problems,” [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.cs.berkeley.edu/~demmel/cs170_Spr10/#starthere.

280. J. Demmel, “U.C. Berkeley CS267/EngC233 Home Page: Applications of Parallel Computers,” [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.cs.berkeley.edu/~demmel/cs267_Spr10/.

281. J. Demmel, “U.C. Berkeley Math 221 Home Page: Matrix Computations / Numerical Linear Algebra,” [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.cs.berkeley.edu/~demmel/ma221.

282. J. Demmel, “Официальная страница Джеймса Деммеля (James Demmel Home Page),” [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.cs. berkeley.edu/~demmel/.

283. “Справочная система к библиотеке PETSc,” [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.geo.uu.nl/~govers/petsc/ node36.html# Node36.

284. “What is Cloud Computing? - Amazon Web Services,” 2019. [Елект-ронний ресурс]. Режим доступу: https://aws.amazon.com/what-is-cloud-computing/.

285. R. Baburajan, “The Rising Cloud Storage Market Opportunity Strengthens Vendors,” 24 Aug 2011. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://technews.tmcnet.com/channels/cloud-storage/articles/211183-rising-cloud-storage-market-opportunity-strengthens-vendors.htm.

286. K. Oestreich, “Converged Infrastructure,” 12 Dec 2013. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.cioandleader.com/articles/7505/converged-infrastructure.

287. M. Hamdaqa and L. Tahvildari, “Cloud Computing Uncovered: A Research Landscape,” *Advances in Computers*, т. 86, стр. 41-85, 2012.

288. R. Duncan , “The Opportunities Cloud Service Providers Should Pursue in 2020,” 2019. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://blogs.idc.com/2019/07/30/the-opportunities-cloud-service-providers-should-pursue-in-2020/.

289. K. Subramanian, “Recession Is Good For Cloud Computing – Microsoft Agrees,” 2009. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.cloudave.com/2425/recession-is-good-for-cloud-computing-microsoft-agrees/.

290. P. Mell and T. Grance , “The NIST Definition of Cloud Computing,” Sep 2011. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://csrc.nist.gov/publications/detail/sp/800-145/final.

291. T. Bittman, “Mind the Gap: Here Comes Hybrid Cloud,” Sep 2012. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://blogs.gartner.com/thomas_bittman/2012/09/24/mind-the-gap-here-comes-hybrid-cloud/.

292. V. D. Cunsolo, S. Distefano, A. Puliafito and M. Scarpa, “Volunteer Computing and Desktop Cloud:,” in *IEEE International Symposium on Network Computing and Applications*, 2009.

293. D. Bernstein, E. Ludvigson, K. Sankar, S. Diamond and M. Morrow, “Blueprint for the Intercloud – Protocols and Formats for Cloud Computing Interoperability,” *IEEE Computer Society*, p. 328–336, 2009.

294. “Virtual Machines: Virtualization vs. Emulation,” 16 Aug 2006. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.griffincaprio.com/blog/2006/08/virtual-machines-virtualization-vs-emulation.html.

295. О. В. Аветісян, “Создание противоаварийных тренировок (ПТ) с использованием ПТК ОП++,” 2016. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://infotec.ua/moodle/enrol/index.php?id=13.

296. “Інститут електродинаміки Національної академії наук України,” [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://ied.org.ua.

297. “Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова,” [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://ipme.kiev.ua/.

298. “Центр підвищення кваліфікації керівників і спеціалістів Міненерговугілля КПІ ім. Ігоря Сікорського,” [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://ipo.kpi.ua/ua/pkv-energ.html.

299. “6th Annual LMS Data Update. Edutechnica,” 6 Oct 2018. [Електронний ресурс]. Режим доступу: Режим доступу: http://edutechnica.com/2018/10/06/6th-annual-lms-data-update/.

300. А. Е. Кочура, А. И. Михеев и Б. Н. Куценко, “Декомпозия и технология разреженных матриц в задачах исследования сложных систсем,” *Записки Горного института*, т. 167, № 1, стр. 272-276, 2006.

301. А. Е. Кочура, Декомпозиция и технология разреженных матриц в динамике систем, СПб: ИПРЖР, 2001.

302. С. Писсанецки, Технология разреженных матриц, М: Мир, 1988.

303. В. Н. Гридин, В. И. Анисимов и С. А. Алмаасали, “Применение метода диакоптики для моделирования и расчета больших систем,” *Проблемы управления*, т. 4, стр. 9-13, 2014.

304. Х. Хэпп, Диакоптика и электрические цепи, М.: Мир, 1974.

305. Л. О. Чуа и П. М. Лин, Машинный анализ электронных схем, М.: Энергия, 1980.

306. И. П. Норенков, Введение в автоматизированное проектирование техниеских устройств и систем, М.: Высшая школа, 1986.

307. В. И. Анисимов, О. Б. Тарасова и С. А. Алмаасали , “Организация вычислительных процессов при проекировании систем на основе методов диакоптики,” *Информационные технологии в проектировании и производстве*, т. 4, стр. 14-17, 2013.

308. С. А. Алмаасали и В. И. Анисимов , “Построение распределенных систем автоматизированного проектирования на основе методов диакоптики,” *Известия СПбГЭТУ*, т. 1, стр. 15-19, 2014.

309. В. С. Павлюков и С. В. Павлюков, “Модели прогноза потерь энергии на базе достоверизации схемно-режимных параметров электрических сетей,” *Электрика*, т. 12, стр. 14-20, 2009.

310. А. В. Лыкин, Электрические системы и сети: учеб. пособие по направлению «Электроэнергетика», М.: Логос, 2008, p. 253.

311. В. И. Тарасов, Теоретические основы анализа установившихся режимов электроэнергетических систем, Новосибирск: Наука, 2002, p. 344.

312. Г. А. Конов, А. В. Паздерин и Е. А. Плесняев, “Конов, Г.А. Исследования режимов распределения потоков энергии в электрических сетях /,” *естник УГТУ–УПИ*, т. 2 (10), стр. 55-60, 2000.

313. В. В. Воеводин, Математические модели и методы в параллельных процессах, М.: Наука, 1986.

314. Я. Под ред. Ковалика, Высокоскоростные вычисления. Архитектура, производительность, прикладные алгоритмы и программы суперЭВМ : Перевод с англ., М: Радио и связь, 1988.

315. С. Под ред. Гуна, Х. Уайтхеда и Т. Кайлата, Сверхбольшие интегральные схемы и современная обработка сигналов: Перевод с англ., М.: Радио и связь, 1989.

316. А. И. Галушкин, Теория нейронных сетей, М: ИПРЖР, 2000.

317. “SCORM® Overview. The Advanced Distributed Learning Initiative,” 2004. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://adlnet.gov/research/scorm/. [Accessed 2019].

318. “Tin Can Evolution,” [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://xapi.com/tin-can-evolution/. [Accessed 2019].

319. K. Shutler, “SCORM is dead – what are the alternatives to SCORM,” 22 Aug 2018. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://plume.co. uk/scorm-is-stagnant-heres-what-to-use-instead/.

320. “Drupal - Open Source CMS,” [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.drupal.org/.

321. “Joomla Content Management System (CMS),” [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.joomla.org/.
322. R. K. Ellis, “Field Guide to Learning Management, ASTD Learning Circuits,” 2009. [Електронний ресурс]. Режим доступу: www.astd.org/~/media/Files/Publications/LMS_fieldguide_20091.
323. “LMS Collaborator,” 2019. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://collaborator.biz/.
324. J. Martinez, “The Best eLearning Authoring Tools of 2017,” 29 Nov 2017. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://uk.pcmag.com/cloud-services/85068/the-best-elearning-authoring-tools.
325. “Prometheus,” 2019. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://prometheus.org.ua/.
326. “landingAsnovator - Дистанційне навчання співробітників онлайн,” 2019. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://asnovator.com/.
327. “Освітня платформа Eduget,” 2019. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.eduget.com/.
328. “Moodle - Open-Source Learning Platform,” 2019. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://moodle.org.
329. “SAP Learning Hub Solution Editions,” [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://training.sap.com/content/LHSolutionEditions#. [Accessed 2019].
330. “Oracle Academy,” [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://ilearning.oracle.com/ilearn/en/learner/jsp/login.jsp?site=OracleAcad. [Accessed 2019].
331. “PeopleSoft Enterprise Learning Management (Oracle),” [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.oracle.com/us/products/applications/peoplesoft-enterprise/hcm/052836.html. [Accessed 2019].
332. “Вікі,” 2019. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D1%96%D0%BA%D1%96.
333. В. Д. Самойлов, “Основы автоматизированного построения тренажерно-обу-чающих систем и систем профессиональной диагностики,” в *Моделирование в тренажерных системах*, Киев, Наукова думка, 1990, стр. 3-15.

ДОДАТОК А. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

Найменування ВИКОНАВЦЯ:	**Найменування ЗАМОВНИКА:**
НВ ТОВ "Інфотех", ЄДРПОУ 03001744; Адреса: 04080, м. Київ, вул. Фрунзе, 85; п/р №26008000020573 у ПАТ "Укрсоцбанк" у м. Києві, МФО 300023; ІПН 030017426567, НПС 200147954	ДП "НЕК "Укренерго", ЄДРПОУ 00100227; Адреса: 01032, м. Київ, вул. С. Петлюри, 25; п/р 26008010066033 в АТ "Укрексімбанк", МФО 322313; ІПН 001002226654, НПС 200037859

А К Т №01-01-6/3506-14
прийому-передачі виконаних робіт
за договором №01-6/3506-14 від 05 листопада 2014 р.

Послуги щодо проектування та розробляння у сфері інформаційних технологій (Розробка, поставка та включення до складу бази даних системи дистанційного навчання та тренажу персоналу (СДНТП) ДП "НЕК "Укренерго" електронних навчальних (дистанційних) курсів за тематикою роботи релейного захисту ПЛ 220-750 кВ з використанням ДЗ 7SA522)

(найменування робіт)

м. Київ "25" грудня 2014 р.

Ми, що підписалися нижче, представник Виконавця **генеральний директор НВ ТОВ "Інфотех" Гурєєв В.О.**, з однієї сторони, та представник Замовника **Директор ДП "НЕК "Укренерго" Ущаповський К.В.**, з іншої сторони, склали цей акт про те, що результати виконаних робіт, які здаються Виконавцем і приймаються Замовником, задовольняють умовам договору №01-6/3506-14 від 05.11.2014 р. (надалі – Договір), належним чином виконані та оформлені.

Стислий опис виконаних робіт, які здаються (приймаються):

1. Відповідно до Завдання та Технічних вимог Замовника Виконавцем виконані:
   - розробка, поставка, налаштування та включення до існуючої бази даних СДНТП ДП "НЕК "Укренерго" (за адресою: 01032, м. Київ, вул. Симона Петлюри, 25) 2-х електронних навчальних (дистанційних) курсів (ДК) за тематикою роботи РЗ ПЛ 220-750 кВ з використанням ДЗ 7SA522;
   - розробка посібника викладача та користувача з проведення дистанційного навчання персоналу служб РЗА енергосистем ДП "НЕК "Укренерго" за тематикою роботи РЗ ПЛ 220-750 з використанням ДЗ 7SA522 для 2-х ДК;
   - первинне навчання викладачів ДП "НЕК "Укренерго", що відповідатимуть за використання ДК, правилам і прийомам використання електронної бібліотеки з ДК за тематикою роботи РЗ ПЛ 220-750 з використанням ДЗ 7SA522;
   - проведення дистанційного навчання "пілотної" групи персоналу служб РЗА за тематикою роботи РЗ ПЛ 220-750 кВ з використанням ДЗ 7SA522;
2. Стосовно електронної бібліотеки з ДК РЗ ПЛ 220-750 кВ з використанням ДЗ 7SA522 забезпечені:
   - можливість її експлуатації у СДНТП ДП "НЕК "Укренерго" (за адресою: 01032, м. Київ, вул. Симона Петлюри, 25) на необмеженій кількості робочих станцій;
   - доступ до неї через ТКС "Енергія" з робочих станцій всіх енергосистем ДП "НЕК "Укренерго", штатним чином зареєстрованих у СДНТП.

3. Складові частини ДК містять організаційні, учбово-методичні матеріали і методичні вказівки щодо виконання завдань для практичних і семінарських занять, які визначають структуру, зміст, методичні та програмно-технічні умови застосування ДК за тематикою релейного захисту ПЛ 220-750 кВ з використанням ДЗ 7SA522 на підприємствах НЕК "Укренерго".
4. ДК за тематикою роботи релейного захисту ПЛ 220-750 кВ з використанням ДЗ 7SA522 сформовані на базі окремого навчального модулю, який адекватно та всебічно охоплює предметну область релейного захисту ПЛ 220-750 кВ з використанням ДЗ 7SA522. Модуль складається з 2-х ДК на базі тринадцяти базових тем, що містять інформацію про окремі незалежні питання з цієї тематики. Теми ДК складається з теоретичних питань, семінарів, практичних завдань та тестової системи контролю та оцінки знань.

Випробування ДК РЗ ПЛ 220-750 кВ з використанням ДЗ 7SA522, яке було проведено представниками Замовника та Виконавця, підтвердило їх якість і повну відповідність Завданню та Технічним вимогам Замовника.

Разом із цим Актом Виконавець передає, а Замовник приймає дистрибутиви ДК РЗ ПЛ 220-750 кВ з використанням ДЗ 7SA522 у комплекті з експлуатаційною документацією до них в електронному вигляді на оптичному носії у 02 (двох) примірниках.

Загальна вартість робіт згідно п.2.1. Договору складає **690720,00 грн. (Шістсот дев'яносто тисяч сімсот двадцять гривень 00 копійок)**, у тому числі ПДВ (20%) у розмірі **115120,00 грн. (Сто п'ятнадцять тисяч сто двадцять гривень 00 копійок)**.

Сума раніше перерахованого авансу становить **207216,00 грн. (Двісті сім тисяч двісті шістнадцять гривень 00 коп.)**, у тому числі ПДВ у розмірі **34536,00 грн. (Тридцять чотири тисячі п'ятсот тридцять шість гривень 00 коп.).**

З врахуванням авансу належить до перерахування **483504,00 грн. (Чотириста вісімдесят три тисячі п'ятсот чотири гривні 00 копійок)**, у тому числі ПДВ (20%) у розмірі **80584,00 грн. (Вісімдесят тисяч п'ятсот вісімдесят чотири гривні 00 копійок)**.

Сторони одна до одної претензій не мають.

Цей акт є підставою для проведення остаточних взаємних розрахунків і платежів між Виконавцем і Замовником.

Виконавець
НВ ТОВ "Інфотех"

Генеральний директор

_____ **В.О. Гурєєв**

Замовник
ДП "НЕК "Укренерго"

Директор

_____ **К.В. Ущаповський**

Найменування ВИКОНАВЦЯ:

НВ ТОВ "Інфотех", ЄДРПОУ 03001744;
Адреса: 04080, м. Київ, вул. Фрунзе, 85;
п/р №26008000020573 у ПАТ "Укрсоцбанк" у м. Києві, МФО 300023;
ІПН 030017426567; Свідоцтво про реєстрацію платника ПДВ № 200147954

Найменування ЗАМОВНИКА:

ДП "НЕК "Укренерго", ЄДРПОУ 00100227;
Адреса: 01032, м. Київ, вул. С. Петлюри, 25;
п/р 26008010066033 в АТ "Укрексімбанк", МФО 322313;
ІПН 001002226654, Свідоцтво про реєстрацію платника ПДВ № 200037859

А К Т №02-06/11/2013/01-6/5067-13
прийому-передачі технічного та базового загального та прикладного програмного забезпечення СДНТП
за договором №06/11/2013/01-6/5067-13 від 20 листопада 2013 р.

Послуги щодо проектування та розробляння у сфері інформаційних технологій (Розробка, поставка та впровадження системи дистанційного навчання та тренажу персоналу (СДНТП) ДП "НЕК "Укренерго" з використанням ПТК ОП++)

Етап №2. Поставка технічного та базового загального та прикладного програмного забезпечення СДНТП.

(найменування робіт/послуг/товарів)

м. Київ " 12 " березня 2014 р.

Ми, що підписалися нижче, представник Виконавця **генеральний директор НВ ТОВ "Інфотех" Гурєєв В.О.**, з однієї сторони, та представник Замовника **в.о. директораДП "НЕК "Укренерго" Ущаповський К.В.**, з іншої сторони, склали цей акт про те, що відповідно до договору №06/11/2013/01-6/5067-13 від 20.11.2013 р. (надалі – Договір) Виконавець передав, а Замовник прийняв технічне та базове загальне та прикладне програмне забезпечення (ПЗ) СДНТП у наведеному нижче складі, а саме:

№ з/п	Найменування та тип	Кіль-ть	Ціна без ПДВ, грн.	Сума без ПДВ, грн.
1.	Сервер HP DL160 Gen8/4LFF Rck, у т.ч.: процесор Intel® Xeon QC E5-2603 (4*1.8GHz); 16Gb DDR3-1333 (2* 8GB PC3-10600 (DDR3-1333); 2xGigLAN; 2xHDD 2Tb (Hot Plug); 1xDVD ROM; 1x PS 460W	2	24375,00	48750,00
2.	ДБЖ Eaton 9130 - 1000VA Rackmount 19" у комплекті з мережевим адаптером Connect UPS-BDWeb/SNMP	1	9150,00	9150,00
3.	VPN Router Cisco SB 10/100 4-Port (RV042-EU)	1	1425,00	1425,00
4.	KVM Console ATEN CL-1000M LCD 19" 1U rackmountable (17" LCD display, keyboard, touchpad) з: KVM Switch 2-Port ATEN CS-22U USB Cable.	1	6425,00	6425,00
5.	Шафа підлогова 19", 22U, (1140x600x 1000) у комплекті з: блоком з 4 вентиляторів; полицею; силовим блоком з 8 розеток; кабелем живлення для ДБЖ	1	6275,00	6275,00

№ з/п	Найменування та тип	Кіль-ть	Ціна без ПДВ, грн.	Сума без ПДВ, грн.
6.	Невиключна ліцензія на використання ПТК ОП++ у НЕК "Укренерго" на необмеженій кількості робочих місць	1	75000,00	75000,00
7.	Загальне та прикладне ПЗ СДНТП, включаючи:	к-т		
7.1	Операційна система SuSe Linux Enterprise Server Novell 11 з SP останньої версії, що існує на момент поставки	2		
7.2	Препроцесор гіпертексту PHP	2		
7.3	СУБД MySQL	2		
7.4	Інструментальний пакет Moodle	2		
7.5	Офісний пакет для Linux LibreOffice	2		
8.	Однорічна підтримка SUSE Linux Enterprise Server for X86, AMD64 & Intel64 (1-2 CPU Sockets, Basic Maintenance, 1 Physical, 1 Year), 874-006254	2	3740,00	7480,00
			Разом без ПДВ:	**154505,00**
			ПДВ (20%):	**30901,00**
			Разом з ПДВ:	**185406,00**

Разом із цим Актом Виконавець передає, а Замовник приймає дистрибутиви ПТК ОП++ і базового загального та прикладного ПЗ у комплекті із експлуатаційною документацією до них в електронному вигляді на оптичному носії в 01 (одному) примірнику на та флеш-носіях у 02 (двох) примірниках, відповідно.

Сторони підтверджують, що технічне та базове загальне та прикладне програмне забезпечення, які передаються Виконавцем і приймаються Замовником, повністю відповідають умовам Договору (Додатку №2 до Договору) за кількістю та якістю, включаючи експлуатаційну документацію.

Загальна вартість технічного та базового загального та прикладного програмного забезпечення СДНТП згідно додатків №3, 5 до Договору складає **185406,00 грн. (Сто вісімдесят п'ять тисяч чотириста шість гривень 00 копійок)**, у тому числі ПДВ (20%) у розмірі **30901,00 грн. (Тридцять тисяч дев'ятсот одна гривня 00 копійок)**.

Підлягає перерахуванню **185406,00 грн. (Сто вісімдесят п'ять тисяч чотириста шість гривень 00 копійок)**, у тому числі ПДВ (20%) у розмірі **30901,00 грн. (Тридцять тисяч дев'ятсот одна гривня 00 копійок)**.

Сторони одна до одної претензій не мають.

Виконавець
НВ ТОВ "Інфотех"

Генеральний директор

В.О. Гурєєв

Замовник
ДП "НЕК "Укренерго"

В.о. директора

К.В. Ущаповський

Найменування ВИКОНАВЦЯ:	Найменування ЗАМОВНИКА:
НВ ТОВ "Інфотех", ЄДРПОУ 03001744; Адреса: 04080, м. Київ, вул. Фрунзе, 85; п/р №26008000020573 у ПАТ "Укрсоцбанк" у м. Києві, МФО 300023; ІПН 030017426567, НПС 200147954	ДП "НЕК "Укренерго", ЄДРПОУ 00100227; Адреса: 01032, м. Київ, вул. С. Петлюри, 25; п/р 26008010066033 в АТ "Укрексімбанк", МФО 322313; ІПН 001002226654, НПС 200037859

А К Т №01-06/11/2013/01-6/5067-13
прийому-передачі виконаних робіт
за договором №06/11/2013/01-6/5067-13 від 20 листопада 2013 р.

Послуги щодо проектування та розробляння у сфері інформаційних технологій (Розробка, поставка та впровадження системи дистанційного навчання та тренажу персоналу (СДНТП) ДП "НЕК "Укренерго" з використанням ПТК ОП++)

Етап №1. Розробка, поставка та об'єктова адаптація інструментальних програмних засобів для розробки та експлуатації дистанційних курсів (ДК) СДНТП; первинного фонду із п'яти ДК з технології оперативних перемикань на базі ПТК ОП++.

(найменування робіт)

м. Київ "11" грудня 2013 р.

Ми, що підписалися нижче, представник Виконавця **генеральний директор НВ ТОВ "Інфотех" Гурєєв В.О.**, з однієї сторони, та представник Замовника **заступник директора – головний диспетчер ДП "НЕК "Укренерго" Ущаповський К.В.**, з іншої сторони, склали цей акт про те, що результати виконаних робіт, які здаються Виконавцем і приймаються Замовником, задовольняють умовам договору №06/11/2013/01-6/5067-13 від 20.11.2013 р. (надалі – Договір), належним чином виконані та оформлені.

Стислий опис виконаних робіт, які здаються (приймаються):

Відповідно до Завдання Замовника Виконавцем виконані:

- вивчення та аналіз умов впровадження СДНТП;
- розробка, поставка та об'єктова адаптація інструментальних програмних засобів (ПЗ) для розробки та експлуатації ДК СДНТП;
- розробка, поставка й впровадження первинного фонду із 05 (п'яти) ДК з технології оперативних перемикань в електричних мережах ДП "НЕК "Укренерго" у складі: ДК "Інструментальні засоби та можливості ПТК ОП++", ДК "Створення протиаварійних тренувань (ПТ) з використанням ПТК ОП++", ДК "Проведення ПТ з використанням ПТК ОП++", ДК "Дистанційний захист 7SA-522", ДК "Охорона праці. Контроль знань";
- первинне навчання персоналу Замовника, що відповідатиме за використання СДНТП, правилам її установки та подальшої експлуатації.

Випробування інструментальних ПЗ для розробки та експлуатації ДК СДНТП і 05 (п'яти) ДК з технології оперативних перемикань, яке було проведено представниками Замовника та Виконавця, підтвердило їх якість і повну відповідність Завданню Замовника.

Разом із цим Актом Виконавець передає, а Замовник приймає дистрибутиви інструментальних ПЗ для розробки та експлуатації ДК СДНТП і 05 (п'ять) ДК з технології оперативних

перемикань у комплекті із експлуатаційною документацією до них в електронному вигляді на флеш-носії в 01 (одному) примірнику.

Загальна вартість 1-го етапу робіт згідно додатку №5 до Договору складає **831294,00 грн. (Вісімсот тридцять одну тисячу двісті дев'яносто чотири гривні 00 копійок)**, у тому числі ПДВ (20%) у розмірі **138549,00 грн. (Сто тридцять вісім тисяч п'ятсот сорок дев'ять гривень 00 копійок)**.

