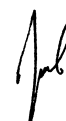


НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МОДЕЛЮВАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ
ІМ. Г.Є. ПУХОВА

ГУРСЄВ ВІКТОР ОЛЕКСАНДРОВИЧ



УДК 004.942:519.876.5; 621.31

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

Спеціальність 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова Національної академії наук України.

Науковий консультант доктор технічних наук, професор
Самойлов Віктор Дмитрович,
Інститут проблем моделювання в енергетиці
ім. Г.Є. Пухова НАН України, головний
науковий співробітник відділу моделювання
енергетичних процесів і систем

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Лежнюк Петро Дем'янович,
Вінницький національний технічний
університет, завідувач кафедри електричних
станцій та систем

доктор технічних наук, професор
Василів Карл Миколайович,
Інститут енергетики та систем керування
Національного університету
«Львівська політехніка», професор кафедри
електроенергетики та систем управління

доктор технічних наук, старший науковий
співробітник
Верлань Андрій Анатолійович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені
Ігоря Сікорського», доцент кафедри
автоматизації проектування енергетичних
процесів та систем теплоенергетичного
факультету

Захист відбудеться «17» грудня 2020 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.185.01 в Інституті проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України за адресою: Україна, 03164, м. Київ, вул. Генерала Наумова, 15.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України.

Автореферат розісланий «14» листопада 2020 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.185.01



В.В. Душеба

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

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.

Також швидко відбувається неминуче оновлення висококваліфікованого оперативно-диспетчерського персоналу, який здійснює управління режимами роботи і устаткуванням в реальному часі і який забезпечує формування і прийняття ефективних рішень численних оперативних задач та важливих завдань технічної політики, пов'язаних з розвитком енергетики. Тому система роботи з персоналом з метою безперервного формування, підвищення і контролю його кваліфікації є важливою умовою надійної роботи енергетичного виробництва.

В реальних умовах тривалої експлуатації є тенденція, що якщо менше відбувається аварій, то здатність (компетентність) персоналу до попередження та ліквідації аварій значно знижується. Ігнорування цього факту дуже часто призводить до великих матеріальних і людських втрат.

На жаль, в сучасних умовах диспетчерського управління об'єднаною електроенергетичною системою (ОЕС) України в енергопостачальних компаніях (ЕК) та в електроенергетичних системах (ЕЕС) режимні тренажери диспетчерів для безперервного підвищення кваліфікації персоналу, практично не використовуються.

Процес підготовки і формування належної компетентності кваліфікованого оперативно-диспетчерського персоналу з керування нормальними і аварійними режимами ЕЕС і ОЕС є дуже тривалим.

У всьому світі ці завдання з формування у оперативно-диспетчерського персоналу стійких навичок розпізнавання умов виникнення, попередження і ліквідації наслідків аварій (ключових компетентностей) вирішуються шляхом обов'язкового використання для цих цілей повнофункціональних режимних тренажерів, які адекватно моделюють штатні і аварійні режими роботи великих ЕЕС. Відомо, що такі тренажери дуже дорогі, їх використання обмежується тільки очною формою навчання з відривом від виробництва, потрібні великі приміщення, ускладнена модернізація і додавання нових функцій, швидко застарівають (разом із засобами обчислювальної техніки), як правило, об'єктно орієнтовані на конкретне устаткування і потрібні у великій кількості.

Велика вірогідність можливості виникнення системних аварій в ОЕС обумовлена наявністю стратегічної тенденції підключення потужних ВДЕ зі змінними невизначеними графіками генерації, критичним старінням та деградацією обладнання, відсутністю загальної моделі функціонування енергетики країни, відсутністю надійної загальної системи збору інформації та її системного аналізу, відсутністю засобів побудови сучасних тренажерних систем.

Заслуговує на увагу створення та ефективне функціонування впродовж тривалого часу повнофункціональних тренажерних систем і засобів для навчання і контролю знань, моделювання різноманітних аварій і шляхів їх ліквідації в учбово-тренувальних центрах (УТЦ) блоків атомних електростанцій (АЕС) України, які є складовою частиною ОЕС України. Важливо, що кожен блок всіх АЕС оснащений індивідуальним повнофункціональним режимним тренажером. До складу тренажера входять складні підсистеми моделюючого комплексу блоку, конструктор-редактор для підготовки сценаріїв штатних і протиаварійних тренувань, контролю і оцінювання рівня кваліфікації із зручним інтерактивним інтерфейсом для інструкторів навчання і тих, хто навчається. Періодична робота на тренажері є обов'язковою для усього оперативно-диспетчерського персоналу блоків АЕС. Це сприяє низькому рівню аварійності на блоках АЕС.