Підлягає перерахуванню **831294,00 грн. (Вісімсот тридцять одна тисяча двісті дев'яносто чотири гривні 00 копійок)**, у тому числі ПДВ (20%) у розмірі **138549,00 грн. (Сто тридцять вісім тисяч п'ятсот сорок дев'ять гривень 00 копійок)**.

Сторони одна до одної претензій не мають.

Цей акт є підставою для проведення взаємних розрахунків і платежів між Виконавцем і Замовником.

Виконавець
НВ ТОВ "Інфотех"

Генеральний директор

_____ **В.О. Гурєєв**

Замовник
ДП "НЕК "Укренерго"

Заступник директора –
головний диспетчер

_____ **К.В. Ущаповський**

Найменування ВИКОНАВЦЯ:	Найменування ЗАМОВНИКА:
НВ ТОВ "Інфотех", ЄДРПОУ 03001744; Адреса: 04080, м. Київ, вул. Фрунзе, 85; п/р №26008000020573 у ПАТ "Укрсоцбанк" у м. Києві, МФО 300023; ІПН 030017426567, НПС 200147954	ДП "НЕК "Укренерго", ЄДРПОУ 00100227; Адреса: 01032, м. Київ, вул. С. Петлюри, 25; п/р 26008010066033 в АТ "Укрексімбанк", МФО 322313; ІПН 001002226654, НПС 200037859

А К Т №01-05/11/2013/01-6/5068-13
прийому-передачі виконаних робіт
за договором №05/11/2013/01-6/5068-13 від 20 листопада 2013 р.

Послуги щодо проектування та розробляння у сфері інформаційних технологій (Розробка, поставка та включення до складу бази даних системи дистанційного навчання та тренажу персоналу (СДНТП) ДП "НЕК "Укренерго" електронних навчальних (дистанційних) курсів за тематикою автоматизованої підготовки бланків перемикань у всіх ЕС)

(найменування робіт)

м. Київ "11" грудня 2013 р.

Ми, що підписалися нижче, представник Виконавця **генеральний директор НВ ТОВ "Інфотех" Гурєєв В.О.**, з однієї сторони, та представник Замовника **заступник директора – головний диспетчер ДП "НЕК "Укренерго" Ущаповський К.В.**, з іншої сторони, склали цей акт про те, що результати виконаних робіт, які здаються Виконавцем і приймаються Замовником, задовольняють умовам договору №05/11/2013/01-6/5068-13 від 20.11.2013 р. (надалі – Договір), належним чином виконані та оформлені.

Стислий опис виконаних робіт, які здаються (приймаються):

1. Відповідно до Завдання та Технічних вимог Замовника Виконавцем виконані:
   - розробка, поставка, налаштування та включення до бази даних СДНТП ДП "НЕК "Укренерго" (за адресою: 01032, м. Київ, вул. Симона Петлюри, 25) електронної бібліотеки з дистанційних курсів за тематикою автоматизованої підготовки бланків перемикань (БП) за допомогою ПК БП+ (далі - ДК БП) на підстанціях ДП "НЕК "Укренерго";
   - розробка посібника адміністратора та користувача з проведення дистанційного навчання та тренажу персоналу ДП "НЕК "Укренерго";
   - первинне навчання персоналу Замовника, що відповідатиме за експлуатацію ДК БП, правилам використання електронної бібліотеки з ДК БП.
2. Стосовно електронної бібліотеки з ДК БП забезпечені:
   - можливість її експлуатації у СДНТП ДП "НЕК "Укренерго" (за адресою: 01032, м. Київ, вул. Симона Петлюри, 25) на необмеженій кількості робочих станцій;
   - доступ до неї через Інтернет з робочих станцій всіх енергосистем ДП "НЕК "Укренерго", штатним чином зареєстрованих у СДНТП.
3. ДК БП сформовані на базі окремого навчального модулю, який адекватно та всебічно охоплює предметну область автоматизованої підготовки БП на підстанціях ДП "НЕК "Укренерго". Модуль складається з 2-х ДК на базі десяти базових тем, що містять інформацію про окремі незалежні питання з цієї тематики. Кожна тема складається з

двох пов'язаних між собою частин: теоретичних питань з тематики автоматизованої підготовки БП на підстанціях ДП "НЕК "Укренерго" та тестової системи контролю та оцінки знать.

Випробування ДК БП, яке було проведено представниками Замовника та Виконавця, підтвердило їх якість і повну відповідність Завданню та Технічним вимогам Замовника.

Разом із цим Актом Виконавець передає, а Замовник приймає дистрибутиви ДК БП у комплекті з експлуатаційною документацією до них в електронному вигляді на оптичному носії у 02 (двох) примірниках.

Загальна вартість робіт згідно п.2.1. Договору складає **690720,00 грн. (Шістсот дев'яносто тисяч сімсот двадцять гривень 00 копійок)**, у тому числі ПДВ (20%) у розмірі **115120,00 грн. (Сто п'ятнадцять тисяч сто двадцять гривень 00 копійок)**.

Підлягає перерахуванню **690720,00 грн. (Шістсот дев'яносто тисяч сімсот двадцять гривень 00 копійок)**, у тому числі ПДВ (20%) у розмірі **115120,00 грн. (Сто п'ятнадцять тисяч сто двадцять гривень 00 копійок)**.

Сторони одна до одної претензій не мають.

Цей акт є підставою для проведення взаємних розрахунків і платежів між Виконавцем і Замовником.

Виконавець
НВ ТОВ "Інфотех"

Генеральний директор

_____ **В.О. Гурєєв**

Замовник
ДП "НЕК "Укренерго"

Заступник директора - головний диспетчер

_____ **К.В. Ущаповський**

Найменування ВИКОНАВЦЯ:	Найменування ЗАМОВНИКА:
НВ ТОВ "Інфотех", ЄДРПОУ 03001744; Адреса: 04080, м. Київ, вул. Фрунзе, 85; п/р №26008000020573 у ПАТ "Укрсоцбанк" у м. Києві, МФО 300023; ІПН 030017426117, НПС 38227046	НЕК "Укренерго", ЄДРПОУ 00100227; Адреса: 01032, м. Київ, вул. Симона Петлюри, 25; п/р 26008301241445 у філії "Київське міське відділення ПАТ "Промінвестбанк", МФО 322250; ІПН 001002226654, НПС 35481107

А К Т №01-05/03/2012/96/06-12
здачі-приймання виконаних робіт
за договором №05/03/2012/96/06-12 від 21 березня 2012 р.

Послуги з розроблення пакетних програмних засобів (Виконання робіт з модифікації та коригування програмного забезпечення впровадження у всіх МЕМ програмних комплексів "Бланки перемикань")
(найменування робіт)

м. Київ "18" червня 2012 р.

Ми, що підписалися нижче, представник Виконавця **генеральний директор НВ ТОВ "Інфотех" Гурєєв В.О.**, з однієї сторони, і представник Замовника **директор НЕК "Укренерго" Ходаківський А.М.**, з іншої сторони, склали цей акт про те, що результати виконаних робіт, які здаються Виконавцем і приймаються Замовником, задовольняють умовам договору №05/03/2012/96/06-12 від 21 березня 2012 р. (надалі – Договір), належним чином виконані та оформлені.

Стислий опис виконаних робіт, які здаються (приймаються):

Відповідно до завдання і технічних вимог Замовника Виконавцем виконані:

1. Модифікація та коригування програмного забезпечення (ПЗ) ПК БП до версії ПК БП+, що полягають у покращенні та розширенні функціональних можливостей комплексів, які використовуються на всіх підстанціях (ПС) і диспетчерських пунктах (ДП) МЕМ НЕК "Укренерго", а саме:

– розробка та включення до складу ПК БП автономного тренувального модуля (АТМ БП) для навчання, перевірки знань і проведення тренувань оперативного персоналу ПС за тематикою складання БП. Модуль автоматично аналізує відмінності складеного БП від еталонного; проводить згідно із заданим алгоритмом оцінку дій тих, хто навчається (тренується); формує докладний звіт;

– реалізація в АТМ БП можливості зміни послідовності пунктів БП для ускладнення завдань при контролі знань і проведенні тренувань;

– модифікація та включення до складу ПК БП модуля міжоб'єктового інформаційного обміну, який забезпечує відправку з ПС до ДП засобами Інтернет (електронною поштою) підготовлених БП (у зашифрованому вигляді) для їх перевірки черговим диспетчером, а також передачу у відповідь підтверджень про отримання БП та висновків про результати їх перевірки;

– модифікація інтерфейсу користувача ПК БП, за результатами якої реалізована можливість взаємодії з комплексом українською або російською мовою та швидкого переходу з однієї мови на іншу в процесі роботи;

– модифікація інсталяційного модуля ПК БП, за результатами якої реалізована можливість при установці комплексу на комп'ютер вибирати довільний склад його функціональних модулів (базовий ПК БП, АТМ БП) у будь-якому їх сполученні.

2. Навчання представників Замовника правилам установки та подальшої експлуатації ПК БП+ (копія розкладу проведених занять додається).

Випробування (тестування) ПЗ ПК БП+, проведені представниками Замовника та Виконавця після завершення перелічених вище робіт, підтвердили їх якість і повну відповідність завданню та технічним вимогам Замовника (примірник звіту (протоколу) про результати випробувань (тестування) додається).

Цим Актом Виконавець передав, а Замовник прийняв дистрибутиви ПК БП+ V2.00 у комплекті з технічною, експлуатаційною та програмною документацією в електронному вигляді на оптичних носіях типу CD у 16 (шістнадцяти) примірниках (по два примірника для кожної із восьми ЕС).

Загальна вартість виконаних робіт згідно п.3.1. Договору складає **425480,40 грн. (Чотириста двадцять п'ять тисяч чотириста вісімдесят гривень 40 копійок)**, у тому числі ПДВ (20%) у розмірі **70913,40 грн. (Сімдесят тисяч дев'ятсот тринадцять гривень 40 копійок)**.

Підлягає перерахуванню **425480,40 грн. (Чотириста двадцять п'ять тисяч чотириста вісімдесят гривень 40 копійок)**, у тому числі ПДВ (20%) у розмірі **70913,40 грн. (Сімдесят тисяч дев'ятсот тринадцять гривень 40 копійок)**.

Сторони одна до одної претензій не мають.

Цей акт є підставою для проведення взаємних розрахунків і платежів між Виконавцем і Замовником.

Виконавець
НВ ТОВ "Інфотех"

Генеральний директор

_____ **В.О. Гурєєв**

Замовник
НЕК "Укренерго"

Директор

_____ **А.М. Ходаківський**

Найменування ВИКОНАВЦЯ:	Найменування ЗАМОВНИКА:
НВ ТОВ "Інфотех", ЄДРПОУ 03001744; Адреса: 04080, м. Київ, вул. Фрунзе, 85; п/р №26008000020573 у ПАТ "Укрсоцбанк" у м. Києві, МФО 300023; ІПН 030017426117, НПС 38227046	НЕК "Укренерго", ЄДРПОУ 00100227; Адреса: 01032, м. Київ, вул. Комінтерну, 25; п/р 26008301241445 у філії "Київське міське відділення ПАТ "Промінвестбанк", МФО 322250; ІПН 001002226654, НПС 35481107

А К Т №01-24/06/2011/178/01-11
здачі-приймання виконаних робіт
за договором №24/06/2011/178/01-11 від 21 липня 2011 р.

Послуги з розроблення пакетних програмних засобів щодо виконання робіт з установки, налагодження та об'єктовій адаптації на базі ПТК ОП+ системи дистанційного навчання та тренажу оперативного та оперативно-виробничого персоналу для НТЦ Кримської ЕС (далі - СДНТП)

(найменування робіт)

м. Київ "29" вересня 2011 р.

Ми, що підписалися нижче, представник Виконавця **генеральний директор НВ ТОВ "Інфотех" Гурєєв В.О.**, з однієї сторони, і представник Замовника **директор НЕК "Укренерго" Ходаківський А.М.**, з іншої сторони, склали цей акт про те, що результати виконаних робіт, які здаються Виконавцем і приймаються Замовником, задовольняють умовам договору №24/06/2011/178/01-11 від 21 липня 2011 р. (надалі – Договір), належним чином виконані та оформлені.

Стислий опис виконаних робіт, які здаються (приймаються):

Відповідно до завдання і технічних вимог Замовника Виконавцем у НТЦ Кримської ЕС виконані:

а) поставка, установка, наладка та об'єктна адаптація реалізованої на базі ПТК ОП+ СДНТП для НТЦ Кримською ЕС, включаючи:
- проведення моніторингу з вивчення умов впровадження СДНТП;
- поставку, установку і наладку базового загального і прикладного програмного забезпечення у складі: операційна система SuSe Linux Enterprise Server Novell 11 SP1, віртуальна машина ORACLE VM VirtualBox v.4.1.0, препроцесор гіпертексту PHP 5.3.2, СУБД MySQL 5.0.25, інструментальний пакет Moodle 2.1, офісний пакет для Linux OpenOffice.org 3.3, офісний пакет MS Office 2010 Pro UA, програмний тренажерний комплекс ПТК ОП+;
- установку, наладку та об'єктну адаптацію інструментальних засобів для розробки дистанційних курсів (ДК) СДНТП;
- створення первинного фонду ДК з технології оперативних перемикань в електричних мережах НЕК "Укренерго", до складу якого включені ДК: "Інструментальні засоби та можливості ПТК ОП+", "Створення протиаварійних тренувань (ПТ) з використанням ПТК ОП+", "Проведення ПТ з використанням ПТК ОП+", "Перевірка знань оперативно-диспетчерського персоналу НЕК "Укренерго" і "Бібліотека учбових матеріалів";
- реалізацію пілотного проекту СДНТП для НТЦ Кримської ЕС на основі вище переліченого інформаційного і програмного забезпечення;

б) установка компонентів СДНТП на сервері SRV-02-UTC і робочих станціях НТЦ

Кримської ЕС, пред'явлених Замовником на момент постачання;

в) навчання персоналу НТЦ Кримської ЕС правилам установки і подальшої експлуатації пакету програмних засобів (ППЗ) СДНТП.

Тестування ППЗ СДНТП, яке було проведено фахівцями Замовника та Виконавця після завершення перелічених вище робіт на об'єкті впровадження, підтвердило їх якість і повну відповідність завданню та технічним вимогам Замовника (копії акту виконаних робіт та звіту (протоколу) про результати тестування додаються).

Разом із цим Актом Виконавець передає, а Замовник приймає:

- дистрибутиви ППЗ СДНТП і комплект технічної, експлуатаційної та програмної документації до нього у друкованому та електронному вигляді на оптичному носії типу DVD у 01 (одному) примірнику;
- дистрибутиви і ліцензії на право використання програмних продуктів інших виробників, які входять до складу СДНТП для НТЦ Кримської ЕС.

Починаючі з дати підписання цього акту Замовником і Виконавцем СДНТП для НТЦ Кримської ЕС вважається введеною в дію.

Загальна вартість виконаних робіт згідно п.3.1. Договору складає **498 910,00 грн. (Чотириста дев'яносто вісім тисяч дев'ятсот десять гривень 00 копійок) без податку на додану вартість (ПДВ)**.

На момент підписання цього акту сума виплаченого авансу склала **149 673,00 грн. (Сто сорок дев'ять тисяч шістсот сімдесят три гривні 00 копійок)** без ПДВ.

За вирахуванням виплаченого авансу підлягає перерахуванню **349 237,00 грн. (Триста сорок дев'ять тисяч двісті тридцять сім гривень 00 копійок)** без ПДВ.

Сторони одна до одної претензій не мають.

Цей акт є підставою для проведення взаємних розрахунків і платежів між Виконавцем і Замовником.

Виконавець
НВ ТОВ "Інфотех"

Генеральний директор

В.О. Гуреєв

Замовник
НЕК "Укренерго"

Директор

А.М. Ходаківський

Найменування ВИКОНАВЦЯ:	Найменування ЗАМОВНИКА:
НВ ТОВ "Інфотех", ЄДРПОУ 03001744; Адреса: 04080, м. Київ, вул. Фрунзе, 85; п/р №26008000020573 у ПАТ "Укрсоцбанк" у м. Києві, МФО 300023; ІПН 030017426117, НПС 38227046	НЕК "Укренерго", ЄДРПОУ 00100227; Адреса: 01032, м. Київ, вул. Комінтерну, 25; п/р 26008301241445 у філії "Київське міське відділення ПАТ "Промінвестбанк", МФО 322250; ІПН 001002226654, НПС 35481107

А К Т №01-15/08/2011/246/01-11
здачі-приймання виконаних робіт
за договором №15/08/2011/246/01-11 від 16 вересня 2011 р.

Послуги з розроблення прикладного програмного забезпечення (Виконання робіт з модифікації та коригування програмного забезпечення (ПЗ) впроваджених у всіх МЕМ програмно-тренажерних комплексів оперативних перемикань (ПТК ОП) та включення цих комплексів до розподіленої автоматизованої системи з формування й адміністрування бази даних протиаварійних тренувань НЕК "Укренерго" для 7 ЕС)
(найменування робіт)

м. Київ "16" грудня 2011 р.

Ми, що підписалися нижче, представник Виконавця **генеральний директор НВ ТОВ "Інфотех" Гурєєв В.О.**, з однієї сторони, і представник Замовника **директор НЕК "Укренерго" Ходаківський А.М.**, з іншої сторони, склали цей акт про те, що результати виконаних робіт, які здаються Виконавцем і приймаються Замовником, задовольняють умовам договору №15/08/2011/246/01-11 від 16 вересня 2011 р. (надалі – Договір), належним чином виконані та оформлені.

Стислий опис виконаних робіт, які здаються (приймаються):

Відповідно до завдання і технічних вимог Замовника Виконавцем виконані:

1. Роботи з модифікації та корегування ПЗ впроваджених в усіх МЕМ семи ЕС НЕК "Укренерго" ПТК ОП+ до версії ПТК ОП++, а саме:

– модифікація та включення до складу ПТК ОП+ модуля психофізіологічної діагностики персоналу з метою виключення залежностей від регіональних настроювань операційних систем користувачів і відкритого доступу до системних дисків комп'ютерів;

– модифікація та включення до складу ПТК ОП+ модуля самонавчання роботі з ПТК ОП++, що має чітку і зрозумілу користувачеві деревовидну структуру з назвами розділів, підрозділів та тем навчання;

– розробка та включення до складу ПТК ОП+ модуля міжоб'єктового інформаційного обміну з використанням електронних засобів зв'язку для автоматизації процесу наповнення й синхронізації баз даних протиаварійних тренувань (ПТ) і результатів психофізіологічної діагностики між НТЦ, МЕМ та НЕК "Укренерго". Робота модуля забезпечується з використанням існуючої телекомунікаційної мережі НЕК "Укренерго" без виходу до глобальної мережі Internet;

– модифікація інсталяційного модуля ПТК ОП+, за результатами якої користувачеві забезпечується можливість при установці комплексу на комп'ютер обирати довільний склад його основних функціональних компонентів (базовий тренажер оперативних перемикань, база даних апробованих ПТ, модуль психофізіологічної діагностики персоналу, модуль самонавчання роботі з ПТК ОП++) у будь-якому сполученні.

2. Навчання представників Замовника (по одному від кожної із семи ЕС, визначених Дого-

Кримської ЕС, пред'явлених Замовником на момент постачання;

в) навчання персоналу НТЦ Кримської ЕС правилам установки і подальшої експлуатації пакету програмних засобів (ППЗ) СДНТП.

Тестування ППЗ СДНТП, яке було проведено фахівцями Замовника та Виконавця після завершення перелічених вище робіт на об'єкті впровадження, підтвердило їх якість і повну відповідність завданню та технічним вимогам Замовника (копії акту виконаних робіт та звіту (протоколу) про результати тестування додаються).

Разом із цим Актом Виконавець передає, а Замовник приймає:

- дистрибутиви ППЗ СДНТП і комплект технічної, експлуатаційної та програмної документації до нього у друкованому та електронному вигляді на оптичному носії типу DVD у 01 (одному) примірнику;
- дистрибутиви і ліцензії на право використання програмних продуктів інших виробників, які входять до складу СДНТП для НТЦ Кримської ЕС.

Починаючі з дати підписання цього акту Замовником і Виконавцем СДНТП для НТЦ Кримської ЕС вважається введеною в дію.

Загальна вартість виконаних робіт згідно п.3.1. Договору складає **498 910,00 грн. (Чотириста дев'яносто вісім тисяч дев'ятсот десять гривень 00 копійок) без податку на додану вартість (ПДВ)**.

На момент підписання цього акту сума виплаченого авансу склала **149 673,00 грн. (Сто сорок дев'ять тисяч шістсот сімдесят три гривні 00 копійок)** без ПДВ.

За вирахуванням виплаченого авансу підлягає перерахуванню **349 237,00 грн. (Триста сорок дев'ять тисяч двісті тридцять сім гривень 00 копійок)** без ПДВ.

Сторони одна до одної претензій не мають.

Цей акт є підставою для проведення взаємних розрахунків і платежів між Виконавцем і Замовником.

Виконавець
НВ ТОВ "Інфотех"

Генеральний директор

В.О. Єуреєв

Замовник
НЕК "Укренерго"

Директор

А.М. Ходаківський

Найменування ВИКОНАВЦЯ:	Найменування ЗАМОВНИКА:
НВ ТОВ "Інфотех", ЄДРПОУ 03001744, Адреса: 04080, м. Київ, вул. Фрунзе, 85; п/р №26005021903831 у Залізничному відділенні КМФ ПАТ "Укрсоцбанк" у м. Києві, МФО 322012; ІПН 030017426117, НПС 38227046	НЕК "Укренерго" Дніпровська ЕС, ЄДРПОУ 20517231, Адреса: 69096, м. Запоріжжя, вул. Гребельна, 2; п/р 2600601753633 у філії АТ "Укрексімбанк" м. Запоріжжя, МФО 313979; ІПН 001002226654/ДН, НПС 35481107

А К Т №01-28/374-10 /613
здачі-приймання наданих послуг
за договором №28/374-10 від 09 грудня 2010 р.

Послуги консультативні з програмного забезпечення й послуги з розроблення програмного забезпечення інші (встановлення, налагодження та об'єктова адаптація бази даних учбово-діагностичного комплексу моделювання аварійних режимів енергосистем для контролю знань, тренажу і навчання оперативно-диспетчерського персоналу)
(найменування послуг)

м. Запоріжжя "____" _____ 2010 р.

Ми, що підписалися нижче, представник Виконавця **генеральний директор НВ ТОВ "Інфотех" Гурєєв В.О.**, з однієї сторони, і представник Замовника **директор Дніпровської ЕС НЕК "Укренерго" Трифонов Ю.П.**, з іншої сторони, склали цей акт про те, що результати наданих послуг, що здаються Виконавцем і приймаються Замовником, задовольняють умовам договору №28/374-10 від 09 грудня 2010 р. (надалі – Договір), належним чином виконані та оформлені.

Стислий опис наданих послуг, що здаються (приймаються):

1. Виконані встановлення, налагодження та об'єктова адаптація бази даних учбово-діагностичного комплексу (БД УДК) моделювання аварійних режимів енергосистем для контролю знань, тренажу і навчання оперативно-диспетчерського персоналу в НТЦ Дніпровській ЕС, яка складається з:

1.1. Адаптованої до реальних умов функціонування всіх ЕС ОЕС України концептуальної схеми БД, яка визначає представлення БД, що є єдиними для всіх її прикладних програм і не залежить від використовуваного в СУБД представлення даних у середовищі зберігання й шляхів доступу до них.

1.2. Адаптованої до реальних умов функціонування конкретних ЕС зовнішньої схеми БД, яка є описом БД, що підтримується СУБД для прикладних програм.

1.3. Адаптованої до реальних умов функціонування конкретних ЕС внутрішньої схеми БД, яка визначає представлення даних у середовищі зберігання й шляхи доступу до них.

2. Встановлення, налагодження та об'єктна адаптація БД УДК здійснені Виконавцем на всіх технічних засобах, які були надані Замовником на момент здачі-приймання наданих послуг.

3. Виконавцем проведене навчання Замовника правилам встановлення БД УДК для її подальшої експлуатації.

Разом із цим Актом Виконавець передав, а Замовник прийняв дистрибутиви (концептуальну, зовнішню та внутрішню схеми) БД УДК із вбудованими інструкціями для адміністратора БД

УДК російською мовою в електронному вигляді на оптичному носії типу DVD у 02 (двох) примірниках.

Тестування БД УДК, яке було проведено Замовником за участю Виконавця, підтвердило потрібну якість наданих послуг та їх повну відповідність умовам технічного завдання (Додаток №1 до Договору).

Загальна вартість послуг згідно п.3.1. Договору складає **96000,00 грн. (дев'яносто шість тисяч гривень 00 коп.), у т.ч. ПДВ (20%) – 16000,00 грн. (шістнадцять тисяч гривень 00 коп.)**.

Підлягає перерахуванню **96000,00 грн. (дев'яносто шість тисяч гривень 00 коп.), у т.ч. ПДВ (20%) – 16000,00 грн. (шістнадцять тисяч гривень 00 коп.)**.

Сторони одна до одної претензій не мають.

Дійсний акт є підставою для проведення взаємних розрахунків і платежів між Виконавцем і Замовником.

Від Виконавця:

_____ В.О. Гурєєв,
Генеральний директор
НВ ТОВ "Інфотех"

М.П.

Від Замовника:

_____ Ю.П. Трифонов,
Директор Дніпровської ЕС
НЕК "Укренерго"

М.П.

Зі экз.

Найменування ПІДРЯДНИКА:

НВ ТОВ "Інфотех", ЄДРПОУ 03001744,
Адреса: 04080, м. Київ, вул. Фрунзе, 85;
п/р №26005021903831 у Залізничному відділенні КМФ АКБ "Укрсоцбанк" у м. Києві, МФО 322012;
ІПН 030017426117, НПС 38227046

Найменування ЗАМОВНИКА:

НЕК "Укренерго" Дніпровська ЕС, ЄДРПОУ 20517231,
Адреса: 69096, м. Запоріжжя, вул. Гребельна, 2;
п/р 2600601753633 у філії АТ "Укрексімбанк" м. Запоріжжя, МФО 313979;
ІПН 001002226654/ДН, НПС 35481107

А К Т № 01-17/06/2009/274
приймання-передачі виконаних робіт
за договором №17/06/2009/274 від 16 жовтня 2009 р.

Модифікація раніше впровадженого в Дніпровській ЕС програмного тренажерного комплексу оперативних перемикань (ПТК ОП) у програмний тренажерний комплекс оперативних перемикань плюс плюс (ПТК ОП++) та включення цього комплексу до складу розподіленої автоматизованої системи з формування й адміністрування бази даних протиаварійних тренувань НЕК "Укренерго"

(найменування робіт)

м. Запоріжжя "03" грудень 2009 р.

Ми, що підписалися нижче, представник Підрядника **генеральний директор НВ ТОВ "Інфотех" Гурєєв В.О.**, з однієї сторони, і представник Замовника **директор Дніпровської ЕС НЕК "Укренерго" Трифонов Ю.П.**, з іншої сторони, склали цей акт про те, що результати виконаних робіт, що здаються Підрядником і приймаються Замовником, задовольняють умовам договору №17/06/2009/274 від 16 жовтня 2009 р. (надалі – Договір), належним чином виконані та оформлені.

Стислий опис виконаних робіт, що здаються (приймаються):

1. Виконана модифікація раніше впровадженого в Дніпровській ЕС ПТК ОП у ПТК ОП++ та включення цього комплексу до складу розподіленої автоматизованої системи з формування й адміністрування бази даних протиаварійних тренувань НЕК "Укренерго", які повністю відповідають вимогам Додатку №1 до Договору.
2. Впровадження ПТК ОП++ здійснене Підрядником на всіх технічних засобах, які були надані Замовником на момент приймання-передачі виконаних робіт згідно п. 3.2. Договору.
3. Відповідно до п. 3.1. Договору Підрядником проведене навчання 5 (п'ятьох) фахівців Замовника правилам встановлення ПТК ОП++ для його подальшої експлуатації.

Разом із цим Актом Підрядник передав, а Замовник прийняв дистрибутиви ПТК ОП++ та інструкції для адміністратора та користувача ПТК ОП++ російською мовою в електронному вигляді на оптичних носіях типу DVD у кількості 21 (двадцяти одного) примірника.

Тестування ПТК ОП++, яке було проведено Замовником за участю Підрядника згідно п. 3.5. Договору, підтвердило потрібну якість виконаних робіт та їх повну відповідність умовам технічного завдання (Додаток №1 до Договору).

Загальна вартість робіт згідно п.4.1. Договору складає **294 000,00 грн. (Двісті дев'яносто чотири тисячі гривень 00 коп.)**, у тому числі ПДВ (20%) у розмірі **49 000,00 грн. (Сорок дев'ять тисяч гривень 00 коп.)**.

Сума попередньої оплати складає **88 200,00 грн. (Вісімдесят вісім тисяч двісті гривень 00 коп.)**, у тому числі ПДВ (20%) у розмірі **14 700,00 грн. (Чотирнадцять тисяч сімсот гривень 00 коп.)**.

З урахуванням суми попередньої оплати підлягає до перерахування **205800,00 грн. (Двісті п'ять тисяч вісімсот гривень 00 коп.)**, у тому числі ПДВ (20%) у розмірі **34300,00 грн. (Тридцять чотири тисячі триста гривень 00 коп.)**.

Сторони одна до одної претензій не мають.

Дійсний акт є підставою для проведення взаємних розрахунків і платежів між Підрядником і Замовником.

Від Підрядника:

_____ **В.О.Турєєв,**
Генеральний директор
НВ ТОВ "Інфотех"
М.П.

Від Замовника:

_____ **Ю.П. Трифонов,**
Директор Дніпровської ЕС
НЕК "Укренерго"
М.П.

Найменування ВИКОНАВЦЯ:	Найменування ЗАМОВНИКА:
НВ ТОВ "Інфотех", ЄДРПОУ 03001744, Адреса: 04080, м. Київ, вул. Фрунзе, 85; п/р №26005021903831 у Залізничному відділенні КМФ АКБ "Укрсоцбанк" у м. Києві, МФО 322012; ІПН 030017426117, НПС 38227046	ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго", ЄДРПОУ 02071375, Адреса: 21029, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 10-й км; п/р №260053024111 у Центральному від. ПІБ м. Вінниці, МФО 302571; ІПН 001002226654, НПС 35481107

А К Т № 01-1409-2009/73
приймання-передачі комплекту дистрибутивів, технічної документації і невиключної ліцензії (невиключного права) на використання ліцензійного програмного забезпечення (ЛПЗ) за Ліцензійним договором №1409-2009/73 від " 08 " жовтня 2009 р.

м. Київ " 02 " листопада 2009 р.

Ми, що підписалися нижче, **представник Виконавця генеральний директор НВ ТОВ "Інфотех" Гурєєв В.О.**, з однієї сторони, і **представник Ліцензіата директор ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго" Кардаш І.І.**, з іншої сторони, склали цей акт про те, що відповідно до Додатку №1 та п.6.1. Ліцензійного договору №1409-2009/73 " 08 " жовтня 2009 р., надалі - Договір, Ліцензіар передав, а Ліцензіат прийняв невиключну ліцензію (невиключне право) на використання ЛПЗ "Розширений програмний тренажерний комплекс оперативних перемикань (ПТК ОП+) для автоматизованої підготовки, проведення і аналізу результатів протиаварійних тренувань (ПТ) з тематики оперативних перемикань і ліквідації аварій в енергосистемах і електричних мережах із вбудовуваною базою даних ПТ, функціями самонавчання та психофізіологічної діагностики персоналу" разом з комплектом дистрибутивів і технічної документації.

Загальна вартість невиключної ліцензії (невиключного права) на використання ЛПЗ згідно п.4.1. Договору складає **36000,00 грн. (Тридцять шість тисяч гривень 00 коп.)**, у тому числі ПДВ (20%) у розмірі **6000,00 грн. (Шість тисяч гривень 00 коп.)**.

Сума авансу складає **10800,00 грн. (Десять тисяч вісімсот гривень 00 коп.)**, у тому числі ПДВ (20%) у розмірі **1800,00 грн. (Одна тисяча вісімсот гривень 00 коп.)**.

З урахуванням суми авансу підлягає до перерахування **25200,00 грн. (Двадцять п'ять тисяч двісті гривень 00 коп.)**, у тому числі ПДВ (20%) у розмірі **4200,00 грн. (Чотири тисячі двісті гривень 00 коп.)**.

Сторони одна до одної претензії не мають.

Дійсний акт є підставою для проведення взаємних розрахунків і платежів між Ліцензіаром і Ліцензіатом.

Від Ліцензіара:	Від Ліцензіата:
В.О. Гурєєв, Генеральний директор НВ ТОВ "Інфотех" М.П.	І.І. Кардаш, Директор ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго" М.П.

Найменування ВИКОНАВЦЯ:	Найменування ЗАМОВНИКА:
НВ ТОВ "Інфотех", ЄДРПОУ 03001744, Адреса: 04080, м. Київ, вул. Фрунзе, 85; п/р №26005021903831 у Залізничному відділенні КМФ АКБ "Укрсоцбанк" у м. Києві, МФО 322012; ІПН 030017426117, НПС 38227046	ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго", ЄДРПОУ 02071375, Адреса: 21029, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 10-й км; п/р №260053024111 у Центральному від. ПІБ м. Вінниці, МФО 302571; ІПН 001002226654, НПС 35481107

А К Т № 01-11/09/2009
здачі-приймання наданих послуг за договором №11/09/2009

від "11" вересня 2009 р.

Модифікація алгоритму роботи програми інсталяції програмного тренажерного комплексу оперативних перемикань (ПТК ОП) для ВСО "Вінницяелектротехнологія"
(найменування наданих послуг)

м. Київ "02" листопада 2009 р.

Ми, що підписалися нижче, **представник Виконавця генеральний директор НВ ТОВ "Інфотех" Гурєєв В.О.**, з однієї сторони, і **представник Замовника директор ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго" Кардаш І.І.**, з іншої сторони, склали цей акт про те, що результати наданих послуг, що здаються Виконавцем і приймаються Замовником, задовольняють умовам договору №11/09/2009 від "11" вересня 2009 р. (надалі – Договір), належним чином виконані та оформлені.

Стислий опис наданих послуг, що здаються (приймаються):

1. Виконана модифікація алгоритму роботи програми інсталяції ПТК ОП для ВСО "Вінницяелектротехнологія".

2. Програму інсталяції ПТК ОП включено до складу програмних тренажерних комплексів оперативних перемикань ВСО "Вінницяелектротехнологія" на всіх технічних засобах, які були надані Замовником на момент здачі-приймання послуг.

Вартість наданих послуг згідно п.2.1. Договору складає **78000,00 грн. (Сімдесят вісім тисяч гривень 00 коп.)**, у тому числі ПДВ (20%) у розмірі **13000,00 грн. (Тринадцять тисяч гривень 00 коп.)**.

Сума авансу складає **23400,00 грн. (Двадцять три тисячі чотириста гривень 00 коп.)**, у тому числі ПДВ (20%) у розмірі **3900,00 грн. (Три тисячі дев'ятсот гривень 00 коп.)**.

З урахуванням суми авансу підлягає до перерахування **54600,00 грн. (П'ятдесят чотири тисячі шістсот гривень 00 коп.)**, у тому числі ПДВ (20%) у розмірі **9100,00 грн. (Дев'ять тисяч сто гривень 00 коп.)**.

Дійсний акт є підставою для проведення взаємних розрахунків і платежів між Виконавцем і Замовником.

Від Виконавця:

В.О.Гурєєв,
Генеральний директор
НВ ТОВ "Інфотех"

М.П.

Від Замовника:

І.І. Кардаш,
Директор ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго"

М.П.

Найменування ВИКОНАВЦЯ:	Найменування ЗАМОВНИКА:
НВ ТОВ "Інфотех", ЄДРПОУ 03001744, Адреса: 04080, м. Київ, вул. Фрунзе, 85; п/р №26005021903831 у Залізничному відділенні КМФ АКБ "Укрсоцбанк" у м. Києві, МФО 322012; ІПН 030017426117, НПС 38227046	ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго", ЄДРПОУ 02071375, Адреса: 21029, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 10-й км; п/р №260053024111 у Центральному від. ПІБ м. Вінниці, МФО 302571; ІПН 001002226654, НПС 35481107

А К Т № 01-10/09/2009
здачі-приймання наданих послуг за договором №10/09/2009

від "10" вересня 2009 р.

Реконструкція алгоритмів тестів і вправ з психофізіологічної діагностики персоналу у складі програмного тренажерного комплексу оперативних перемикань (ПТК ОП) для ВСО "Вінницяелектротехнологія"

(найменування наданих послуг)

м. Київ "02" листопада 2009 р.

Ми, що підписалися нижче, **представник Виконавця генеральний директор НВ ТОВ "Інфотех" Гурєєв В.О.**, з однієї сторони, і **представник Замовника директор ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго" Кардаш І.І.**, з іншої сторони, склали цей акт про те, що результати наданих послуг, що здаються Виконавцем і приймаються Замовником, задовольняють умовам договору №10/09/2009 від "10" вересня 2009 р. (надалі – Договір), належним чином виконані та оформлені.

Стислий опис наданих послуг, що здаються (приймаються):

1. Виконана реконструкція алгоритмів тестів і вправ з психофізіологічної діагностики персоналу у складі ПТК ОП для ВСО "Вінницяелектротехнологія".

2. Реконструйовані тести і вправи з психофізіологічної діагностики персоналу включено до складу програмних тренажерних комплексів оперативних перемикань ВСО "Вінницяелектротехнологія" на всіх технічних засобах, які були надані Замовником на момент здачі-приймання послуг.

Вартість наданих послуг згідно п.2.1. Договору складає **91200,00 грн. (Дев'яносто одна тисяча двісті гривень 00 коп.)**, у тому числі ПДВ (20%) у розмірі **15200,00 грн. (П'ятнадцять тисяч двісті гривень 00 коп.)**.

Сума авансу складає **27360,00 грн. (Двадцять сім тисяч триста шістдесят гривень 00 коп.)**, у тому числі ПДВ (20%) у розмірі **4560,00 грн. (Чотири тисячі п'ятсот шістдесят гривень 00 коп.)**.

З урахуванням суми авансу підлягає до перерахування **63840,00 грн. (Шістдесят три тисячі вісімсот сорок гривень 00 коп.)**, у тому числі ПДВ (20%) у розмірі **10640,00 грн. (Десять тисяч шістсот сорок гривень 00 коп.)**.

Дійсний акт є підставою для проведення взаємних розрахунків і платежів між Виконавцем і Замовником.

Від Виконавця:

Гурєєв В.О.,
Генеральний директор
НВ ТОВ "Інфотех"

М.П.

Від Замовника:

Кардаш І.І.,
Директор ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго"

М.П.

Найменування ВИКОНАВЦЯ:	**Найменування ЗАМОВНИКА:**
НВ ТОВ "Інфотех", ЄДРПОУ 03001744, Адреса: 04080, м. Київ, вул. Фрунзе, 85; п/р №26005021903831 у Залізничному відділенні КМФ АКБ "Укрсоцбанк" у м. Києві, МФО 322012; ІПН 030017426117, НПС 38227046	ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго", ЄДРПОУ 02071375, Адреса: 21029, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 10-й км; п/р №260053024111 у Центральному від. ПІБ м. Вінниці, МФО 302571; ІПН 001002226654, НПС 35481107

А К Т № 01-17/08/2009
здачі-приймання наданих послуг за договором №17/08/2009 /61 від 18.08.09р.
від "_____" _____ 2009 р.

Розробка і включення до складу програмного тренажерного комплексу оперативних перемикань (ПТК ОП) функціонального модулю міжоб'єктного обміну для автоматизації процесів інформаційного наповнення баз даних протиаварійних тренувань (ПТ) з використанням електронних засобів зв'язку на рівні ВСО "Вінницяелектротехнологія"
(найменування наданих послуг)

м. Київ "14" вересня 2009 р.

Ми, що підписалися нижче, **представник Виконавця генеральний директор НВ ТОВ "Інфотех" Гурєєв В.О.**, з однієї сторони, і **представник Замовника головний інженер ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго" Семенюк Ю.М.**, з іншої сторони, склали цей акт про те, що результати наданих послуг, що здаються Виконавцем і приймаються Замовником, задовольняють умовам договору №17/08/2009 від "18" серпня 2009 р. (надалі – Договір), належним чином виконані та оформлені.

Стислий опис наданих послуг, що здаються (приймаються):

1. Виконана розробка функціонального модулю міжоб'єктного обміну для автоматизації процесів інформаційного наповнення баз даних протиаварійних тренувань (ПТ) з використанням електронних засобів зв'язку на рівні ВСО "Вінницяелектротехнологія".

2. Функціональний модуль міжоб'єктного обміну включений до складу програмного тренажерного комплексу оперативних перемикань ВСО "Вінницяелектротехнологія" на всіх технічних засобах, які були надані Замовником на момент здачі-приймання послуг.

Вартість наданих послуг згідно п.2.1. Договору складає **88800,00 грн. (Вісімдесят вісім тисяч вісімсот гривень 00 коп.)**, у тому числі ПДВ (20%) у розмірі **14800,00 грн. (Чотирнадцять тисяч вісімсот гривень 00 коп.)**.

Підлягає до перерахування **88800,00 грн. (Вісімдесят вісім тисяч вісімсот гривень 00 коп.)**, у тому числі ПДВ (20%) у розмірі **14800,00 грн. (Чотирнадцять тисяч вісімсот гривень 00 коп.)**.

Дійсний акт є підставою для проведення взаємних розрахунків і платежів між Виконавцем і Замовником.

Від Виконавця:

_____ **Гурєєв В.О.,**
Генеральний директор
НВ ТОВ "Інфотех"

М.П.

Від Замовника:

_____ **Семенюк Ю.М.,**
Головний інженер ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго"

М.П.

Найменування ПІДРЯДНИКА:	Найменування ЗАМОВНИКА:
НВТ "Інфотех", ЄДРПОУ 03001744, Адреса: 04080, м. Київ-80, вул. Фрунзе, 85; п/р №26005021903831 у Залізничному відділенні КМФ АКБ "Укрсоцбанк" у м. Києві, МФО 322012; ІПН 030017426117, НПС 38227046	ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго", ЄДРПОУ 02071375, Адреса: 21029, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 10-й км; р/р №260063014111 у Центральному від. ПІБ м. Вінниця, МФО 302571; ІПН 001002226654, НПС 35481107

А К Т № 02-01/06/2008
здачі-приймання робіт за договором №01/06/2008
від "09" 07 2008 р.

"Розробка і впровадження у ВСО "Вінницяелектротехнологія" мультимедійного курсу з навчання оперативно-диспетчерського персоналу навичкам експлуатації елегазових вимикачів"

2-ий етап робіт згідно додатку №2 до договору: "Впровадження у ВСО "Вінницяелектротехнологія" промислового зразку мультимедійного курсу з навчання оперативно-диспетчерського персоналу навичкам експлуатації елегазових вимикачів"

(найменування виконаних робіт)

м. Київ "06" 02 2009 р.

Ми, що підписалися нижче, **представник Підрядника генеральний директор НВТ "Інфотех" Гурєєв В.О.**, з однієї сторони, і **представник Замовника директор ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго" Кардаш І.І.**, з іншої сторони, склали цей акт про те, що результати робіт, що здаються Підрядником і приймаються Замовником, задовольняють умовам договору №01/06/2008 від "09" 07 2008 р. (надалі – Договір), належним чином виконані та оформлені.

Стислий опис робіт, що здаються (приймаються):

1. За результатами дослідної експлуатації виконані доопрацювання і впровадження у ВСО "Вінницяелектротехнологія" мультимедійного курсу з навчання оперативно-диспетчерського персоналу навичкам експлуатації елегазових вимикачів у промислову експлуатацію.

2. Відповідно до п.6.3. Договору дистрибутиви промислового зразку мультимедійного курсу надані Замовникові на магнітних носіях в 02 (двох) примірниках.

Вартість робіт 2-го етапу згідно додатку №2 до Договору складає **12000,00 грн. (Дванадцять тисяч гривень 00 коп.)**, у тому числі ПДВ (20%) у розмірі **2000,00 грн. (Дві тисячі гривень 00 коп.).**

Підлягає до перерахування **12000,00 грн. (Дванадцять тисяч гривень 00 коп.)**, у тому числі ПДВ (20%) у розмірі **2000,00 грн. (Дві тисячі гривень 00 коп.).**

Дійсний акт є підставою для проведення взаємних розрахунків і платежів між Підрядником і Замовником.

Від Підрядника:

_____ Гурєєв В.О.,
Генеральний директор
НВТ "Інфотех"

М.П.

Від Замовника:

_____ Кардаш І.І.,
Директор ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго"

М.П.

Найменування ПІДРЯДНИКА:	Найменування ЗАМОВНИКА:
НВТ "Інфотех", ЄДРПОУ 03001744, Адреса: 04080, м. Київ-80, вул. Фрунзе, 85; п/р №26005021903831 у Залізничному відділенні КМФ АКБ "Укрсоцбанк" у м. Києві, МФО 322012; ІПН 030017426117, НПС 38227046	ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго", ЄДРПОУ 02071375, Адреса: 21029, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 10-й км; р/р №260063014111 у Центральному від. ПІБ м. Вінниця, МФО 302571; ІПН 001002226654, НПС 35481107

А К Т № 01-01/06/2008
здачі-приймання робіт за договором №01/06/2008
від "__4__" __07__ 2008 р.

"Розробка і впровадження у ВСО "Вінницяелектротехнологія" мультимедійного курсу з навчання оперативно-диспетчерського персоналу навичкам експлуатації елегазових вимикачів"

1-ий етап робіт згідно додатку №2 до договору: "Розробка і впровадження у ВСО "Вінницяелектротехнологія" дослідного зразку мультимедійного курсу з навчання оперативно-диспетчерського персоналу навичкам експлуатації елегазових вимикачів"
(найменування виконаних робіт)

м. Київ "__21__" __04__ 2008 р.

Ми, що підписалися нижче, **представник Підрядника генеральний директор НВТ "Інфотех" Гурєєв В.О.**, з однієї сторони, і **представник Замовника директор ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго" Кардаш І.І.**, з іншої сторони, склали цей акт про те, що результати робіт, що здаються Підрядником і приймаються Замовником, задовольняють умовам договору №01/06/2008 від "__4__" __07__ 2008 р. (надалі – Договір), належним чином виконані та оформлені.

Стислий опис робіт, що здаються (приймаються):

1. Виконані розробка і впровадження у ВСО "Вінницяелектротехнологія" дослідного зразку мультимедійного курсу з навчання оперативно-диспетчерського персоналу навичкам експлуатації елегазових вимикачів.

2. Відповідно до п.6.3. Договору дистрибутиви дослідного зразку мультимедійного курсу надані Замовникові на магнітних носіях в 02 (двох) примірниках.

Вартість робіт 1-го етапу згідно додатку №2 до Договору складає **12000,00 грн. (Дванадцять тисяч гривень 00 коп.)**, у тому числі ПДВ (20%) у розмірі **2000,00 грн. (Дві тисячі гривень 00 коп.).**

Підлягає до перерахування **12000,00 грн. (Дванадцять тисяч гривень 00 коп.)**, у тому числі ПДВ (20%) у розмірі **2000,00 грн. (Дві тисячі гривень 00 коп.).**

Дійсний акт є підставою для проведення взаємних розрахунків і платежів між Підрядником і Замовником.

Від Підрядника:	Від Замовника:
_____ Гурєєв В.О., Генеральний директор НВТ "Інфотех" М.П.	_____ Кардаш І.І., Директор ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго" М.П.