Інша частина ОЕС України (високовольтні підстанції і диспетчерські центри ЕЕС) дуже потребує великої кількості сучасних режимних диспетчерських тренажерів.

Отже, 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 є актуальною науково-прикладною проблемою. Ефективне розв'язання вказаної проблеми створює належні умови для побудови і функціонування веб-орієнтованої сучасної безперервної електронної професійної системи навчання, ефективною 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.

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. Лежнюк, В.В. Павловський, В.С. Перхач, М.А. Рабинович, В.Д. Самойлов, О.В. Скрипник, В.М. Сулейманов, В.Г. Холмский, О.Г. Чачко, Ю.В. Щербина, Г. Крон, S. Gissinger, P. Chaumes, J.-P. Antoine, A. Bihain, C. Bernard та ін.

Тема дисертаційної роботи «Методи і комп'ютерні технології побудови веб-орієнтованих тренажерних систем оперативно-диспетчерського персоналу магістральних електромереж» орієнтована на побудову наукових та методологічних основ методів моделювання і комп'ютерних технологій конструювання веб-орієнтованих тренажерних систем підготовки і підвищення кваліфікації оперативно-диспетчерського персоналу МЕМ із залученням кваліфікованого галузевого персоналу для створення ефективних тренувальних занять (ТрЗ).

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.

Мета і задачі дослідження. 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. Новизну роботи складають наступні положення.

Вперше запропоновано:

– метод організації процесів моделювання, 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 окремими 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 великої кількості 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 перемикачів в електричних мережах були впроваджені в навчальний процес двох кафедр факультету електроенергетехніки та автоматики Київського політехнічного інституту ім. Ігоря Сікорського. Починаючи з 2007 року у Центрі підвищення кваліфікації керівників і спеціалістів Мінекоенерго КПП 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 [27, 29, 33, 36, 38, 43, 44, 46] написано самостійно. В друкованих працях, опублікованих у співавторстві, дисертанту належить: [4] – 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; [5] – побудова інформаційної моделі великих енергосистем, розробка дидактичної моделі та моделюючих алгоритмів, дослідження і реалізація алгоритмів і програм; [6] – постановка задачі, розробка і адаптація дидактичної моделі оцінки результатів тренажерної підготовки у вигляді енергетичного рейтингу, розробка алгоритмів і програм; [7] – постановка задачі, розробка і реалізація програм, дослідження властивостей Якобіану, розробка алгоритмів розрахунку елементів матриці Якобі, проведення розрахункових експериментів; [8] – постановка задачі, основні ідеї, розробка програм, розробка алгоритму розрахунку режимів роботи електричних мереж, проведення розрахункових експериментів; [9] – постановка задачі розрахункових експериментів, розробка і реалізація алгоритмів розрахунку усталених режимів роботи великих енергосистем; [10] – постановка задачі об'єднання алгоритмів одночасного розрахунку усталених режимів і оптимізації активних втрат потужності, розробка і реалізація алгоритмів і програм; [11] – постановка задачі, основні ідеї, розробка і реалізація алгоритмів і програм розрахунку усталених режимів великих енергосистем, розрахункові дослідження граничних режимів; [12] – постановка задачі, розробка і реалізація алгоритмів і програм моделюючих комплексів усталених режимів великих енергосистем; [13] – постановка задачі, основні ідеї, розробка моделей елементів енергосистем, розробка і реалізація алгоритмів і програм, дослідження поведінки Якобіану, розрахункове дослідження усталених режимів роботи великих енергосистем; [14] – основні ідеї, розробка і реалізація алгоритмів і програм, підготовка вихідних даних, дослідження умов виродження якобіану, розрахункові дослідження; [15] – постановка задачі побудови інформаційної моделі, розробка і реалізація алгоритмів і програм, узагальнення принципів побудови швидкісних алгоритмів розрахунку усталених