Найменування ЛІЦЕНЗІАРА:	**Найменування ЛІЦЕНЗІАТА:**
НВ ТОВ "Інфотех", ЄДРПОУ 03001744; Адреса: 04080, м. Київ, вул. Фрунзе, 85; п/р №26005021903831 у Залізничному від. КМФ АКБ "Укрсоцбанк" у м. Києві, МФО 322012; ІПН 030017426117, НПС 38227046	ДП "НЕК "Укренерго", ЄДРПОУ 00100227; Адреса: 01032, м. Київ, вул. Комінтерну, 25; п/р 26008301241445 у Київському міському від. ПІБ м. Києва, МФО 322250; ІПН 001002226654, НПС 35481107

А К Т №01/0104-2008/76/01-08

приймання-передачі дистрибутивів і технічної документації ліцензійного програмного забезпечення "Розширений програмний тренажерний комплекс оперативних перемикань (ПТК ОП+) для автоматизованої підготовки, проведення і аналізу результатів протиаварійних тренувань (ПТ) з тематики оперативних перемикань і ліквідації аварій в енергосистемах і електричних мережах із вбудовуваною базою даних ПТ, функціями самонавчання та психофізіологічної діагностики персоналу"

за Ліцензійним договором №0104-2008/76/01-08 від 27 березня 2008 р.

м. Київ "14" липня 2008 р.

Ми, що підписалися нижче, **представник Ліцензіара генеральний директор НВ ТОВ "Інфотех" Гурєєв В.О.**, з однієї сторони, і **представник Ліцензіата в.о. директора ДП "НЕК "Укренерго" Ущаповський К.В.**, з іншої сторони, склали цей акт про те, що відповідно до Додатку №2 та п.1.1. Додатку №3 до Ліцензійного договору №0104-2008/76/01-08 від 27 березня 2008 р., надалі - Договір, Ліцензіар передав, а Ліцензіат прийняв:

1. Комплект дистрибутивів ліцензійного програмного забезпечення (ЛПЗ) "Розширений програмний тренажерний комплекс оперативних перемикань (ПТК ОП+) для автоматизованої підготовки, проведення і аналізу результатів протиаварійних тренувань (ПТ) з тематики оперативних перемикань і ліквідації аварій в енергосистемах і електричних мережах із вбудовуваною базою даних ПТ, функціями самонавчання та психофізіологічної діагностики персоналу" у 16 (шістнадцяти) примірниках.
2. Комплект технічної документації до ЛПЗ у друкованому вигляді у складі:

2.1. Посібник користувача. "Розширений програмний тренажерний комплекс оперативних перемикань (ПТК ОП+) для автоматизованої підготовки, проведення і аналізу результатів протиаварійних тренувань (ПТ) з тематики оперативних перемикань і ліквідації аварій в енергосистемах і електричних мережах із вбудовуваною базою даних ПТ, функціями самонавчання та психофізіологічної діагностики персоналу". Ліцензія №0104-2008/76/01-08. – 16 (шістнадцять) прим.;

2.2. Посібник користувача. Створення протиаварійних тренувань. "Розширений програмний тренажерний комплекс оперативних перемикань (ПТК ОП+) для автоматизованої підготовки, проведення і аналізу результатів протиаварійних тренувань (ПТ) з тематики оперативних перемикань і ліквідації аварій в енергосистемах і електричних мережах із вбудовуваною базою даних ПТ, функціями самонавчання та психофізіологічної діагностики персоналу". Ліцензія №0104-2008/76/01-08. – 16 (шістнадцять) прим.;

2.3. Посібник адміністратора. Встановлення та підтримка Розширеного програмного тренажерного комплексу оперативних перемикань (ПТК ОП+) для автоматизованої підготовки, проведення і аналізу результатів протиаварійних тренувань (ПТ) з тематики оперативних перемикань і ліквідації аварій в енергосистемах і електричних мережах із вбудовуваною базою даних ПТ, функціями самонавчання та психофізіологічної діагностики персоналу. Ліцензія №0104-2008/76/01-08. – 16 (шістнадцять) прим.

Загальна вартість генеральної ліцензії на використання ЛПЗ "Розширений програмний тренажерний комплекс оперативних перемикань (ПТК ОП+) для автоматизованої підготовки, проведення і аналізу результатів протиаварійних тренувань (ПТ) з тематики оперативних перемикань і ліквідації аварій в енергосистемах і електричних мережах із вбудовуваною базою даних ПТ, функціями самонавчання та психофізіологічної діагностики персоналу" згідно з п. 2.1. Додатку №3 до Договору складає **1100000,00 грн. (Один мільйон сто тисяч гривень 00 коп.)**, плюс податок на додану вартість (20%) у розмірі **220000,00 грн. (Двісті двадцять тисяч гривень 00 коп.)**.

На момент підписання дійсного акту сума сплаченої частини паушального платежу склала **550000,00 грн. (П'ятсот п'ятдесят тисяч гривень 00 коп.)**, плюс податок на додану вартість (20%) у розмірі **110000,00 грн. (Сто десять тисяч гривень 00 коп.)**. Всього: **660000,00 грн. (Шістсот шістдесят тисяч гривень 00 коп.)**.

За винятком суми сплаченої частини паушального платежу належить до перерахування **550000,00 грн. (П'ятсот п'ятдесят тисяч гривень 00 коп.)**, плюс податок на додану вартість (20%) у розмірі **110000,00 грн. (Сто десять тисяч гривень 00 коп.)**. Всього: **660000,00 грн. (Шістсот шістдесят тисяч гривень 00 коп.)**.

Сторони одна до одної претензії не мають.

Від Ліцензіара:

_____ **В.О. Гурєєв,**

Генеральний директор
НВ ТОВ "Інфотех"

М.П.

Від Ліцензіата:

_____ **К.В. Ущаповський,**

в.о. директора
ДП "НЕК "Укренерго"

М.П.

Найменування ПІДРЯДНИКА:	Найменування ЗАМОВНИКА:
НВТ "Інфотех", ЄДРПОУ 03001744, Адреса: 04080, м. Київ-80, вул. Фрунзе, 85; р/р №26008301242143 у Київському міс. від. ПІБ м. Києва, МФО 322250	ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго", ЄДРПОУ 02071375, Адреса: 21029, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 10-й км; р/р №260063014111 у Центральному від. ПІБ м. Вінниця, МФО 302571

А К Т № 02-04/04/2008
здачі-приймання робіт за договором №04/04/2008

від "05" 05 2008 р.

"Розробка і включення до складу тренажерного комплексу оперативних перемикань ВСО "Вінницяелектротехнологія" тестів для визначення рівня працездатності та психофізіологічної діагностики персоналу, що навчається"

2-ий етап робіт згідно додатку №2 до договору: " Розробка і включення до складу тренажерного комплексу оперативних перемикань ВСО "Вінницяелектротехнологія" тестів для психофізіологічної діагностики персоналу, що навчається.

(найменування виконаних робіт)

м. Київ "05" 06 2008 р.

Ми, що підписалися нижче, **представник Підрядника генеральний директор НВТ "Інфотех" Гурєєв В.О.**, з однієї сторони, і **представник Замовника директор ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго" Кардаш І.І.**, з іншої сторони, склали цей акт про те, що результати робіт, що здаються Підрядником і приймаються Замовником, задовольняють умовам договору №04/04/2008 від "05" 05 2008 р. (надалі – Договір), належним чином виконані та оформлені.

Стислий опис робіт, що здаються (приймаються):

1. Виконані розробка і включення до складу тренажерного комплексу оперативних перемикань ВСО "Вінницяелектротехнологія" тестів для психофізіологічної діагностики персоналу, що навчається.

2. Відповідно до п.6.3. Договору ТК ОП із вбудованими тестами для психофізіологічної діагностики персоналу, що навчається, наданий Замовникові на магнітних носіях в 02 (двох) примірниках.

Вартість робіт 2-го етапу згідно додатку №2 до Договору складає **72000,00 грн. (Сімдесят дві тисячі гривень 00 коп.)**, у тому числі ПДВ (20%) у розмірі **12000,00 грн. (Дванадцять тисяч гривень 00 коп.)**.

Підлягає до перерахування **72000,00 грн. (Сімдесят дві тисячі гривень 00 коп.)**, у тому числі ПДВ (20%) у розмірі **12000,00 грн. (Дванадцять тисяч гривень 00 коп.)**.

Дійсний акт є підставою для проведення взаємних розрахунків і платежів між Підрядником і Замовником.

Від Підрядника:	Від Замовника:
Гурєєв В.О., Генеральний директор НВТ "Інфотех" М.П.	Кардаш І.І., Директор ВСО "Вінницяелектро- технологія" ДП "НЕК "Укренерго" М.П.

Найменування ПІДРЯДНИКА:	Найменування ЗАМОВНИКА:
НВТ "Інфотех", ЄДРПОУ 03001744, Адреса: 04080, м. Київ-80, вул. Фрунзе, 85; р/р №26008301242143 у Київському міс. від. ПІБ м. Києва, МФО 322250	ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго", ЄДРПОУ 02071375, Адреса: 21029, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 10-й км; р/р №260063014111 у Центральному від. ПІБ м. Вінниця, МФО 302571

А К Т № 01-04/04/2008
здачі-приймання робіт за договором №04/04/2008

від "05" 05 2008 р.

"Розробка і включення до складу тренажерного комплексу оперативних перемикань ВСО "Вінницяелектротехнологія" тестів для визначення рівня працездатності та психофізіологічної діагностики персоналу, що навчається"

1-ий етап робіт згідно додатку №2 до договору: " Розробка і включення до складу тренажерного комплексу оперативних перемикань ВСО "Вінницяелектротехнологія" тестів для визначення рівня працездатності персоналу, що навчається.

(найменування виконаних робіт)

м. Київ "14" 05 2008 р.

Ми, що підписалися нижче, **представник Підрядника генеральний директор НВТ "Інфотех" Гурєєв В.О.**, з однієї сторони, і **представник Замовника директор ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго" Кардаш І.І.**, з іншої сторони, склали цей акт про те, що результати робіт, що здаються Підрядником і приймаються Замовником, задовольняють умовам договору №04/04/2008 від "05" 05 2008 р. (надалі – Договір), належним чином виконані та оформлені.

Стислий опис робіт, що здаються (приймаються):

1. Виконані розробка і включення до складу тренажерного комплексу оперативних перемикань ВСО "Вінницяелектротехнологія" тестів для визначення рівня працездатності персоналу, що навчається.

2. Відповідно до п.6.3. Договору ТК ОП із вбудованими тестами для визначення рівня працездатності персоналу, що навчається, наданий Замовникові на магнітних носіях в 02 (двох) примірниках.

Вартість робіт 1-го етапу згідно додатку №2 до Договору складає **96000,00 грн. (Дев'яносто шість тисяч гривень 00 коп.)**, у тому числі ПДВ (20%) у розмірі **16000,00 грн. (Шістнадцять тисяч гривень 00 коп.).**

Сума попередньої оплати дорівнює **50400,00 грн. (П'ятдесят тисяч чотириста гривень 00 коп.).**

Підлягає до перерахування **45600,00 грн. (Сорок п'ять тисяч шістсот гривень 00 коп.)**, у тому числі ПДВ (20%) у розмірі **7600,00 грн. (Сім тисяч шістсот гривень 00 коп.).**

Дійсний акт є підставою для проведення взаємних розрахунків і платежів між Підрядником і Замовником.

Від Підрядника:	Від Замовника:
Гурєєв В.О., Генеральний директор НВТ "Інфотех"	Кардаш І.І., Директор ВСО "Вінницяелектро- технологія" ДП "НЕК "Укренерго"
М.П.	М.П.

Найменування ПІДРЯДНИКА:	Найменування ЗАМОВНИКА:
НВТ "Інфотех", ЄДРПОУ 03001744; 04080, м. Київ, вул. Фрунзе, 85; п/р №26008301242143 в Київському міс. від. ПІБ м. Києва, МФО 322250	Кримська ЕС ДП "НЕК "Укренерго", ЄДРПОУ 23451484; 95034, АР Крим, м. Сімферополь, вул. Київська, 74/6; п/р № 26002301322036 в КЦВ ПІБ м. Сімферополя, МФО 324430

А К Т № 01-07/12/2006-20/11
здачі-приймання робіт за договором №07/12/2006-20/11

від 31 січня 2007 р.

"Розробка техно-робочого проекту (ТРП) на створення програмного повнофункціонального режимного диспетчерського тренажера (ПРДТ) для оперативного персоналу енергосистем та ДП "НЕК "Укренерго" відповідно до затверджених технічних вимог"
(найменування виконаних робіт)

м. Сімферополь "_____" листопада 2007 р.

Ми, що підписалися нижче, **представник Підрядника - генеральний директор НВТ "Інфотех" Гурєєв В.О.**, з одного боку, і **представник Замовника - директор Кримської ЕС ДП "НЕК "Укренерго" Харитонов В.М.**, з іншого боку, склали цей акт про те, що результати робіт, які здаються Підрядником і приймаються Замовником, задовольняють умовам договору №07/12/2006-20/11 від 31 січня 2007 р. (надалі – Договір), належним чином виконані та оформлені.

Стислий опис робіт, що задаються (приймаються): Розроблено, виготовлено і передано Замовникові у надрукованому вигляді ТРП на створення програмного повнофункціонального режимного диспетчерського тренажера (ПРДТ) для оперативного персоналу енергосистем та ДП "НЕК "Укренерго" у 4 (чотирьох) примірниках.

Вартість робіт згідно з Додатками №1 та №2 до Договору складає **249000,00 грн. (Двісті сорок дев'ять тисяч гривень 00 коп.)**, крім того ПДВ (20%) у сумі **49800,00 грн. (Сорок дев'ять тисяч вісімсот гривень 00 коп.)**.

Сума раніше перерахованого авансу становить **89640,00 грн. (Вісімдесят дев'ять тисяч шістсот сорок гривень 00 коп.)**, у тому числі ПДВ (20%) у розмірі **14940,00 грн. (Чотирнадцять тисяч дев'ятсот сорок гривень 00 коп.).**

З врахуванням авансу належить до перерахування **209160,00 грн. (Двісті дев'ять тисяч сто шістдесят гривень 00 коп.)**, включаючи ПДВ (20%) у розмірі **34860,00 грн. (Тридцять чотири тисячі вісімсот шістдесят гривень 00 коп.).**

Від Підрядника:	Від Замовника:
_____ Гурєєв В.О.,	_____ Харитонов В.М.,
Генеральний директор НВТ "Інфотех"	Директор Кримської ЕС ДП "НЕК "Укренерго"
М.П.	М.П.

Найменування ПІДРЯДНИКА:	Найменування ЗАМОВНИКА:
НВТ "Інфотех", ЄДРПОУ 03001744, Адреса: 04080, м. Київ-80, вул. Фрунзе, 85; р/р №26008301242143 у Київському міс. від. ПІБ м. Києва, МФО 322250	ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго", ЄДРПОУ 02071375, Адреса: 21029, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 10-й км; р/р №260063014111 у Центральному від. ПІБ м. Вінниця, МФО 302571

А К Т № 01-122
здачі-приймання робіт за договором №122
від 05 листопада 2007 р.

"Розробка технічного завдання на інтерактивний практикум (ІП) для навчання персоналу навичкам створення бланків оперативних перемикань"

(найменування виконаних робіт)

м. Київ "_____"_____ 2007 р.

Ми, що підписалися нижче, **представник Підрядника генеральний директор НВТ "Інфотех" Гурєєв В.О.**, з однієї сторони, і **представник Замовника директор ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго" Кардаш І.І.**, з іншої сторони, склали цей акт про те, що результати робіт, що здаються Підрядником і приймаються Замовником, задовольняють умовам договору №122 від 05 листопада 2007 р. (надалі – Договір), належним чином виконані та оформлені.

Стислий опис робіт, що здаються (приймаються): Розроблено та надане Замовникові технічне завдання на ІП для навчання персоналу навичкам створення бланків оперативних перемикань.

Вартість робіт згідно додатку №2 до Договору складає **Вісімнадцять тисяч (18000) гривень 00 коп.**, включаючи ПДВ (20%) у розмірі **Три тисячі (3000) гривень 00 коп.**

Належить до перерахування **Вісімнадцять тисяч (18000) гривень 00 коп.**, включаючи ПДВ (20%) у розмірі **Три тисячі (3000) гривень 00 коп.**

Дійсний акт є підставою для проведення взаємних розрахунків і платежів між Підрядником і Замовником.

Від Підрядника:

_____ **Гурєєв В.О.,**
Генеральний директор
НВТ "Інфотех"

М.П.

Від Замовника:

_____ **Кардаш І.І.,**
Директор ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго"

М.П.

Найменування ПІДРЯДНИКА:	**Найменування ЗАМОВНИКА:**
НВТ "Інфотех", ЄДРПОУ 03001744, Адреса: 04080, м. Київ-80, вул. Фрунзе, 85; р/р №26008301242143 у Київському міс. від. ПІБ м. Києва, МФО 322250	ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго", ЄДРПОУ 02071375, Адреса: 21029, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 10-й км; р/р №260063014111 у Центральному від. ПІБ м. Вінниця, МФО 302571

А К Т № 01-123
здачі-приймання робіт за договором №123
від 05 листопада 2007 р.

"Комплектація інтерактивного практикуму (ІП) матеріалами з навчання персоналу"

(найменування виконаних робіт)

м. Київ "_____"_____ 2007 р.

Ми, що підписалися нижче, **представник Підрядника генеральний директор НВТ "Інфотех" Гурєєв В.О.**, з однієї сторони, і **представник Замовника директор ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго" Кардаш І.І.**, з іншої сторони, склали цей акт про те, що результати робіт, що здаються Підрядником і приймаються Замовником, задовольняють умовам договору №123 від 05 листопада 2007 р. (надалі – Договір), належним чином виконані та оформлені.

Стислий опис робіт, що здаються (приймаються): Виконано комплектацію ІП матеріалами з навчання персоналу у вигляді тестових примірників бланків оперативних перемикань та примірників принципових електричних схем підстанцій, які надані Замовникові.

Вартість робіт згідно додатку №2 до Договору складає **Вісімнадцять тисяч (18000) гривень 00 коп.**, включаючи ПДВ (20%) у розмірі **Три тисячі (3000) гривень 00 коп.**

Належить до перерахування **Вісімнадцять тисяч (18000) гривень 00 коп.**, включаючи ПДВ (20%) у розмірі **Три тисячі (3000) гривень 00 коп.**

Дійсний акт є підставою для проведення взаємних розрахунків і платежів між Підрядником і Замовником.

Від Підрядника:

_____ **Гурєєв В.О.,**
Генеральний директор
НВТ "Інфотех"

М.П.

Від Замовника:

_____ **Кардаш І.І.,**
Директор ВСО "Вінницяелектро-технологія" ДП "НЕК "Укренерго"

М.П.

Найменування ПІДРЯДНИКА:	**Найменування ЗАМОВНИКА:**
НВТ "Інфотех", ЄДРПОУ 03001744, Адреса: 04080, м. Київ-80, вул. Фрунзе, 85; р/р №26008301242143 у Київському міс. від. ПІБ м. Києва, МФО 322250	ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго", ЄДРПОУ 02071375, Адреса: 21029, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 10-й км; р/р №260063014111 у Центральному від. ПІБ м. Вінниця, МФО 302571

А К Т № 01-125
здачі-приймання робіт за договором №125
від 14 листопада 2007 р.

"Підготовка та виготовлення дослідного зразку інтерактивного практикуму (ІП) для навчання персоналу"

(найменування виконаних робіт)

м. Київ "_____"_____ 2007 р.

Ми, що підписалися нижче, **представник Підрядника генеральний директор НВТ "Інфотех" Гурєєв В.О.**, з однієї сторони, і **представник Замовника директор ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго" Кардаш І.І.**, з іншої сторони, склали цей акт про те, що результати робіт, що здаються Підрядником і приймаються Замовником, задовольняють умовам договору №125 від 14 листопада 2007 р. (надалі – Договір), належним чином виконані та оформлені.

Стислий опис робіт, що здаються (приймаються): Виконано підготовку та виготовлення дослідного зразку інтерактивного практикуму (ІП) для навчання персоналу, який наданий Замовникові у вигляді дослідних тестових примірників бланків оперативних перемикань в електричних мережах.

Вартість робіт згідно додатку №2 до Договору складає **Вісімнадцять тисяч (18000) гривень 00 коп.**, включаючи ПДВ (20%) у розмірі **Три тисячі (3000) гривень 00 коп.**

Належить до перерахування **Вісімнадцять тисяч (18000) гривень 00 коп.**, включаючи ПДВ (20%) у розмірі **Три тисячі (3000) гривень 00 коп.**

Дійсний акт є підставою для проведення взаємних розрахунків і платежів між Підрядником і Замовником.

Від Підрядника:	**Від Замовника:**
_____ **Гурєєв В.О.,** **Генеральний директор** **НВТ "Інфотех"** **М.П.**	_____ **Кардаш І.І.,** **Директор ВСО "Вінницяелектро-технологія" ДП "НЕК "Укренерго"** **М.П.**

Найменування ПІДРЯДНИКА:	**Найменування ЗАМОВНИКА:**
НВТ "Інфотех", ЄДРПОУ 03001744, Адреса: 04080, м. Київ-80, вул. Фрунзе, 85; р/р №26008301242143 у Київському міс. від. ПІБ м. Києва, МФО 322250	ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго", ЄДРПОУ 02071375, Адреса: 21029, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 10-й км; р/р №260063014111 у Центральному від. ПІБ м. Вінниця, МФО 302571

А К Т № 01-126
здачі-приймання робіт за договором №126
від 14 листопада 2007 р.

"Монтаж інтерактивного практикуму (ІП) з виготовлених матеріалів для промислового впровадження"

(найменування виконаних робіт)

м. Київ "_____"_____ 2007 р.

Ми, що підписалися нижче, **представник Підрядника генеральний директор НВТ "Інфотех" Гурєєв В.О.**, з однієї сторони, і **представник Замовника директор ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго" Кардаш І.І.**, з іншої сторони, склали цей акт про те, що результати робіт, що здаються Підрядником і приймаються Замовником, задовольняють умовам договору №126 від 14 листопада 2007 р. (надалі – Договір), належним чином виконані та оформлені.

Стислий опис робіт, що здаються (приймаються): З виготовлених матеріалів виконаний монтаж ІП, який прийнятий Замовником для подальшої промислової експлуатації з метою навчання персоналу.

Вартість робіт згідно додатку №2 до Договору складає **Вісімнадцять тисяч (18000) гривень 00 коп.**, включаючи ПДВ (20%) у розмірі **Три тисячі (3000) гривень 00 коп.**

Належить до перерахування **Вісімнадцять тисяч (18000) гривень 00 коп.**, включаючи ПДВ (20%) у розмірі **Три тисячі (3000) гривень 00 коп.**

Дійсний акт є підставою для проведення взаємних розрахунків і платежів між Підрядником і Замовником.

Від Підрядника:

_____ **Гурєєв В.О.,**
Генеральний директор
НВТ "Інфотех"

М.П.

Від Замовника:

_____ **Кардаш І.І.,**
Директор ВСО "Вінницяелектро-технологія" ДП "НЕК "Укренерго"

М.П.

Найменування ПІДРЯДНИКА:	Найменування ЗАМОВНИКА:
НВТ "Інфотех", ЄДРПОУ 03001744, Адреса: 04080, м. Київ-80, вул. Фрунзе, 85; р/р №26008301242143 у Київському міс. від. ПІБ м. Києва, МФО 322250	ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго", ЄДРПОУ 02071375, Адреса: 21029, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 10-й км; р/р №260063014111 у Центральному від. ПІБ м. Вінниця, МФО 302571

А К Т № 04-66
здачі-приймання робіт за договором №66
від 01 червня 2007 р.

"Розробка та постачання матеріалів мультимедійного курсу (МК) і впровадження його в промислову експлуатацію для навчання персоналу"

4-ий етап робіт згідно додатку №2 до договору: "Монтаж МК з виготовлених матеріалів для промислового впровадження".

(найменування виконаних робіт)

м. Київ "08" 08 2007 р.

Ми, що підписалися нижче, **представник Підрядника генеральний директор НВТ "Інфотех" Гурєєв В.О.**, з одного боку, і **представник Замовника директор ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго" Кардаш І.І.**, з іншого боку, склали цей акт про те, що результати робіт, що здаються Підрядником і приймаються Замовником, задовольняють умовам договору №66 від 01.06.2007 р. (надалі – Договір), належним чином виконані та оформлені.

Стислий опис робіт, що здаються (приймаються): З виготовлених матеріалів виконаний монтаж МК, який прийнятий Замовником для подальшої промислової експлуатації з метою навчання персоналу.

Вартість робіт 4-го етапу згідно додатку №2 до договору №66 від 01.06.2007 р. складає **П'ятнадцять тисяч (15000) гривень 00 коп.**, плюс ПДВ (20%) у розмірі **Три тисячі (3000) гривень 00 коп.**

Загальна сума складає **Вісімнадцять тисяч (18000) гривень 00 коп.**

Підлягає до перерахування **Вісімнадцять тисяч (18000) гривень 00 коп.**, включаючи ПДВ (20%) у розмірі **Три тисячі (3000) гривень 00 коп.**

Дійсний акт є підставою для проведення взаємних розрахунків і платежів між Підрядником і Замовником.

Від Підрядника:	Від Замовника:
_____ Гурєєв В.О., Генеральний директор НВТ "Інфотех" М.П.	_____ Кардаш І.І., Директор ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго" М.П.

Найменування ПІДРЯДНИКА:	Найменування ЗАМОВНИКА:
НВТ "Інфотех", ЄДРПОУ 03001744, Адреса: 04080, м. Київ-80, вул. Фрунзе, 85; р/р №26008301242143 у Київському міс. від. ПІБ м. Києва, МФО 322250	ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго", ЄДРПОУ 02071375, Адреса: 21029, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 10-й км; р/р №260063014111 у Центральному від. ПІБ м. Вінниця, МФО 302571

А К Т № 03-66
здачі-приймання робіт за договором №66
від 01 червня 2007 р.

"Розробка та постачання матеріалів мультимедійного курсу (МК) і впровадження його в промислову експлуатацію для навчання персоналу"

3-ий етап робіт згідно додатку №2 до договору: "Підготовка та дослідне виготовлення МК з навчання персоналу".

(найменування виконаних робіт)

м. Київ "10" 08 2007 р.

Ми, що підписалися нижче, **представник Підрядника генеральний директор НВТ "Інфотех" Гурєєв В.О.**, з одного боку, і **представник Замовника директор ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго" Кардаш І.І.**, з іншого боку, склали цей акт про те, що результати робіт, що здаються Підрядником і приймаються Замовником, задовольняють умовам договору №66 від 01.06.2007 р. (надалі – Договір), належним чином виконані та оформлені.

Стислий опис робіт, що здаються (приймаються): виготовлений та наданий Замовникові дослідний зразок МК з навчання персоналу.

Вартість робіт 3-го етапу згідно додатку №2 до договору №66 від 01.06.2007 р. складає **П'ятнадцять тисяч (15000) гривень 00 коп.**, плюс ПДВ (20%) у розмірі **Три тисячі (3000) гривень 00 коп.**

Загальна сума складає **Вісімнадцять тисяч (18000) гривень 00 коп.**

Підлягає до перерахування **Вісімнадцять тисяч (18000) гривень 00 коп.**, включаючи ПДВ (20%) у розмірі **Три тисячі (3000) гривень 00 коп.**

Дійсний акт є підставою для проведення взаємних розрахунків і платежів між Підрядником і Замовником.

Від Підрядника:

Гурєєв В.О.,
Генеральний директор
НВТ "Інфотех"

М.П.

Від Замовника:

Кардаш І.І.,
Директор ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго"

М.П.

Найменування ПІДРЯДНИКА:	Найменування ЗАМОВНИКА:
НВТ "Інфотех", ЄДРПОУ 03001744, Адреса: 04080, м. Київ-80, вул. Фрунзе, 85; р/р №26008301242143 у Київському міс. від. ПІБ м. Києва, МФО 322250	ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго", ЄДРПОУ 02071375, Адреса: 21029, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 10-й км; р/р №260063014111 у Центральному від. ПІБ м. Вінниця, МФО 302571

А К Т № 02-66
здачі-приймання робіт за договором №66
від 01 червня 2007 р.

"Розробка та постачання матеріалів мультимедійного курсу (МК) і впровадження його в промислову експлуатацію для навчання персоналу"

2-ий етап робіт згідно додатку №2 до договору: "Розробка матеріалів для МК з оперативних перемикань в електроустановках".

(найменування виконаних робіт)

м. Київ "_____"_____ 2007 р.

Ми, що підписалися нижче, **представник Підрядника генеральний директор НВТ "Інфотех" Гурєєв В.О.**, з одного боку, і **представник Замовника директор ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго" Кардаш І.І.**, з іншого боку, склали цей акт про те, що результати робіт, що здаються Підрядником і приймаються Замовником, задовольняють умовам договору №66 від 01.06.2007 р. (надалі – Договір), належним чином виконані та оформлені.

Стислий опис робіт, що здаються (приймаються): Розроблені та надані Замовникові матеріали для МК з оперативних перемикань в електроустановках.

Вартість робіт 2-го етапу згідно додатку №2 до договору №66 від 01.06.2007 р. складає **Дванадцять тисяч (12000) гривень 00 коп.**, плюс ПДВ (20%) у розмірі **Дві тисячі чотириста (2400) гривень 00 коп.**

Загальна вартість робіт складає **Чотирнадцять тисяч чотириста (14400) гривень 00 коп.**

Підлягає до перерахування **Чотирнадцять тисяч чотириста (14400) гривень 00 коп.**, включаючи ПДВ (20%) у розмірі **Дві тисячі чотириста (2400) гривень 00 коп.**

Дійсний акт є підставою для проведення взаємних розрахунків і платежів між Підрядником і Замовником.

Від Підрядника:

_____ **Гурєєв В.О.,**
Генеральний директор
НВТ "Інфотех"

М.П.

Від Замовника:

_____ **Кардаш І.І.,**
Директор ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго"

М.П.

09.11.07

Найменування ПІДРЯДНИКА:	Найменування ЗАМОВНИКА:
НВТ "Інфотех", ЄДРПОУ 03001744, Адреса: 04080, м. Київ-80, вул. Фрунзе, 85; р/р №26008301242143 у Київському міс. від. ПІБ м. Києва, МФО 322250	ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго", ЄДРПОУ 02071375, Адреса: 21029, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 10-й км; р/р №260063014111 у Центральному від. ПІБ м. Вінниця, МФО 302571

А К Т № 01-66
здачі-приймання робіт за договором №66
від 01 червня 2007 р.

"Розробка та постачання матеріалів мультимедійного курсу (МК) і впровадження його в промислову експлуатацію для навчання персоналу"

1-ий етап робіт згідно додатку №2 до договору: "Розробка технічного завдання (ТЗ)".
(найменування виконаних робіт)

м. Київ "_____"_____ 2007 р.

Ми, що підписалися нижче, **представник Підрядника генеральний директор НВТ "Інфотех" Гурєєв В.О.**, з одного боку, і **представник Замовника директор ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго" Кардаш І.І.**, з іншого боку, склали цей акт про те, що результати робіт, що здаються Підрядником і приймаються Замовником, задовольняють умовам договору №66 від 01.06.2007 р. (надалі – Договір), належним чином виконані та оформлені.

Стислий опис робіт, що здаються (приймаються): Розроблено та надане Замовникові технічне завдання (ТЗ) на розробку матеріалів МК для навчання персоналу.

Вартість робіт 1-го етапу згідно додатку №2 до договору №66 від 01.06.2007 р. складає **Вісімнадцять тисяч (18000) гривень 00 коп.**, плюс ПДВ (20%) у розмірі **Три тисячі шістсот (3600) гривень 00 коп.**

Загальна вартість робіт складає **Двадцять одну тисячу шістсот (21600) гривень 00 коп.**

Сума перерахованого авансу дорівнює **Двадцяті однієї тисячі шістистам (21600) гривням 00 коп.**, включаючи ПДВ (20%) у розмірі **Три тисячі шістсот (3600) гривень 00 коп.**

З врахуванням авансу належить до перерахування не належить.
(сума прописом)

Дійсний акт є підставою для проведення взаємних розрахунків і платежів між Підрядником і Замовником.

Від Підрядника:	Від Замовника:
_____ Гурєєв В.О., Генеральний директор НВТ "Інфотех"	_____ Кардаш І.І., Директор ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго"
М.П.	М.П.

07 ІІІ-18

Найменування ЛІЦЕНЗІАРА:	Найменування ЛІЦЕНЗІАТА:
НВТ "Інфотех", ЄДРПОУ 03001744; Адреса: 04080, м. Київ-80, вул. Фрунзе, 85; п/р №26008301242143 у Київському міс. від. ПІБ м. Києва, МФО 322250	ВАТ "ЕК "Дніпрообленерго", ЄДРПОУ 23359034; Адреса: 49107, м. Дніпропетровськ, Запорізьке шосе, 22; п/р №2600532331285 у філії "ДЦВ ПІБ" у м. Дніпропетровську, МФО 305437

А К Т №01/2603-2007
прийому-передачі дистрибутивів і технічної документації ліцензійного програмного забезпечення "Програмний тренажерний комплекс оперативних перемикань (ПТК ОП)"
за Ліцензійним договором №977/07 від 14 травня 2007 р.

м. Дніпропетровськ "25" червня 2007 р.

Ми, що підписалися нижче, **представник Ліцензіара генеральний директор НВТ "Інфотех" Гурєєв В.О.**, з одного боку, і **представник Ліцензіата генеральний директор ВАТ "ЕК "Дніпрообленерго" Соколовський Е.С.**, з іншого боку, склали цей акт про те, що відповідно до Додатку №1 та п.1.1. Додатку №2 до Ліцензійного договору №977/07 від 14 травня 2007 р. Ліцензіар передав, а Ліцензіат прийняв:

1. Комплект дистрибутивів ліцензійного програмного забезпечення (ПЗ) "Програмний тренажерний комплекс оперативних перемикань (ПТК ОП)" у 27 (двадцяти семі) примірниках.
2. Комплект технічної документації до ліцензійного ПЗ " Програмний тренажерний комплекс оперативних перемикань (ПТК ОП)" у друкованому вигляді у складі:

2.1. Посібник користувача "Програмний тренажерний комплекс оперативних перемикань (ПТК ОП) для створення і проведення протиаварійних тренувань у ВАТ "ЕК "Дніпрообленерго". Ліцензія №2603-2007. – 27 (двадцять сім) прим.;

2.2. Посібник користувача. Створення протиаварійних тренувань. Версія 1.10. "Програмний тренажерний комплекс оперативних перемикань (ПТК ОП) для створення і проведення протиаварійних тренувань у ВАТ "ЕК "Дніпрообленерго". Ліцензія №2603-2007. – 27 (двадцять сім) прим.;

Загальна вартість генеральної ліцензії на використання ПЗ "Програмний тренажерний комплекс оперативних перемикань (ПТК ОП)" згідно з п. 2.1. Додатку №2 до Ліцензійного договору №977/07 від 14 травня 2007 р. складає **81666,67 (Вісімдесят одна тисяча шістсот шістдесят шість гривень 67 коп.)**, плюс податок на додану вартість (20%) у розмірі **16333,33 (Шістнадцять тисяч триста тридцять три гривні 33 коп.).**

Сума сплаченого паушального платежу склала **81666,67 (Вісімдесят одна тисяча шістсот шістдесят шість гривень 67 коп.)**, плюс податок на додану вартість (20%) у розмірі **16333,33 (Шістнадцять тисяч триста тридцять три гривні 33 коп.).**

Всього: **98000,00 (Дев'яносто вісім тисяч гривень 00 коп.).**

За винятком суми сплаченого паушального платежу належить до перерахування:

не належить
(сума прописом)

Сторони одна до одної претензії не мають.

Від Ліцензіара:	Від Ліцензіата:
_____ Гурєєв В.О., Генеральний директор НВТ "Інфотех"	_____ Соколовський Е.С., Генеральний директор ВАТ "ЕК "Дніпрообленерго"
М.П.	М.П.

Найменування ПІДРЯДНИКА:

НВТ «Інфотех», ЄДРПОУ 03001744;
Адреса: 04080, м. Київ-80,
вул. Фрунзе, 85;
п/р №26008301242143 у Київському
міс. від. ПІБ м. Києва, МФО 322250

Найменування ЗАМОВНИКА:

Дніпровська ЕС ДП «НЕК «Укренерго»,
ЄДРПОУ 20517231;
Адреса: 69096, м. Запоріжжя, вул. Гребельна, 2;
п/р №26007301155559 в ЗЦВ ПІБ
м. Запоріжжя, МФО 313355

А К Т №02/107-07
здачі-прийомки робіт за договором підряду №06/02/2006/123
від 16.03.2006 р.

«Поставка і об'єктна адаптація програмного тренажерного комплексу оперативних перемикань (далі – ПТК ОП) для 21 (двадцяти однієї) електричної підстанції (ПС) ДнЕС».

Етап №2. Поставка та об'єктна адаптація для ПС «Українка-330», ПС «Побужжя-330», ПС «Кварцит-330», ПС «Мелітопольська-330», ПС «Молочанська-330», ПС «ДД-330», ПС «Запорізька-330», ПС «Запорізька-750».

(найменування виконаних робіт)

м. Запоріжжя «23» березня 2007 р.

Ми, що підписалися нижче, **представник Підрядника генеральний директор НВТ «Інфотех» Гурєєв В.О.**, з одного боку, і **представник Замовника директор Дніпровської ЕС ДП «НЕК «Укренерго» Вишневський Ю.М.**, з другого боку, склали цей акт про те, що результати робіт, що здаються Підрядником і приймаються Замовником, задовольняють умовам договору №06/02/2006/123 від 16.03.2006р., належним чином виконані та оформлені.

Стислий опис робіт, що здаються (приймаються):

1. Проведена поставка і об'єктна адаптація програмного тренажерного комплексу оперативних перемикань (ПТК ОП) для 08 (восьми) електричних ПС ДнЕС ДП «НЕК «Укренерго», адаптованого до реальних умов його функціонування на ПС «Українка-330», ПС «Побужжя-330», ПС «Кварцит-330», ПС «Мелітопольська-330», ПС «Молочанська-330», ПС «ДД-330», ПС «Запорізька-330», ПС «Запорізька-750» в наступному обсязі:
   а) тренування по бланкам перемикань (введення, виведення обладнання) – загалом 160 (сто шістдесят) тренувань;
   б) протиаварійні тренування – загалом 40 (сорок) тренувань.
2. ПТК ОП встановлені на всіх робочих станціях, пред'явлених Замовником на момент постачання. Комплекси залишені у робочому стані для подальшого освоєння і експлуатації за призначенням.
3. Проведено навчання фахівців ДнЕС ДП «НЕК «Укренерго» навичкам створення протиаварійних тренувань з використанням ПТК ОП.
4. З метою забезпечення можливостей подальшої установки і запуску ПТК ОП на енергооб'єктах силами фахівців ДнЕС Замовнику передані робочі та резервні (сейфові) екземпляри ПТК ОП на магнітних носіях.

5. Розроблений і переданий у друкованому вигляді комплект експлуатаційної документації у складі:

5.1. Програма навчання оперативно-диспетчерського персоналу Дніпровської ЕС ДП «НЕК «Укренерго» засобам роботи з ПТК ОП для розробки і проведення протиаварійних тренувань на 4 стор. – 8 екз.;

5.2. Посібник користувача «Програмний тренажерний комплекс оперативних перемикань (ПТК ОП) для створення і проведення протиаварійних тренувань в Дніпровської ЕС ДП «НЕК «Укренерго» на 68 стор. – 8 екз.;

5.3. Посібник користувача. Створення протиаварійних тренувань. Версія 1.10. «Програмний тренажерний комплекс оперативних перемикань» (ПТК ОП) для створення і проведення протиаварійних тренувань в Дніпровської ЕС ДП «НЕК «Укренерго» на 98 стор. – 8 екз.

Вартість робіт за етапом №2 згідно з додатком №2 до договору №06/02/2006/123 від 16.03.2006 складає **Тридцять чотири тисячі двісті вісімдесят три (34283) гривні 33 коп.**, плюс ПДВ (20%) у розмірі **Шість тисяч вісімсот п'ятдесят шість (6856) гривень 67 коп.**

Сума попередньої оплати складає **Сімнадцять тисяч сто сорок одна (17141) гривня 67 коп.**, плюс ПДВ (20%) у розмірі **Три тисячі чотириста двадцять вісім (3428) гривень 33 коп.**

За винятком попередньої оплати належить до перерахування **Сімнадцять тисяч сто сорок одна (17141) гривня 67 коп.**, плюс ПДВ (20%) у розмірі **Три тисячі чотириста двадцять вісім (3428) гривень 33 коп.**

Всього: **Двадцять тисяч п'ятсот сімдесят (20570) гривень 00 коп.**

Від Підрядника:

Гурєєв В.О.,
Генеральний директор
НВТ «Інфотех»

М.П.

Від Замовника:

Вишневський Ю.М.,
Директор Дніпровської ЕС
ДП «НЕК «Укренерго»

М.П.

Найменування ЛІЦЕНЗІАРА:	Найменування ЛІЦЕНЗІАТА:
НВТ "Інфотех", ЄДРПОУ 03001744; Адреса: 04080, м. Київ-80, вул. Фрунзе, 85; п/р №26008301242143 у Київському міс. від. ПІБ м. Києва, МФО 322250	Донбаська ЕС ДП "НЕК "Укренерго", ЄДРПОУ 23344104; Адреса: 84601, Донецька обл., м. Горлівка, пр. Леніна, 11; п/р №26008301550293 у філії Центрально-міського від. ПІБ м. Горлівка, МФО 334464

А К Т №01/0207-2006
прийому-передачі дистрибутивів і технічної документації ліцензійного програмного забезпечення "Програмний тренажерний комплекс оперативних перемикань (ПТК ОП)"
за Ліцензійним договором №0207-2006/435 від 12грудня 2006 р.

м. Горлівка "27" березня 2007 р.

Ми, що підписалися нижче, **представник Ліцензіара генеральний директор НВТ "Інфотех" Гурєєв В.О.**, з одного боку, і **представник Ліцензіата директор Донбаської ЕС ДП "НЕК "Укренерго" Колосов О.Ф.**, з другого боку, склали цей акт про те, що відповідно до п.1.1. додатку №2 до Ліцензійного договору №0207-2006/435 від 12.12.2006 р. Ліцензіар передав, а Ліцензіат прийняв:

1. Комплект дистрибутивів ліцензійного програмного забезпечення (ПЗ) "Програмний тренажерний комплекс оперативних перемикань (ПТК ОП)" у 02 (двох) примірниках.
2. Комплект технічної документації до ліцензійного ПЗ "Програмний тренажерний комплекс оперативних перемикань (ПТК ОП)" у друкованому вигляді у складі:

2.1. Посібник користувача "Програмний тренажерний комплекс оперативних перемикань (ПТК ОП) для створення і проведення протиаварійних тренувань в ДЕС ДП "НЕК "Укренерго". – 02 (два) прим.;

2.2. Посібник користувача. Створення протиаварійних тренувань. Версія 1.10. "Програмний тренажерний комплекс оперативних перемикань (ПТК ОП) для створення і проведення протиаварійних тренувань в ДЕС ДП "НЕК "Укренерго". – 02 (два) прим.

Загальна вартість генеральної ліцензії на використання ПЗ "Програмний тренажерний комплекс оперативних перемикань (ПТК ОП)" згідно з п. 2.1. додатку №2 до Ліцензійного договору №0207-2006/435 від 12.12.2006 р. складає **145000,00 (Сто сорок п'ять тисяч гривень 00 коп.)**, плюс ПДВ (20%) у розмірі **29000,00 (Двадцять дев'ять тисяч гривень 00 коп.).**

Сума первісного паушального платежу склала **72500,00 (Сімдесят дві тисячі п'ятсот гривень 00 коп.)**, плюс ПДВ (20%) у розмірі **14500,00 (Чотирнадцять тисяч п'ятсот гривень 00 коп.).**

За винятком суми первісного паушального платежу належить до перерахування **72500,00 (Сімдесят дві тисячі п'ятсот гривень 00 коп.)**, плюс ПДВ (20%) у розмірі **14500,00 (Чотирнадцять тисяч п'ятсот гривень 00 коп.).**

Всього: **87000,00 (Вісімдесят сім тисяч гривень 00 коп.).**

Від Ліцензіара:

_____ **Гурєєв В.О.,**
Генеральний директор
НВТ "Інфотех"
М.П.

Від Ліцензіата:

_____ **Колосов О.Ф.**
Директор Донбаської ЕС
ДП "НЕК "Укренерго"
М.П.

Найменування ЛІЦЕНЗІАРА:	Найменування ЛІЦЕНЗІАТА:
НВТ "Інфотех", ЄДРПОУ 03001744; Адреса: 04080, м. Київ-80, вул. Фрунзе, 85; п/р №26008301242143 у Київському міс. від. ПІБ м. Києва, МФО 322250	ДП "НЕК "Укренерго", ЄДРПОУ 00100227; Адреса: 01032, м. Київ-32, вул. Комінтерну, 25; п/р 26008301241445 у Київському міс. від. ПІБ м. Києва, МФО 322250

А К Т №01/0112-2006
прийому-передачі дистрибутивів і технічної документації ліцензійного програмного забезпечення "Програмний комплекс "Бланки перемикань (ПК БП)"
за Ліцензійним договором №0112-2006/29/01-07 від 06 лютого 2007 р.

м. Київ "16" березня 2007 р.

Ми, що підписалися нижче, **представник Ліцензіара генеральний директор НВТ "Інфотех" Гурєєв В.О.**, з одного боку, і **представник Ліцензіата Перший заступник – головний диспетчер ДП "НЕК "Укренерго" Ущаповський К.В.**, з другого боку, склали цей акт про те, що відповідно до Додатку №2 та п.1.1. Додатку №3 до Ліцензійного договору №0112-2006/29/01-07 від 06 лютого 2007 р. Ліцензіар передав, а Ліцензіат прийняв:

1. Комплект дистрибутивів ліцензійного програмного забезпечення (ПЗ) "Програмний комплекс "Бланки перемикань" (ПК БП)" в 14 (чотирнадцяти) примірниках.
2. Комплект технічної документації до ліцензійного ПЗ "Програмний комплекс "Бланки перемикань" (ПК БП)" у друкованому вигляді у складі:

2.1. Інструкція по експлуатації програмного комплексу "Бланки перемикань". Ліцензія №0112-2006/29/01-07. – 14 (чотирнадцять) прим.;

2.2. Інструкція по настроюванню і підготовці до роботи програмного комплексу "Бланки перемикань" (для адміністратора комплексу). Ліцензія №0112-2006/29/01-07. – 14 (чотирнадцять) прим.;

2.3. Інструкція по користуванню конвертором RTFtoPP (для адміністратора комплексу). Ліцензія №0112-2006/29/01-07. – 14 (чотирнадцять) прим.

Загальна вартість генеральної ліцензії на використання ПЗ "Програмний комплекс "Бланки перемикань" (ПК БП)" згідно з п. 2.1. Додатку №3 до Ліцензійного договору №0112-2006/29/01-07 від 06 лютого 2007 р. складає **549500,00 (П'ятсот сорок дев'ять тисяч п'ятсот гривень 00 коп.)**, плюс податок на додану вартість (20%) у розмірі **109900,00 (Сто дев'ять тисяч дев'ятсот гривень 00 коп.).**

Сума сплаченого паушального платежу склала **549500,00 (П'ятсот сорок дев'ять тисяч п'ятсот гривень 00 коп.)**, плюс податок на додану вартість (20%) у розмірі **109900,00 (Сто дев'ять тисяч дев'ятсот гривень 00 коп.)**. Всього: **659400,00 (Шістсот п'ятдесят дев'ять тисяч чотириста гривень 00 коп.).**

За винятком суми сплаченого паушального платежу належить до перерахування:

не належить
(сума прописом)

Сторони одна до одної претензії не мають.

Від Ліцензіара:	Від Ліцензіата:
_____ Гурєєв В.О.,	_____ Ущаповський К.В.,
Генеральний директор НВТ "Інфотех"	Перший заступник - головний диспетчер ДП "НЕК "Укренерго"
М.П.	М.П.

Найменування ПІДРЯДНИКА:	Найменування ЗАМОВНИКА:
НВТ "Інфотех", ЄДРПОУ 03001744, Адреса: 04080, м. Київ-80, вул. Фрунзе, 85; р/р №26008301242143 у Київському міс. від. ПІБ м. Києва, МФО 322250	ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго", ЄДРПОУ 02071375, Адреса: 21029, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 10-й км; р/р №260063014111 у Центральному від. ПІБ м. Вінниця, МФО 302571

А К Т № 02-23/10/2006
здачі-приймання робіт за договором №23/10/2006-121
від 13 листопада 2006 р.

"Проектування і реконструкція для ВСО "Вінницяелектротехнологія" базового комплекту програмного режимного тренажеру оперативного персоналу (ПРТ ОП) енергосистем України"

2-ий етап робіт згідно додатку №2 до договору: "Проектування і реконструкція для ВСО "Вінницяелектротехнологія" базового комплекту програмного режимного тренажеру оперативного персоналу (ПРТ ОП) рівня обленерго ("Треноблленерго").

(найменування виконаних робіт)

м. Київ "12" лютого 2007 р.

Ми, що підписалися нижче, **представник Підрядника генеральний директор НВТ "Інфотех" Гурєєв В.О.**, з одного боку, і **представник Замовника директор ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго" Кардаш І.І.**, з другого боку, склали цей акт про те, що результати робіт, що здаються Підрядником і приймаються Замовником, задовольняють умовам договору №23/10/2006-121 від 13.11.2006 р. (надалі – Договір), належним чином виконані та оформлені.

Стислий опис робіт, що здаються (приймаються):

1. Виконані проектування і реконструкція для ВСО "Вінницяелектротехнологія" базового комплекту програмного режимного тренажеру оперативного персоналу (ПРТ ОП) рівня обленерго ("Треноблленерго").
2. Відповідно до п.6.3. Договору Замовнику надані у надрукованому вигляді та магнітних носіях проект і базовий комплект ПРТ ОП рівня обленерго ("Треноблленерго") в 02 (двох) примірниках.
3. ПРТ ОП встановлений на всіх робочих станціях, пред'явлених Замовником на момент здачі-приймання робіт.

Вартість робіт 2-го етапу згідно додатку №2 до договору №23/10/2006-121 від 13.11.2006 р. складає **Сорок одну тисячу сімсот (41700) гривень 00 коп.**, плюс ПДВ (20%) у розмірі **Вісім тисяч триста сорок (8340) гривень 00 коп.**

Загальна сума складає **П'ятдесят тисяч сорок (50040) гривень 00 коп.**

Підлягає до перерахування **П'ятдесят тисяч сорок (50040) гривень 00 коп.**, включаючи ПДВ (20%) у розмірі **Вісім тисяч триста сорок (8340) гривень 00 коп.**

Дійсний акт є підставою для проведення взаємних розрахунків і платежів між Підрядником і Замовником.

Від Підрядника:

_____ **Гурєєв В.О.,**
Генеральний директор
НВТ "Інфотех"

М.П.

Від Замовника:

_____ **Кардаш І.І.,**
Директор ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго"

М.П.

Найменування ЛІЦЕНЗІАРА:	Найменування ЛІЦЕНЗІАТА:
НВТ "Інфотех", ЄДРПОУ 03001744; Адреса: 04080, м. Київ-80, вул. Фрунзе, 85; п/р №26008301242143 у Київському міс. від. ПІБ м. Києва, МФО 322250	Західна ЕС ДП "НЕК "Укренерго", ЄДРПОУ 20851817; Адреса: 79011, м. Львів, вул. Свєнціцького, 2; п/р 26008302411813 у філії "Львівське центральне від. ПІБ" м. Львова, МФО 325633

А К Т №01/0109-2006
прийому-передачі дистрибутивів і технічної документації ліцензійного програмного забезпечення "Програмний тренажерний комплекс оперативних перемикань (ПТК ОП)"
за Ліцензійним договором №0109-2006 А/П-06-976 від 12 грудня 2006 р.

м. Львів "29" січня 2007 р.

Ми, що підписалися нижче, **представник Ліцензіара генеральний директор НВТ "Інфотех" Гурєєв В.О.**, з одного боку, і **представник Ліцензіата директор Західної ЕС ДП "НЕК "Укренерго" Сенус О.З.**, з другого боку, склали цей акт про те, що відповідно до п.1.1. додатку №2 до Ліцензійного договору №0109-2006 А/П-06-976 від 12 грудня 2006 р. Ліцензіар передав, а Ліцензіат прийняв:

1. Комплект дистрибутивів ліцензійного програмного забезпечення (ПЗ) "Програмний тренажерний комплекс оперативних перемикань (ПТК ОП)" в 02 (двох) примірниках.
2. Комплект технічної документації до ліцензійного ПЗ "Програмний тренажерний комплекс оперативних перемикань (ПТК ОП)" у друкованому вигляді у складі:

2.1. Програмний тренажерний комплекс оперативних перемикань (ПТК ОП) для створення і проведення протиаварійних тренувань.
Посібник користувача.
Західна електроенергетична система ДП "НЕК "Укренерго".
Ліцензія №0109-2006. – 02 (два) прим.;

2.2. Програмний тренажерний комплекс оперативних перемикань (ПТК ОП) для створення і проведення протиаварійних тренувань.
Посібник по створенню протиаварійних тренувань.
Західна електроенергетична система ДП "НЕК "Укренерго".
Ліцензія №0109-2006. – 02 (два) прим.

Загальна вартість генеральної ліцензії на використання ПЗ "Програмний тренажерний комплекс оперативних перемикань (ПТК ОП)" згідно з п. 2.1. додатку №2 до Ліцензійного договору №0109-2006 А/П-06-976 від 12 грудня 2006 р. складає **115000,00 (Сто п'ятнадцять тисяч гривень 00 коп.)**, плюс податок на додану вартість (20%) у розмірі **23000,00 (Двадцять три тисячі гривень 00 коп.).**

Сума первісного паушального платежу склала **57500,00 (П'ятдесят сім тисяч п'ятсот гривень 00 коп.)**, плюс ПДВ (20%) у розмірі **11500,00 (Одинадцять тисяч п'ятсот гривень 00 коп.).**

За винятком суми первісного паушального платежу належить до перерахування **57500,00 (П'ятдесят сім тисяч п'ятсот гривень 00 коп.)**, плюс ПДВ (20%) у розмірі **11500,00 (Одинадцять тисяч п'ятсот гривень 00 коп.).**

Всього: **69000,00 (Шістдесят дев'ять тисяч гривень 00 коп.).**

Від Ліцензіара:	Від Ліцензіата:
Гурєєв В.О., Генеральний директор НВТ "Інфотех"	Сенус О.З. Директор Західної ЕС ДП "НЕК "Укренерго"
М.П.	М.П.

Найменування ЛІЦЕНЗІАРА:	Найменування ЛІЦЕНЗІАТА:
НВТ "Інфотех", ЄДРПОУ 03001744; Адреса: 04080, м. Київ-80, вул. Фрунзе, 85; п/р №26008301242143 у Київському міс. від. ПІБ м. Києва, МФО 322250	Північна ЕС ДП "НЕК "Укренерго", ЄДРПОУ 00131624; Адреса: 61003, м. Харків, вул. Кооперативна, 12, п/р 260082257 в ВАТ "Мегабанк" м. Харкова, МФО 351629

А К Т №01/0107-2006
прийому-передачі дистрибутивів і технічної документації ліцензійного програмного забезпечення "Програмний тренажерний комплекс оперативних перемикань (ПТК ОП)"
за Ліцензійним договором №0107-2006
від "20" 12 .2006 р.

м. Харків "26" 12 2006 р.

Ми, що підписалися нижче, **представник Ліцензіара генеральний директор НВТ "Інфотех" Гурєєв В.О.**, з одного боку, і **представник Ліцензіата директор Північної ЕС ДП "НЕК "Укренерго" Шевченко Г.П.**, з другого боку, склали цей акт про те, що відповідно до п.1.1. додатку №2 до Ліцензійного договору №0107-2006 від "20" 12 2006 р. Ліцензіар передав, а Ліцензіат прийняв:

1. Комплект дистрибутивів ліцензійного програмного забезпечення (ПЗ) "Програмний тренажерний комплекс оперативних перемикань (ПТК ОП)" у 02 (двох) примірниках.
2. Комплект технічної документації до ліцензійного ПЗ "Програмний тренажерний комплекс оперативних перемикань (ПТК ОП)" у друкованому вигляді у складі:

2.1. Посібник користувача "Програмний тренажерний комплекс оперативних перемикань (ПТК ОП) для створення і проведення протиаварійних тренувань в ПЕС ДП "НЕК "Укренерго". – 02 (два) прим.;

2.2. Посібник користувача. Створення протиаварійних тренувань. Версія 1.10. "Програмний тренажерний комплекс оперативних перемикань (ПТК ОП) для створення і проведення протиаварійних тренувань в ПЕС ДП "НЕК "Укренерго". – 02 (два) прим.

Загальна вартість генеральної ліцензії на використання ПЗ "Програмний тренажерний комплекс оперативних перемикань (ПТК ОП)" згідно з п. 2.1. додатку №2 до Ліцензійного договору №0107-2006 від "20" 12 2006 р. складає **90000,00 (Дев'яносто тисяч гривень 00 коп.)**, плюс податок на додану вартість (20%) у розмірі **18000,00 (Вісімнадцять тисяч гривень 00 коп.)**.

Сума первісного паушального платежу склала **45000,00 (Сорок п'ять тисяч гривень 00 коп.)**, плюс ПДВ (20%) у розмірі **9000,00 (Дев'ять тисяч гривень 00 коп.)**.

За винятком суми первісного паушального платежу належить до перерахування **45000,00 (Сорок п'ять тисяч гривень 00 коп.)**, плюс ПДВ (20%) у розмірі **9000,00 (Дев'ять тисяч гривень 00 коп.)**.

Всього: **54000,00 (П'ятдесят чотири тисячі гривень 00 коп.)**.

Від Ліцензіара:

Гурєєв В.О.,
Генеральний директор
НВТ "Інфотех"

м. Київ • Україна • Науково-виробниче товариство з обмеженою відповідальністю "ІНФОТЕХ" Ідентифікаційний код 03001744

М.П.

Від Ліцензіата:

Шевченко Г.П.,
Директор Північної ЕС
ДП "НЕК "Укренерго"

ЕНЕРГЕТИЧНА СИСТЕМА УКРАЇНИ ... Ідентифікаційний код №00131624 м Харків

М.П.

Найменування ПІДРЯДНИКА:	Найменування ЗАМОВНИКА:
НВТ "Інфотех", ЄДРПОУ 03001744, Адреса: 04080, м. Київ-80, вул. Фрунзе, 85; р/р №26008301242143 у Київському міс. від. ПІБ м. Києва, МФО 322250	ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго", ЄДРПОУ 02071375, Адреса: 21029, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 10-й км; р/р №260063014111 у Центральному від. ПІБ м. Вінниця, МФО 302571

А К Т № 01-23/10/2006
здачі-приймання робіт за договором №23/10/2006-121
від "13" 11 2006 р.

"Проектування і реконструкція для ВСО "Вінницяелектротехнологія" базового комплекту програмного режимного тренажеру оперативного персоналу (ПРТ ОП) енергосистем України"

1-ий етап робіт згідно додатку №2 до договору: "Проектування і реконструкція для ВСО "Вінницяелектротехнологія" базового комплекту програмного режимного тренажеру оперативного персоналу (ПРТ ОП) рівня енергосистеми ("Трененерго").

(найменування виконаних робіт)

м. Київ "25" 12 2006 р.

Ми, що підписалися нижче, **представник Підрядника генеральний директор НВТ "Інфотех" Гурєєв В.О.**, з одного боку, і **представник Замовника директор ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго" Кардаш І.І.**, з другого боку, склали цей акт про те, що результати робіт, що здаються Підрядником і приймаються Замовником, задовольняють умовам договору №23/10/2006-121 від "13" 11 2006 р. (надалі – Договір), належним чином виконані та оформлені.

Стислий опис робіт, що здаються (приймаються):

1. Виконані проектування і реконструкція для ВСО "Вінницяелектротехнологія" базового комплекту програмного режимного тренажеру оперативного персоналу (ПРТ ОП) рівня енергосистеми ("Трененерго").
2. Відповідно до п.6.3. Договору Замовнику надані у надрукованому вигляді та магнітних носіях проект і базовий комплект ПРТ ОП рівня енергосистеми ("Трененерго") в 02 (двох) примірниках.
3. ПРТ ОП встановлений на всіх робочих станціях, пред'явлених Замовником на момент здачі-приймання робіт.

Вартість робіт 1-го етапу згідно додатку №2 до договору №23/10/2006-121від "13" 11 2006р. складає **Сто п'ятдесят вісім тисяч триста (158300) гривень 00 коп.**, плюс ПДВ (20%) у розмірі **Тридцять одна тисяча шістсот шістдесят (31660) гривень 00 коп.**

Загальна сума складає **Сто вісімдесят дев'ять тисяч дев'ятсот шістдесят (189960) гривень 00 коп.**

Підлягає до перерахування **Сто вісімдесят дев'ять тисяч дев'ятсот шістдесят (189960) гривень 00 коп.**, включаючи ПДВ (20%) у розмірі **Тридцять одна тисяча шістсот шістдесят (31660) гривень 00 коп.**

Дійсний акт є підставою для проведення взаємних розрахунків і платежів між Підрядником і Замовником.

Від Підрядника:	Від Замовника:
_____ Гурєєв В.О., Генеральний директор НВТ "Інфотех" М.П.	_____ Кардаш І.І., Директор ВСО "Вінницяелектротехнологія" ДП "НЕК "Укренерго" М.П.

Наименование ИСПОЛНИТЕЛЯ: НПО "Инфотех"
ЕГРПОУ 03001744
Адрес: 04080, г. Киев-80, ул. Фрунзе, 85;
т/с №26008301242143 в Киевском городском отделении ПИБ г. Киева,
МФО 322250

Наименование ЗАКАЗЧИКА: Крымская ЭС ГП "НЭК "Укрэнерго"
ЕГРПОУ 23451484
Адрес: 95034, АР Крым, г. Симферополь,
ул. Киевская, 74/6;
т/с № 26002301322036 в КЦО ПИБ г. Симферополя,
МФО 324430

А К Т № 01/09-2006
о предоставлении услуг по договору №405/16 от 15 августа 2006 г.

"Проведение занятий в Учебно-тренировочном центре (УТЦ) Крымской ЭС в соответствии с утвержденным ГП "НЭК "Укрэнерго" планом повышения квалификации персонала НЭК "Укрэнерго" на 2006 год по курсу "Тренажерная подготовка оперативного и оперативно-производственного персонала МЭС и ПС"
(наименование оказанных услуг)

составлен 04 сентября 2006 г.

Мы, нижеподписавшиеся, **представитель Исполнителя, генеральный директор НПО "Инфотех" Гуреев В.А.**, с одной стороны, и **представитель Заказчика, и.о. директора Крымской ЭС ГП "НЭК "Укрэнерго" Шурыгин В.П.**, с другой стороны, составили настоящий акт о том, что преподавательским составом Исполнителя в июле-августе 2006 года Заказчику предоставлены услуги по проведению занятий с группами повышения квалификации диспетчеров ЭС в соответствии с договором №405/16 от 15.08.2006 (далее – Договор).

В затраты Исполнителя, подлежащие компенсации, согласно прилагаемому к Договору расчету входят:

1.	Транспортные расходы (проезд)	1260,00 грн.
2.	Суточные	1050,00 грн.
3.	Почасовая оплата (акад. часы, индивид. и групп. консультации)	4622,40 грн.
4.	Отчисления в фонды	1701,04 грн.
5.	Учебно-методические материалы для всех слушателей курса	7200,00 грн.
6.	Общепроизводственные расходы Исполнителя (25%)	3380,86грн.
7.	НДС (20%)	3842,86 грн.
	Итого:	**23057,16** грн.

Проведенные преподавателями Исполнителя занятия соответствуют утвержденному плану обучения персонала ГП "НЭК "Укрэнерго" в УТЦ Крымской ЭС на 2006 год. Замечаний по ведению занятий нет.

Полная стоимость предоставленных услуг составляет **23057 (двадцать три тысячи пятьдесят семь) гривен 16 копеек**, включая НДС (20%) в размере **3842 (три тысячи восемьсот сорок две) гривни 86 копеек.**

Следует к перечислению **23057 (двадцать три тысячи пятьдесят семь) гривен 16 копеек**, включая НДС (20%) в размере **3842 (три тысячи восемьсот сорок две) гривни 86 копеек.**

От Исполнителя:
Гуреев В.А.,
Генеральный директор
НПО "Инфотех"

М.П.

От Заказчика:
Гарбер И.М.,
Зам. директора по оперативно-технологическому управлению,
главный диспетчер Крымской ЭС
ГП "НЭК "Укрэнерго"

М.П.

Найменування ПІДРЯДНИКА:	Найменування ЗАМОВНИКА:
НВТ «Інфотех», ЄДРПОУ 03001744; Адреса: 04080, м. Київ-80, вул. Фрунзе, 85; п/р №26008301242143 у Київському міс. від. ПІБ м. Києва, МФО 322250	Дніпровська ЕС ДП «НЕК «Укренерго», ЄДРПОУ 20517231; Адреса: 69096, м. Запоріжжя, вул. Гребельна, 2; п/р №26007301155559 в ЗЦВ ПІБ м. Запоріжжя, МФО 313355

А К Т №01 /274-06
здачі-прийомки робіт за договором підряду №06/02/2006/123
від 16.03.2006 р.

«Поставка і об'єктна адаптація програмного тренажерного комплексу оперативних перемикань (далі – ПТК ОП) для 21 (двадцяти однієї) електричної підстанції (ПС) ДнЕС».

Етап №1. Поставка та об'єктна адаптація для ПС «Південна-330», ПС «Рудна-330», ПС «Горна-330», ПС «Кіровська-330», ПС «Першотравнева-330», ПС «Ферросплавна-330», ПС «Нікопольська-330», ПС «Дніпровська-750», ПС «Прометей-330», ПС «ВДГМК-330», ПС «ПВЛ-330», ПС «Дніпровська-330», ПС «ДДЗ-330».
(найменування виконаних робіт)

м. Запоріжжя «26» 07 2006 р.

Ми, що підписалися нижче, **представник Підрядника генеральний директор НВТ «Інфотех» Гуреєв В.О.**, з одного боку, і **представник Замовника директор Дніпровської ЕС ДП «НЕК «Укренерго» Вишневський Ю.М.**, з другого боку, склали цей акт про те, що результати робіт, що здаються Підрядником і приймаються Замовником, задовольняють умовам договору №06/02/2006/123 від 16.03.2006р., належним чином виконані та оформлені.

Стислий опис робіт, що здаються (приймаються):

1. Проведена поставка і об'єктна адаптація програмного тренажерного комплексу оперативних перемикань (ПТК ОП) для 13 (тринадцяти) електричних ПС ДнЕС ДП «НЕК «Укренерго», адаптованого до реальних умов його функціонування на ПС «Південна-330», ПС «Рудна-330», ПС «Горна-330», ПС «Кіровська-330», ПС «Першотравнева-330», ПС «Ферросплавна-330», ПС «Нікопольська-330», ПС «Дніпровська-750», ПС «Прометей-330», ПС «ВДГМК-330», ПС «ПВЛ-330», ПС «Дніпровська-330», ПС «ДДЗ-330» в наступному обсязі:
   а) тренування по бланкам перемикань (введення, виведення обладнання) – загалом 260 (двісті шістдесят) тренувань;
   б) протиаварійні тренування – загалом 65 (шістдесят п'ять) тренувань.
2. ПТК ОП встановлені на всіх робочих станціях, пред'явлених Замовником на момент постачання. Комплекси залишені у робочому стані для подальшого освоєння і експлуатації за призначенням.
3. Проведено навчання фахівців ДнЕС ДП «НЕК «Укренерго» навичкам створення протиаварійних тренувань з використанням ПТК ОП.

4. З метою забезпечення можливостей подальшої установки і запуску ПТК ОП на енергооб'єктах силами фахівців ДнЕС Замовнику передані робочі та резервні (сейфові) екземпляри ПТК ОП на магнітних носіях.
5. Розроблений і переданий у друкованому вигляді комплект експлуатаційної документації у складі:

5.1. Програма навчання оперативно-диспетчерського персоналу Дніпровської ЕС ДП «НЕК «Укренерго» засобам роботи з ПТК ОП для розробки і проведення протиаварійних тренувань на 4 стор. – 13 екз.;

5.2. Посібник користувача «Програмний тренажерний комплекс оперативних перемикань (ПТК ОП) для створення і проведення протиаварійних тренувань в Дніпровської ЕС ДП «НЕК «Укренерго» на 68 стор. – 13 екз.;

5.3. Посібник користувача. Створення протиаварійних тренувань. Версія 1.10. «Програмний тренажерний комплекс оперативних перемикань» (ПТК ОП) для створення і проведення протиаварійних тренувань в Дніпровської ЕС ДП «НЕК «Укренерго» на 98 стор. – 13 екз.

Вартість робіт за етапом №1 згідно з додатком №2 до договору №06/02/2006/123 від 16.03.2006 складає **П'ятдесят п'ять тисяч сімсот шістнадцять (55716) гривень 67 коп.**, плюс ПДВ (20%) у розмірі **Одинадцять тисяч сто сорок три (11143) гривні 33 коп.**

Сума попередньої оплати складає **Двадцять сім тисяч вісімсот п'ятдесят вісім (27858) гривень 33 коп.**, плюс ПДВ (20%) у розмірі **П'ять тисяч п'ятсот сімдесят одна (5571) гривня 67 коп.**

За винятком попередньої оплати належить до перерахування **Двадцять сім тисяч вісімсот п'ятдесят вісім (27858) гривень 33 коп.**, плюс ПДВ (20%) у розмірі **П'ять тисяч п'ятсот сімдесят одна (5571) гривня 67 коп.**

Всього: **Тридцять три тисячі чотириста тридцять (33430) гривень 00 коп.**

Від Підрядника:

Гурєєв В.О.,
Генеральний директор
НВТ «Інфотех»

М.П.

Від Замовника:

Вишневський Ю.М.,
Директор Дніпровської ЕС
ДП «НЕК «Укренерго»

М.П.

Найменування ПІДРЯДНИКА:	Найменування ЗАМОВНИКА:
НВТ «Інфотех», ЄДРПОУ 03001744; Адреса: 04080, м. Київ-80, вул. Фрунзе, 85; п/р №26008301242143 у Київському міс. від. ПІБ м. Києва, МФО 322250.	Південна ЕС ДП «НЕК «Укренерго», ЄДРПОУ 23208938; Адреса: 65029, м. Одеса, вул. Коблівська, 11; п/р №26001301456146 в ОЦВ ПІБ, МФО 328135

А К Т №01/06
здачі-прийомки робіт за договором підряду №33
від 30.01.2006 р.

«Установка, налагодження, об'єктна адаптація тренажерного комплексу оперативних перемикань для Південної ЕС ДП «НЕК «Укренерго».
(найменування виконаних робіт)

м. Одеса «6» липня 2006 р.

Ми, що підписалися нижче, **представник Підрядника генеральний директор НВТ «Інфотех» Гурєєв В.О.**, з одного боку, і **представник Замовника директор Південної ЕС ДП «НЕК «Укренерго» Грабовецький В.М.**, з другого боку, склали цей акт про те, що результати робіт, що здаються Підрядником і приймаються Замовником, задовольняють умовам договору №33 від 30.01.2006р., належним чином виконані та оформлені.

Стислий опис робіт, що здаються (приймаються):

1. Проведена установка, налагодження і об'єктна адаптація тренажерного комплексу оперативних перемикань (ТК ОП) в ЦДС, ОМЕМ, НМЕМ і ХМЕМ Південної ЕС ДП «НЕК «Укренерго», адаптованого до реальних умов його функціонування на об'єктах упровадження.
2. ТК ОП встановлений на всіх робочих станціях, пред'явлених Замовником на момент постачання. Комплекси залишені у робочому стані для подальшого освоєння і експлуатації за призначенням.
3. Продемонстровані і передані Замовнику штатні протиаварійні тренування по виводу в ремонт і уведенню в роботу обладнання по заданої тематиці.
4. Проведено навчання 8 (восьми) фахівців ЦДС, ОМЕМ, НМЕМ і ХМЕМ Південної ЕС ДП «НЕК «Укренерго» навичкам створення протиаварійних тренувань з використанням ТК ОП.
5. З метою забезпечення можливостей подальшої установки і запуску ТК ОП на енергооб'єктах силами фахівців Південної ЕС Замовнику передані робочі та резервні (сейфові) екземпляри ТК ОП на магнітних носіях.
6. Розроблений і переданий у друкованому вигляді комплект експлуатаційної документації у складі:

6.1. Програма навчання оперативно-диспетчерського персоналу Південної ЕС ДП «НЕК «Укренерго» засобам роботи з ТК ОП для розробки і проведення протиаварійних тренувань на 4 стор. – 4 екз.;

6.2. Посібник користувача «Тренажерний комплекс оперативних перемикань (ТК ОП) для створення і проведення протиаварійних тренувань в Південної ЕС ДП «НЕК «Укренерго» на 68 стор. – 4 екз.;

6.3. Посібник користувача. Створення протиаварійних тренувань. Версія 1.10. «Тренажерний комплекс оперативних перемикань» (ТК ОП) для створення і проведення протиаварійних тренувань в Південної ЕС ДП «НЕК «Укренерго» на 98 стор. – 4 екз.

Вартість робіт згідно з додатком №2 до договору №33 від 30.01.2006 складає **Дев'яносто тисяч тридцять вісім (90038) гривень 00 коп.**, плюс ПДВ (20%) у розмірі **Вісімнадцять тисяч вісім (18008) гривень 00 коп.**

Сума попередньої оплати складає **Сорок п'ять тисяч дев'ятнадцять (45019) гривень 00 коп.**, плюс ПДВ (20%) у розмірі **Дев'ять тисяч чотири (9004) гривні 00 коп.**

За винятком попередньої оплати належить до перерахування **Сорок п'ять тисяч дев'ятнадцять (45019) гривень 00 коп.**, плюс ПДВ (20%) у розмірі **Дев'ять тисяч чотири (9004) гривні 00 коп.**

Всього: **П'ятдесят чотири тисячі двадцять три (54023) гривні 00 коп.**

Від Підрядника:

_____ **Гурєєв В.О.,**

Генеральний директор
НВТ «Іфотех»

М.П.

Від Замовника:

_____ **Грабовецький В.М.,**

Директор Південної ЕС
ДП «НЕК «Укренерго»

М.П.

Найменування ПІДРЯДНИКА:	Найменування ЗАМОВНИКА:
НВТ «Інфотех», ЄДРПОУ 03001744, Адреса: 04080, м. Київ-80, вул. Фрунзе, 85; р/р №26008301242143 у Київському міс. від. ПІБ м. Києва, МФО 322250	ВСО «Вінницяелектротехнологія» ДП «НЕК «Укренерго», ЄДРПОУ 02071375, Адреса: 21029, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 10-й км; р/р №260063014111 у Центральному від. ПІБ м. Вінниця, МФО 302571

А К Т № 05
здачі-приймки робіт за договором №01/03/2006-56
від 13 березня 2006 р.

«Розробка і постачання для ВСО «Вінницяелектротехнологія» комплектів бланків оперативних перемикань (БОП) в електричних мережах електроенергетичних систем України»
5-ий етап робіт згідно додатку №2 до договору: «Розробка і постачання комплекту БОП для ВСО «Вінницяелектротехнологія», Північна ЕС».

(найменування виконаних робіт)

м. Київ « 07 » червня 2006 р.

Ми, що підписалися нижче, **представник Підрядника генеральний директор НВТ «Інфотех» Гурєєв В.О.**, з одного боку, і **представник Замовника директор ВСО «Вінницяелектротехнологія» ДП «НЕК «Укренерго» Кардаш І.І.**, з другого боку, склали цей акт про те, що результати робіт, що здаються Підрядником і приймаються Замовником, задовольняють умовам договору №01/03/2006-56 від 13 березня 2006 р., належним чином виконані та оформлені.

Комплект БОП встановлений на всіх робочих станціях, пред'явлених Замовником на момент постачання.

З метою забезпечення можливостей резервного копіювання силами спеціалістів ВСО «Вінницяелектротехнологія» при заміні робочих станцій на нові Замовнику передані робочі та резервні (сейфові) екземпляри комплекту БОП на магнітних носіях.

Вартість робіт 5-го етапу згідно додатку №2 до договору №01/03/2006-56 від 13 березня 2006 р. складає **п'ятнадцять тисяч (15000) гривень 00 коп.**, плюс ПДВ (20%) у розмірі **три тисячі (3000) гривень 00 коп.**

Загальна сума складає **вісімнадцять тисяч (18000) гривень 00 коп.**

Підлягає до перерахування **вісімнадцять тисяч (18000) гривень 00 коп.**, включаючи ПДВ (20%) у розмірі **три тисячі (3000) гривень 00 коп.**

Дійсний акт є підставою для проведення взаємних розрахунків і платежів між Підрядником і Замовником.

Від Підрядника:	Від Замовника:
_____ Гурєєв В.О., Генеральний директор НВТ «Інфотех»	_____ Кардаш І.І., Директор ВСО «Вінницяелектротехнологія» ДП «НЕК «Укренерго»
М.П.	М.П.

Найменування ПІДРЯДНИКА:	Найменування ЗАМОВНИКА:
НВТ «Інфотех», ЄДРПОУ 03001744, Адреса: 04080, м. Київ-80, вул. Фрунзе, 85; р/р №26008301242143 у Київському міс. від. ПІБ м. Києва, МФО 322250	ВСО «Вінницяелектротехнологія» ДП «НЕК «Укренерго», ЄДРПОУ 02071375, Адреса: 21029, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 10-й км; р/р №260063014111 у Центральному від. ПІБ м. Вінниця, МФО 302571

А К Т № 06
здачі-прийомки робіт за договором №01/03/2006-56
від 13 березня 2006 р.

«Розробка і постачання для ВСО «Вінницяелектротехнологія» комплектів бланків оперативних перемикань (БОП) в електричних мережах електроенергетичних систем України»
6-ий етап робіт згідно додатку №2 до договору: «Розробка і постачання комплекту БОП для ВСО «Вінницяелектротехнологія», Донбаська ЕС».

(найменування виконаних робіт)

м. Київ « 08 » червня 2006 р.

Ми, що підписалися нижче, **представник Підрядника генеральний директор НВТ «Інфотех» Гурєєв В.О.**, з одного боку, і **представник Замовника директор ВСО «Вінницяелектротехнологія» ДП «НЕК «Укренерго» Кардаш І.І.**, з другого боку, склали цей акт про те, що результати робіт, що здаються Підрядником і приймаються Замовником, задовольняють умовам договору №01/03/2006-56 від 13 березня 2006 р., належним чином виконані та оформлені.

Комплект БОП встановлений на всіх робочих станціях, пред'явлених Замовником на момент постачання.

З метою забезпечення можливостей резервного копіювання силами спеціалістів ВСО «Вінницяелектротехнологія» при заміні робочих станцій на нові Замовнику передані робочі та резервні (сейфові) екземпляри комплекту БОП на магнітних носіях.

Вартість робіт 6-го етапу згідно додатку №2 до договору №01/03/2006-56 від 13 березня 2006 р. складає **п'ятнадцять тисяч (15000) гривень 00 коп.**, плюс ПДВ (20%) у розмірі **три тисячі (3000) гривень 00 коп.**

Загальна сума складає **вісімнадцять тисяч (18000) гривень 00 коп.**

Підлягає до перерахування **вісімнадцять тисяч (18000) гривень 00 коп.**, включаючи ПДВ (20%) у розмірі **три тисячі (3000) гривень 00 коп.**

Дійсний акт є підставою для проведення взаємних розрахунків і платежів між Підрядником і Замовником.

Від Підрядника:	Від Замовника:
_____ Гурєєв В.О., Генеральний директор НВТ «Інфотех» М.П.	_____ Кардаш І.І., Директор ВСО «Вінницяелектротехнологія» ДП «НЕК «Укренерго» М.П.

ДОДАТОК Б. РЕЄСТРАЦІЯ ТА РОБОТА У СИСТЕМІ ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ І ТРЕНАЖУ ПЕРСОНАЛУ НЕК «УКРЕНЕРГО»

Реєстрація та робота в СДНТП ДП"НЕК "Укренерго"

1. Реєстрація користувачів і запис їх на дистанційний курс (ДК).

У системі дистанційного навчання та тренажу персоналу (далі - СДНТП або "система") передбачений наступний порядок реєстрації та запису на певний ДК фахівців підприємств ДП "НЕК "Укренерго", які бажають або яким потрібно підвищити кваліфікацію за тематикою оперативних перемикань в електричних мережах, релейного захисту та автоматики (РЗА) та охорони праці:

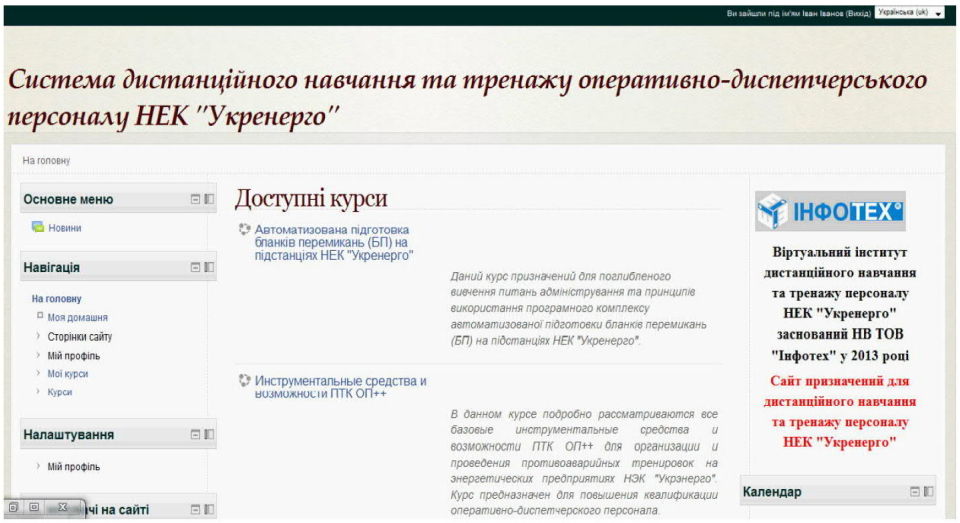
Користувачі підприємств ДП "НЕК "Укренерго" подають заявку письмово до відповідальну за організацію та проведення дистанційного навчання та тренажу персоналу службу підготовки персоналу або до фірми-розробника СДНТП – НВ ТОВ "Інфотех" (viktor.gurieiev@infotec.ua, vag@infotec.ua, elena.avetisyan@infotec.ua). У заявці вказуються реєстраційні дані користувача (ПІБ, посада, контактний телефон, адреса електронної пошти).

Ґрунтуючись на наявному списку бажаючих пройти дистанційне навчання, відповідальні адміністратори або учителя (по відношенню до певного курсу або курсів) створюють у базі даних СДНТП записи про нових користувачів і здійсняють реєстрацію їх у системі. При цьому всі зараховані користувачі отримують повідомлення на вказану у заявці електронну пошту про створення окремого акаунта у СДНТП, доступ до якого забезпечується особистим логіном та паролем.

Порядок реєстрації та запис користувачів на ДК наведено у Додатку №1.

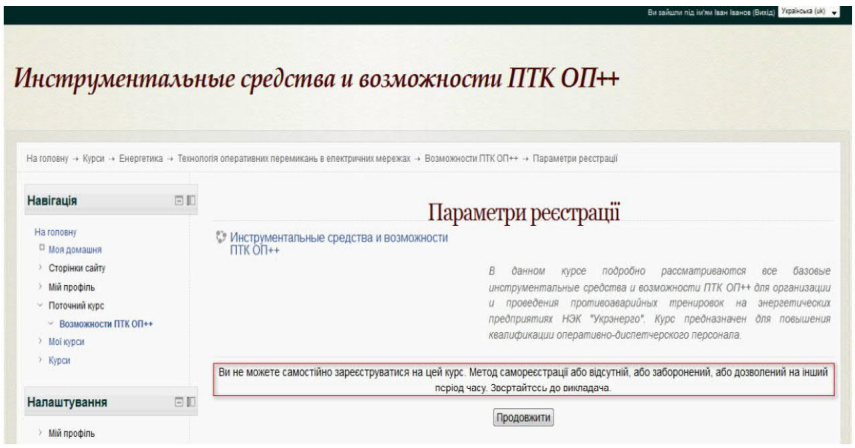
2. Робота користувачів із матеріалами ДК після входу до СДНТП.

Використовуючи свої логін і пароль, користувач, що хоче навчатися, авторизується в системі. На головній сторінці сайту СДНТП відображені всі доступні курси (Мал. 1.):



Мал. 1. Перелік ДК на головній сторінці системи

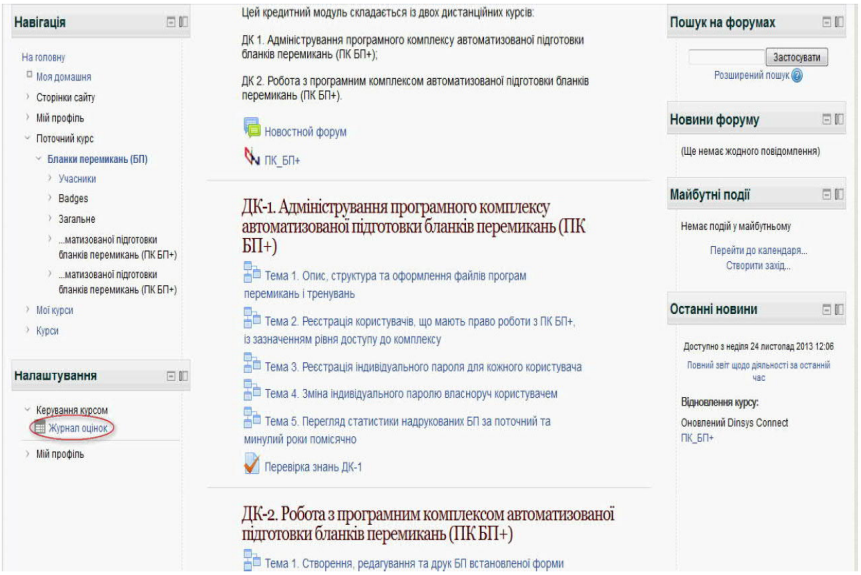
Доступ до інших ДК у користувача є лише в тому разі, якщо він зареєстрований на ці курси (Мал. 2.):



Мал. 2. ДК, на який користувач не зареєстрований

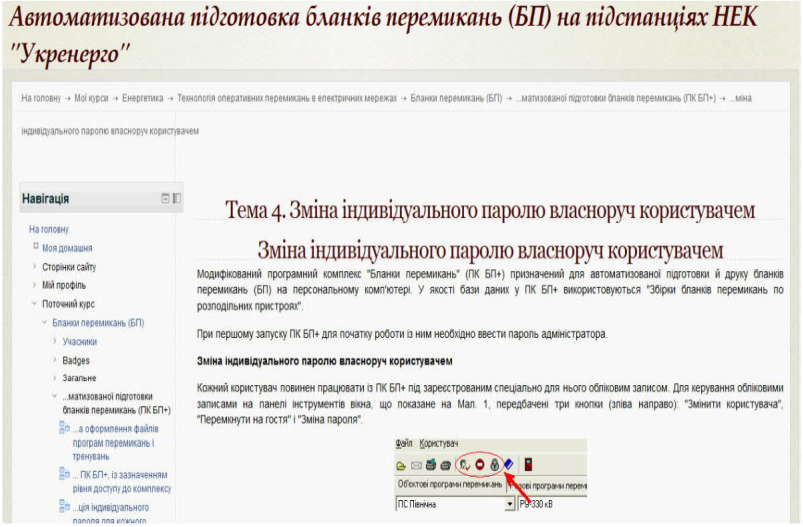
Користувач, у якого є логін і пароль, тобто він записаний на цей ДК, відкриває, наприклад, ДК "Автоматизована підготовка бланків перемикань (БП) на підстанціях НЕК "Укренерго". На сторінці відображається список лекцій, які необхідно пропрацювати. Лекції об'єднані в теми (Мал. 3.).

У бічній панелі знаходиться панель *Налаштування → Керування курсом → Журнал оцінок*. Оскільки цей користувач має тільки роль користувача, в панелі "Керування курсом" доступне тільки посилання на його оцінки.



Мал. 3. ДК "Автоматизована підготовка бланків перемикань (БП)"

Користувач відкриває необхідні лекції та проходить навчання. На Мал. 4. зображений приклад виду лекції: *"Заміна індивідуального паролю власноруч користувачем"*.



Мал. 4. Приклад сторінки з лекцією

Після проходження всіх тем курсу ДК, користувач переходить до перевірки знань. В даному кредитному модулі є два ДК:

ДК 1. Адміністрування програмного комплексу автоматизованої підготовки бланків перемикань (ПК БП+);

ДК 2. Робота з програмним комплексом автоматизованої підготовки бланків перемикань (ПК БП+).

Кожний з цих курсів містить тести, відповідно:

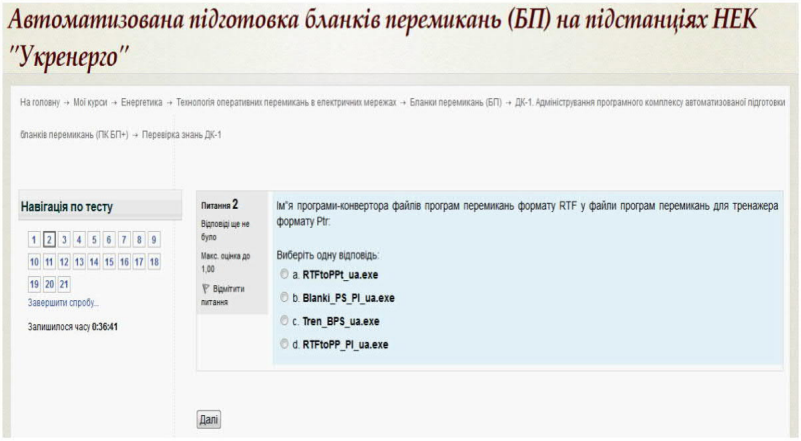
Перевірка знань ДК-1.

Перевірка знань ДК-2.

Нижче представлений процес проходження тесту "Перевірка знань ДК-1".

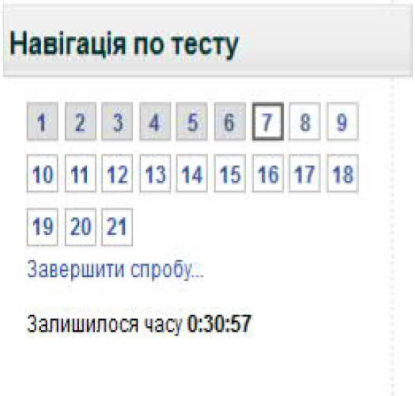
Користувач переходить по посиланню "Перевірка знань ДК-1" і натискає кнопку "Почати тестування".

Інтерфейс користувача при проходженні тесту в СДНТП представлений на Мал. 5. У правій частині екрану розміщена панель навігації, що дозволяє робити швидкий перехід на бажане питання. У лівій - основний - частині екрану відображається поточне питання та варіанти відповіді. Тести "Перевірка знань ДК-1" і "Перевірка знань ДК-2" побудовані за принципом єдиної правильної відповіді на поставлене питання.



Мал. 5. – Інтерфейс користувача при проходженні тестів у СДНТП

Після проходження тесту в панелі навігації питання, на які була дана відповідь, відзначаються сірим кольором (Мал. 6.):



Мал. 6. Панель навігації. Інформація про прогрес

У СДНТП передбачені декілька спроб для проходження тесту. Таким чином, якщо тест має велику кількість питань, є можливість проходити його за декілька підходів у зручніший для користувача час.

Після кожної відповіді інформація про це записується у базу даних, і вчитель може в режимі реального часу переглядати прогрес користувача в проходженні тесту, а також аналізувати його відповіді на питання через інтерфейс СДНТП. Для цього треба скористатися посиланням "Журнал оцінок" на панелі "Керування курсом" (під час завантаженого курсу). Після цього слід перейти до відповідного тесту навпроти користувача в таблиці, зображеній на Мал. 7.

Мал. 7. Звіт про оцінки

Після цього користувач використовує інтерфейс, аналогічний зображеному на Мал. 5., але з можливістю перегляду результатів проходження тесту. На Мал. 8. показаний звіт про результати відповіді користувача на запитання. Червоним кольором виділена неправильна відповідь, а жовтим – правильна.

Мал. 8. Перегляд результату відповіді на запитання

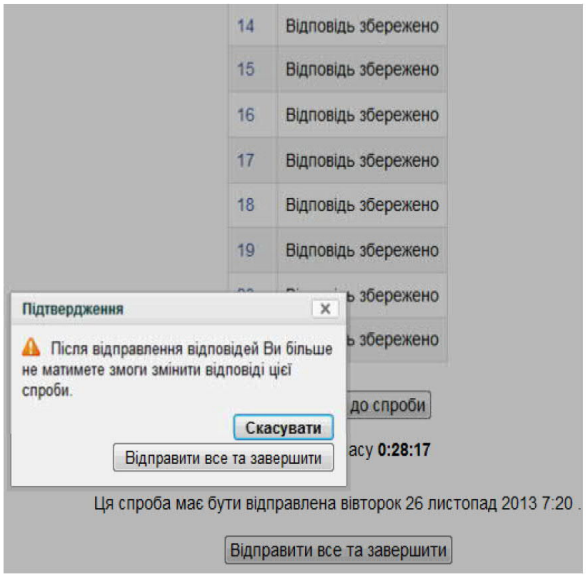
Користувач, який перервав проходження тесту, може продовжити його. Про це інформує вхідна сторінка тесту при повторному зверненні (Мал. 9.):

Мал. 9. Вхідна сторінка тесту при повторному зверненні

Після відповіді на усі поставлені питання виводиться таблиця, яка інформує про те, що відповіді на запитання збережені (Мал. 10.). Якщо відповідь на запитання не була надана, то програма про це попередить повідомленням.

Мал. 10. Результат спроби

Для остаточної відправки результатів необхідно натиснути кнопку "*Відправити все та завершити*" знизу сторінки. При цьому виводиться застережливе вікно (Мал. 11.):



Мал. 11. Застереження при завершенні тесту

Після підтвердження відправки результатів виводяться підсумки проходження тесту (Мал. 12.). У бічній панелі ("Навігація по тесту") виділені запитання, на які дана правильна і неправильна відповідь - відповідно зеленим і червоним кольором.

Мал. 12. Навігація по тесту. Перегляд результатів спроби

Після натиснення на посилання "*Завершити перегляд*" виводиться оцінка з проходження тесту. У нашому випадку користувачем було набрано 9,17 балів з 21, що відповідає оцінці 4,37 з 10.

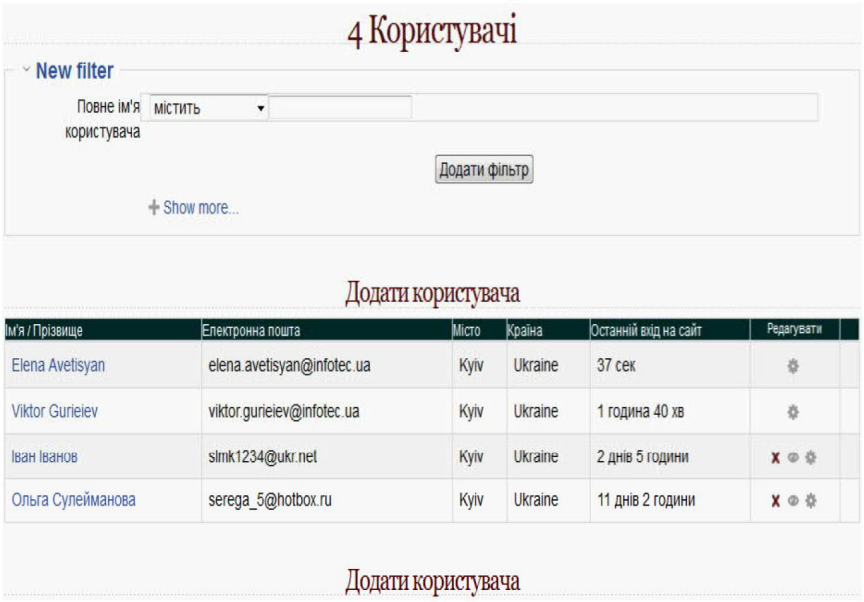
Мал. 13. Кінцевий результат проходження тесту

Додаток №1.

Приклад додавання та реєстрації користувачів у СДНТП

Використовуючи свої логін і пароль, адміністратор або вчитель (у представленому прикладі користувач має обидві ролі) авторизується в системі наступним чином.

У розділі головної сторінки сайту СДНТП *Налаштування* → *Керування сайтом* → *Користувачі* → *Облікові записи* → *Список користувачів* передбачена панель по управлінню існуючими обліковими записами користувачів і додаванню нових (Мал. 1).



Мал. 1. Розділ "Робота зі списком користувачів"

Для додавання нового користувача необхідно використати посилання "Додати користувача". У формі (Мал. 2.), що відкриється, адміністратор вводить реєстраційні дані користувача:

логін;

пароль;

ім’я;

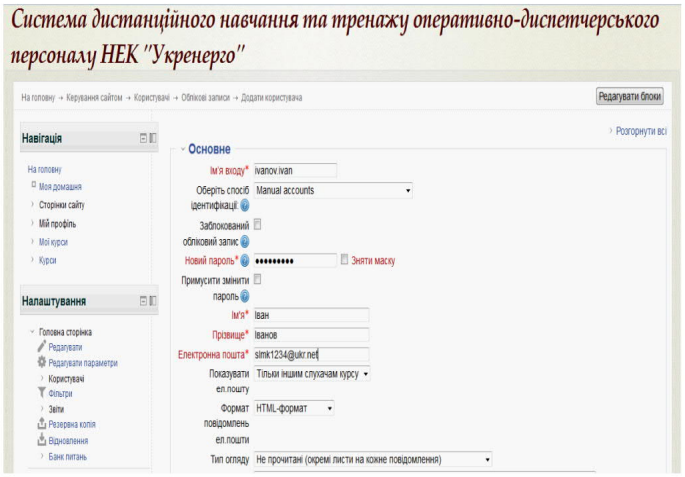
прізвище;

електронна пошта;

місто;

країна;

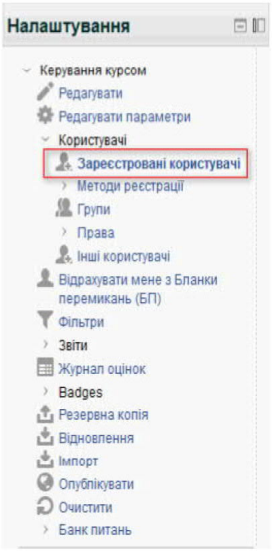
інша інформація, надана полями форми.



Мал. 2. Форма реєстрації нового користувача

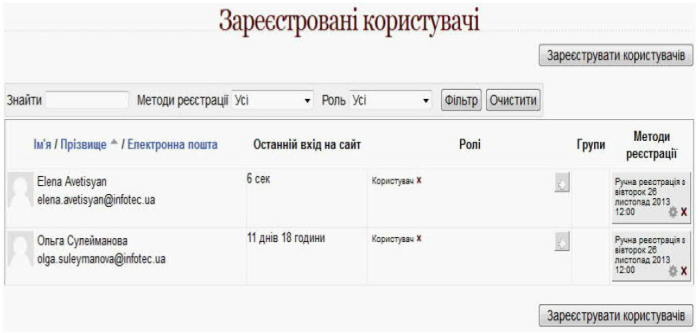
Запис користувача на певний ДК

Для запису на ДК користувачів адміністратор/учитель повинен скористатися панеллю "Керування курсом" (Мал. 3.). Ця панель стає доступною в той час, коли вибраний та завантажений певний курс.



Мал. 3. Панель "Керування курсом" у складі панелі "Налаштування"

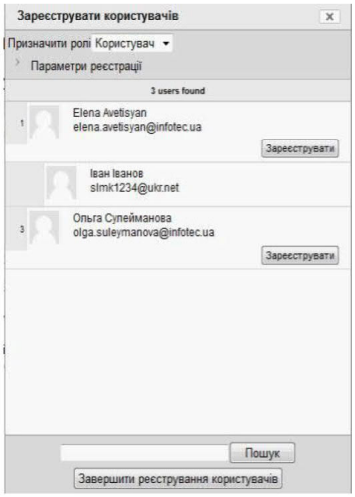
Для запису користувачів на ДК необхідно скористатися посиланням *Користувачі* → *Зареєстровані користувачі*, після чого на сторінці, що відкриється, натиснути кнопку "Зареєструвати користувачів" (Мал. 4.):



Мал. 4. Зареєстровані на ДК користувачі

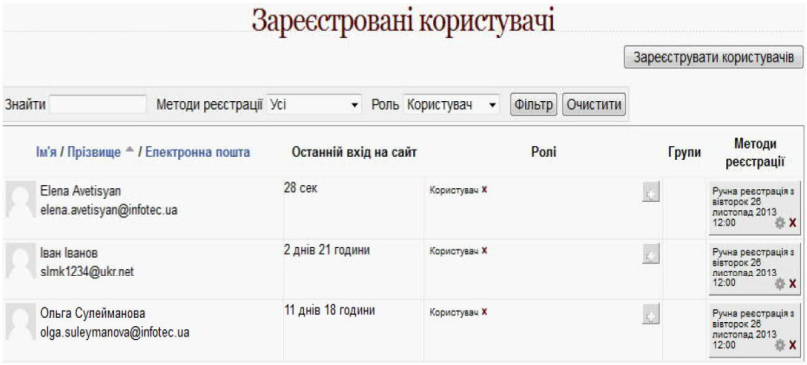
При цьому відкривається вікно зі списком користувачів, жодним чином не прикріплених до курсу (Мал. 5.). У верхній частині вікна є випадний список із ролями, які можна присвоїти вибраним користувачам. За умовчанням вибрана роль "Користувач". У нижній частині вікна відображається сам список.

Адміністратор/учитель вибирає необхідних користувачів і привласнює їм роль "Користувач".



Мал. 5. Вікно запису користувачів на ДК

Після цього оновлений список користувачів стає доступним на сторінці "Зареєстровані користувачі" (Мал. 6.).



Мал. 6. Оновлений список зареєстрованих користувачів

Таким чином, користувач Іван Іванов був записаний на ДК "*Автоматизована підготовка бланків перемикань (БП) на підстанціях НЕК "Укренерго"*. Починаючи з цього моменту Іван Іванов має право почати навчання за тематикою даного курсу.

ДОДАТОК В. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Монографії:

1. Гурєєв В.О. Методи моделювання та засоби побудови і функціонування віртуальних науково-навчальних центрів в енергетиці : монографія / В.О. Гурєєв, О.В. Сангінова, О.В. Аветісян. – К. : ВП «Едельвейс», 2019. – 172 с. – ISBN 978-617-7619-17-7.

2. Комп'ютерне моделювання електроенергетичних об'єднань як нелінійних динамічних систем : монографія / [В. М. Авраменко, О. В. Мартинюк, Н. Т. Юнєєва та ін.]. – К. : ВП «Едельвейс», 2019. – 128 с. – ISBN 978-617-7619-18-4.

3. Systems, Decision and Control in Energy I. Studies in Systems, Decision and Control. / [Babak, V., Isaienko, V., & Zaporozhets, A. (Eds.)]. Springer Nature Switzerland AG, 2020. – 279 с. – ISBN 978-3-030-48582-5. (https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2).

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації у фахових виданнях:

4. Сулейманов В. Н. Оптимизация режимов работы электроэнергетических систем методом экстремального планирования эксперимента / В. Н. Сулейманов, В. А. Гуреев, У. О. Саидов. // Вестн. Киевск. политехн. ин-та. Сер. электроэнергетики. – 1982. – С. 61–64.

5. Цифровые имитационные тренажеры / [В. А. Гуреев, С. В. Колесников, И. В. Пашкова та ін.]. // Известия вузов, Энергетика. – 1989. – №4. – С. 3–9.

6. Колесников С. В. Система противоаварийной диагностики персонала на основе микро ЭВМ / С. В. Колесников, В. А. Гуреев, А. И. Ришкевич. //

Моделирование в тренажерных системах: Сб. науч. тр. АН УССР. – 1990. – С. 50–56.

7. Гуреев В. А. Метод решения систем уравнений для определения режимов работы электрических сетей / В. А. Гуреев, Н. Н. Редковский. // Кибернетика и системный анализ. – 1993. – №2. – С. 3–12 (*фахове видання включене до міжнародної наукометричної бази SCOPUS*).

8. Гуреев В. А. О решении нелинейных уравнений в задачах управления режимами электрических сетей / В. А. Гуреев, Н. Н. Редковский. // Кибернетика и системный анализ. – 1993. – №4. – С. 122–130 (*фахове видання включене до міжнародної наукометричної бази SCOPUS*).

9. Гуреев В. А. О параметрическом методе вычисления характеристик установившегося режима работы электрических сетей / В. А. Гуреев, Н. Н. Редковский. // Кибернетика и системный анализ. – 1994. – №4. – С. 140–146 (*фахове видання включене до міжнародної наукометричної бази SCOPUS*).

10. Гуреев В. А. Метод одновременного вычисления установившихся режимов и минимальных потерь в электрических сетях / В. А. Гуреев, Н. Н. Редковский. // Кибернетика и системный анализ. – 1994. – №6. – С. 145–152 (*фахове видання включене до міжнародної наукометричної бази SCOPUS*).

11. Гуреев В. А. О численном определении установившихся режимов работы электрических сетей / В. А. Гуреев, Н. Н. Редковский. // Электронное моделирование. – 1994. – №4. – С. 59–62.

12. Gureev V.A. On Some Special Features of Numerical Calculation of Steady State Conditions for / V.A. Gureev, N. N. Redkovsii // Electric Power Systems. – 1995. – С. 165–172 (*фахове видання включене до міжнародної наукометричної бази SCOPUS*).

13. Гуреев В. А. О некоторых особенностях численного расчета напряжений при моделировании установившихся режимов электроэнергетических систем / В. А. Гуреев, Н. Н. Редковский. // Электронное моделирование. – 1995. – №1. – С. 92–96.

14. Гуреев В. А. О стратегиях поведения итерационных методов при вырождении якобиана / В. А. Гуреев, Н. Н. Редковский. // Кибернетика и системный анализ. – 1996. – №2. – С. 90–102 (*фахове видання включене до міжнародної наукометричної бази SCOPUS*).

15. Редковский Н. Н. О численном решении нелинейных уравнений / Н. Н. Редковский, В. А. Гурєєв. // Доклады Академии Наук России. – 1995. – №5. – С. 590–592.

16. Redkovsky N. N. Optimization problems and calculation of electrical networks work regimes / N. N. Redkovsky, V. A. Goureev. // Gordon and Breach Science Publishers. – 1997. – С. 139–155 (*фахове видання включене до міжнародної наукометричної бази SCOPUS*).

17. Гуреев В. А. Классификация ошибок диспетчерского персонала и методологические аспекты проектирования сценариев компьютерных противоаварийных тренировок / В. А. Гуреев, В. Н. Сулейманов, Р. Надеран. // Электроника и связь. – 2001. – №12. – С. 57–59.

18. Гуреев В. А. Методы и средства разработки полнофункциональных систем управления электрическими подстанциями / В. А. Гуреев, В. Н. Сулейманов, Р. Надеран. // Технічна електродинаміка, тем. випуск. Проблеми сучасної електротехніки, Част.1 – 2002. – С. 83–89 (*фахове видання включене до міжнародної наукометричної бази SCOPUS*).

19. Аветісян О. В. Розробка та застосування віртуальних ієрархічних структур для моделювання режимів, навчання і тренажу персоналу ОЕС України / О. В. Аветісян, В.О. Гурєєв, О. В. Сангінова. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – №1. – С. 101 – 107.

20. Гуреев В. А. Распределенная среда моделирования режимов в полнофункциональном режимном тренажере (ПОРТ) для энергосистем Украины / В. А. Гуреев, О. В. Сангинова. // Технічна електродинаміка. – 2016. – №5. – С. 67–69 (*фахове видання включене до міжнародної наукометричної бази SCOPUS*).

21. Gurieiev V. Simulation and study of modes for full-scale mode simulator for Ukrainian energy systems // Intelligent Energy and Power Systems (IEPS) IEEE Xplore Digital Library. – 2016. – С. 1–4 (*фахове видання включене до міжнародної наукометричної бази SCOPUS*).

22. Гуреев В. А. Методы и средства компьютерной системы обучения и тренажа (КСОТ) персонала объединенной электроэнергетической системы Украины / В. А. Гуреев, О. В. Сангинова. // Моделювання та інформаційні технології. Збірник наукових праць ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова. – 2016. Вип. 76. – С. 95–99.

23. Гуреев В. А. Принципы организации национальной системы обучения и тренажа персонала объединенной электроэнергетической системы Украины / В. А. Гуреев, В. Д. Самойлов, О. В. Сангинова. // Электронное моделирование. – 2016. – №4. – С. 109–121.

24. Авраменко В. М. Комп'ютерний протиаварійний тренажер диспетчерів об'єднаної енергосистеми України / В. М. Авраменко, Н. Т. Юнєєва, Т. М. Гурєєва, В. О. Гурєєв. // Електроніка та зв'язок. – Т. 22, №4, 2017. – С. 69–74.

25. Гуреев В. А. Построение обучающего дистанционного тренажера для подготовки персонала энергетической отрасли / В. А. Гуреев, О. В. Сангинова. // Праці Інституту електродинаміки НАНУ. – 2017. – С. 52–58.

26. Гурєєв В. О. Концепція освітньої професіональної мережі центрів системи підготовки персоналу департаменту електрифікації та електропостачання ПАТ "Українська залізниця" / В. О. Гурєєв, Ю. Г. Куцан, Л.П. Заікіна. // Моделювання та інформаційні технології. Збірник наукових праць ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова. – 2017. Вип. 81.– С. 52–61.

27. Гурєєв В.О. Розробка алгоритмів і програм швидкодіючих методів розрахунку режимів роботи великих електроенергетичних систем (ЕЕС) і енергооб'єднань (ЕО) для тренажерів // Наукові праці ВНТУ, - 2018, № 1, С. 1-5.

28. Куцан Ю.Г. Моделювання і розробка адаптивної автоматизованої системи конструювання сценаріїв протиаварійних тренувань / Ю.Г. Куцан, В.О. Гурєєв, Є.М. Лисенко // Електронне моделювання. – 2018. – №4. – С. 55–64.

29. Гурєєв В.О. Моделювання великих енергосистем для побудови комп'ютерних розподілених тренажерних систем в енергетиці // Моделювання та інформаційні технології. Збірник наукових праць ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова. – 2018. Вип. 83.– С. 94–105.

30. Куцан Ю.Г. Моделирование и визуализация кибератак в энергетике с использованием компьютерных распределенных тренажерных систем/ Ю.Г. Куцан, В.А. Гуреев, Е.Н. Лысенко, Е.В. Аветисян // Електронне моделювання. – 2019. – №1. – С. 81–92.

31. Куцан Ю.Г. Кіберзагрози в електроенергетичних системах України/ Ю.Г. Куцан, В.О. Гурєєв, Є.М. Лисенко, О.В. Аветісян // Електронне моделювання. – 2019. – №2. – С. 63–80.

32. Гурєєв В.О. Дослідження впливу параметрів прискорення збіжності ітераційних процесів моделювання режимів роботи великих енергосистем/ О.В. Сангінова, Є.М. Лисенко // Збірник наукових праць ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова. – 2019. Вип. 87.– С. 84–94.

Свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір:

33. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 66010 від 13.06.2016р. Комп’ютерна програма "Повнофункціональний режимний веб-тренажер "ПОРТ" (ПОРТ) зареєстрована у у Державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір / Гурєєв В.О.

34 Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №86526 від 04.03.2019р. База даних "Інформаційно-режимна модель об’єднаної енергосистеми України" зареєстрована у Державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір / Гурєєв В.О., Лисенко Є.М., Аветісян О.В.

Праці апробаційного характеру:

35. Гуреев В.А., Редковский Н.Н., Суманенков В.Г. Информационная технология управления сложными распределенными техническими системами. тези доповідей І Українська конференція з автоматичного керування. "Автоматика-94". Київ, 18-23 травня 1994, С. 230-231.

36. Гуреев В. А. Применение распределенных архитектур для систем и средств автоматизации процессов сбора данных и управления в энергетических системах Украины // Труды 3-й Международной научно-технической конференции "Нетрадиционные электромеханические и электрические системы". –Т.3. – Крым, Алушта. – 1997. – С. 903-908.

37. Аветисян Е.В., Гуреев В.А., Сангинова О.В. Разработка и применение виртуальных иерархических структур для моделирования режимов, обучения и тренажа персонала ОЕС Украины // Матеріали ІІІ міжнародної науково-технічної конференції "Оптимальне керування електроустановками". Вінниця, 14-15 жовтня 2015. - С. 4-5.

38. Гурєєв В.О. Розробка алгоритмів і програм швидкодійних методів розрахунку режимів роботи великих електроенергетичних систем (ЕЕС) і енергооб’єднань (ЕО) // Матеріали ІVІ міжнародної науково-технічної конференції "Оптимальне керування електроустановками" - Наукові праці ВНТУ, 2018, № 1 с. 1-5.

39. Gurieiev V., Sanginova O. Simulation and study of modes for full-scale mode simulator for Ukrainian energy systems // 2nd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems IEPS’2016 (June 7-11, 2016), Kyiv, Ukraine, pp. 97-100.

40. Kutsan Y., Gurieiev V. Creating an international virtual energy cluster for radical increase of staff training and skills level // The third Chinese – Ukraine Science and Technology Forum "Theoretical Basis of Simulation Technology in Energy Sector". Harbin, China, 2017, pp. 166-168.

41. Kutsan Y., Gurieiev V. Technology of using of corporate cloudy infrastructure for development of universal simulators for operatively-controller's

personnel of nuclear power plants Ukraine // The Fourth China – Ukraine Forum on Science and Technology. Harbin, China, 2018, pp. 56-57.

42. Гурєєв В.О., Лисенко Є.М. Дослідження збіжності ітераційних методів розрахунку режимів роботи безконтурних електричних мереж // Збірник тез XXXVII науково-технічна конференція молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. – 15 травня 2019 року. – м. Київ. – С. 40-43.

43. Гурєєв В.О. Моделі кібербезпекової компетентності оперативно-диспетчерського персоналу магістральних електромереж України // Збірка праць науково-практичної конференції "Кібербезпека енергетики". – 29 травня – 01 червня 2019 року. – м. Одеса. – С. 15-16.

44. Гурєєв В.О. Веб-орієнтовані технології побудови і організації функціонування тренажерних систем підготовки персоналу енергосистем України // Матеріали науково-практичної конференції «Побудова інформаційного суспільства: ресурси і технології». – 19-20 вересня 2019 року. – м. Київ. – С. 217-220.

45. Гурєєв В.О., Лисенко Є.М. Модельне конструювання електронних ресурсів для навчання та тренажерної підготовки оперативно-диспетчерського персоналу енергосистем України // Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформація, аналіз, прогноз – стратегічні важелі ефективного державного управління». – 7 листопада 2019року. - м. Київ, С. 86-92.

46. Гурєєв В.О. Контурна модель розрахунку режимів роботи електроенергетичних систем в комп’ютерних тренажерах. // Тези науково-практичної конференції Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України «Безпека енергетики в епоху цифрової трансформації». - 20 грудня 2019 р., Київ. - С. 31-32.

47. Гурєєв В.О., Лисенко Є.М. Система автоматизації розрахунків в комп’ютерних тренажерах персоналу магістральних електричних мереж ОЕС України. // Тези науково-практичної конференції Інституту проблем

моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України «Безпека енергетики в епоху цифрової трансформації». - 20 грудня 2019 р., Київ. - С. 32-33.

48. Гурєєв В.О., Лисенко Є.М. Автоматизація конструювання та принципи організації тренувальних занять в комп'ютерних тренажерах оперативно-диспетчерського персоналу. // Тези науково-практичної конференції Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України «Безпека енергетики в епоху цифрової трансформації». - 20 грудня 2019 р., Київ. - С. 33-34.

Праці, що додатково відображають наукові результати дисертації:

49. Сулейманов В. Н. Многоцелевая оптимизация режимов работы энергетических систем методом экстремального планирования эксперимента. / В. Н. Сулейманов, В. А. Гуреев, У. О. Саидов. // Энергетика и электрификация. – 1981. – №1. – С. 37-39.

50. Сулейманов В. Н. Оптимизация режимов электроэнергетических систем модифицированным методом наискорейшего спуска и экстремального планирования эксперимента / В. Н. Сулейманов, В. А. Гуреев, У. О. Саидов. // Электрические сети и системы. Респ. межвед. научн.-техн. сб. – 1981. – №17. – С. 96–100.

51. Сулейманов В. Н. Оптимизация режимов работы электроэнергетических систем методом экстремального планирования эксперимента / В. Н. Сулейманов, В. А. Гуреев, У. О. Саидов. // Вестн. Киевск. политехн. ин-та. Сер. электроэнергетики, 1982. – № 19. – С.61-64.

52. Гуреев В. А. Программное обеспечение диагностирования персонала//Совершенствование технической диагностики энергетического оборудования / В. А. Гуреев, А. И. Ришкевич. – 1984. – С. 101–103.

53. Гуреев В. А. Синтез моделей предметной области противоаварийных тренировок / В. А. Гуреев, О. В. Сулейманова. // Энергетика и электрификация. – 1986. – №4. – С. 16–17.

54. Гуреев В. А. Разработка архитектуры мини базы знаний противоаварийных тренировок / В. А. Гуреев, О. В. Сулейманова. // Энергетика и электрификация. – 1987. - №1. – с.44-46.

55. Гуреев В.А. Автоматизация противоаварийных тренировок оперативного персонала Минэнерго УССР на базе сети микро ЭВМ / В.А. Гуреев, С.В. Колесников, Н.А. Сябер // Энергетика и электрификация. -1989.- №4. – с.55 – 56.

56. Васильев А. В. Система автоматизированного проектирования технологических схем для задач тренажа оперативного персонала с использованием ПЭВМ / А. В. Васильев, В. А. Гуреев, В. Д. Заикин. // Энергетика и электрификация. – 1994. – №1. – С. 25–28.

57. Гуреев В. А. Современные методы и средства построения компьютерных тренажерных и обучающих систем / В. А. Гуреев, В. Н. Сулейманов, Р. Надеран. // Новини енергетики. – 2003. – №5. – С. 39–43.

58. Сябер Н. А. Применение современных тренажерных технологий для обучения персонала в энергетике Украины / Н. А. Сябер, В. А. Гуреев. // Энергетика и электрификация. – 2005. – №6. – С. 45–50.

59 Принципы построения информационной части модели электроэнергетики Украины / В. А. Гуреев, В. Н. Сулейманов, О. В. Сулейманова, Н. Реза. // Электропанорама. – 2011. – №12. – С. 42–44.

60. Сущности и связи информационной части модели энергетики Украины/ В. А. Гуреев, В. Н. Сулейманов, О. В. Сулейманова, Н. Реза. // Электропанорама. – 2012. - № 2. – С. 36-38.

61. Аветисян Е. В. Моделирование режимов, обучение и тренаж персонала с использованием виртуальной объединенной энергосистемы (ВОЄС) Украины / Е. В. Аветисян, В. А. Гуреев, О. В. Сангинова. // Энергетика и электрификация. – 2014. – №9. – С. 28–35.

62. Авраменко В. Н. Методика и программные средства для противоаварийного обучения диспетчерского персонала ОЕС Украины / В. Н. Авраменко, Т. М. Гуреева, В. А. Гуреев. // Электрические сети и системы. – 2016. – №2. – С. 14–20.