режимів великих енергосистем; [16] – постановка задачі побудови інформаційної моделі, розробка алгоритмів оптимізації ітераційних процесів, розрахункові дослідження, розробка алгоритмів; [18] – постановка задачі побудови системи класифікації помилок оперативно-диспетчерського персоналу, алгоритми побудови сценаріїв протиаварійних тренувань, реалізація алгоритмів і програм; [19] – постановка задачі побудови алгоритмів управління складними технічними об'єктами, числові дослідження, узагальнення принципів побудови систем управління високовольтними підстанціями; [20] – 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; [21] – постановка задач побудови розподіленої інформаційної системи моделювання режимів великих електроенергетичних систем, вибір засобів моделювання, проведення розрахункових досліджень; [22] – постановка задачі побудови повнофункціональних комп'ютерних тренажерів, розробка інформаційних моделей, програмна реалізація комплексів розрахунку усталених режимів, розрахункові дослідження; [23] – основні ідеї, розробка алгоритмів і програм; [24] – постановка задачі побудови сучасної професійної системи навчання та тренажерної підготовки персоналу у вигляді мережі науково-навчальних пунктів; [25] – 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; [26] – основні ідеї, постановка задачі побудови алгоритмів функціонування дистанційних тренажерів, програмна реалізація комп'ютерного тренажера, розробка топологічних моделей великих енергосистем; [27] – постановка задачі побудови інформаційної моделі, реалізація програм, числові дослідження, формування принципів організації професійної системи підвищення кваліфікації; [29] – постановка задачі, основні ідеї, розробка алгоритмів побудови адаптивних методів конструювання сценаріїв протиаварійних тренувань, розробка програм; [31] – постановка задачі, розробка інформаційних моделей об'єктів критичної інфраструктури, алгоритми візуалізації умов виникнення кіберзагроз, ретроспективний аналіз задач; [32] – 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); I-й Українській конференції з автоматичного керування "Автоматика–94" (Київ, 1994), III-й міжнародній науково-технічній конференції "Нетрадиционные электромеханические и электрические системы" (Крим, Алушта, 1997); III-й міжнародній науково-технічній конференції "Оптимальное 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), III-й міжнародній науково-технічній конференції "Оптимальное керування електроустановками" (Вінниця, 2017), V-й нау-

ково-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), II міжнародній науково-технічній конференції "SMART-ТЕХНОЛОГІЇ В ЕНЕРГЕТИЦІ ТА ЕЛЕКТРОНІЦІ – 2017" (сmt. 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: сьогодні 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 «Перспективи 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 . Основний зміст дисертаційної роботи відображено у трьох монографіях [1-3], 57 публікаціях, а саме: 29 статей у фахових наукових виданнях [4-32], 11 із них у міжнародних наукометричних базах (Scopus та ін.), двох авторських свідоцтвах [33-34], 14 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій [34-47] та 14 публікацій в галузевих виданнях [49-62].

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел (333 бібліографічних найменувань) та 3 додатків. Загальний обсяг дисертації складає 432 сторінки, в тому числі 298 сторінок основного тексту, включаючи 99 рисунків, 12 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовані актуальність та доцільність роботи, сформульовані мета та задачі наукового дослідження, викладено наукову новизну, практичне значення та перелік впровадження результатів дисертації, особистий внесок здобувача в роботах у співавторстві, приведено відомості про апробацію і публікації.

У першому розділі роботи розглядаються проблеми і принципи організації існуючої системи підготовки персоналу в магістральних електромережах України, нормативна і навчально-методична база, а також шляхи її удосконалення.

Підготовка, мета, принципи та основні напрями державної політики у сфері навчання і підвищення кваліфікації персоналу в енергетиці регламентуються відповідними законами, які визначають головні правові, організаційні та методичні засади регулювання системи його професійного розвитку.

В Україні створено комплексну систему підготовки персоналу для блоків атомних електростанцій(АЕС), починаючи з професійної орієнтації школярів , супроводу навчання студентів у вищих навчальних закладах і закінчуючи професійним навчанням безпосередньо на АЕС, підвищенням кваліфікації у навчально-тренувальних центрах.

На жаль, в МЕМ ОЕС України така система відсутня. Сьогодні система підвищення кваліфікації оперативно-диспетчерського персоналу МЕМ базується лише на використанні 4-х освітніх закладах: учбового центру ВО "Вінницяелектротехнологія" НЕК "Укренерго", учбово-тренувального центру (УТЦ) Дніпровської ЕЕС, центру підвищення кваліфікації керівників і спеціалістів Міненерговугілля НТУ України "КПІ ім. Ігоря Сікорського", науково-інженерного центру "Інформмережа" факультету електроенергетики та автоматики НТУ України "КПІ ім. Ігоря Сікорського", які мають дуже застарілу матеріальну базу і не можуть у достатній мірі забезпечити потрібний рівень кваліфікації оперативно-диспетчерського персоналу МЕМ.

Існує також багато невирішених проблем діючої системи підготовки персоналу, підвищення кваліфікації та контролю компетентностей. Головними серед них є наступні: відсутні державні та галузеві професійні стандарти професійно-технічної освіти і системи підвищення кваліфікації та тренажерної підготовки оперативно-диспетчерського персоналу, відсутня система підготовки кадрів професійної еліти; через відсутність потрібних тренажерів та відповідної учбово-методичної бази в енергетиці не можна реалізувати сучасний компетентнісний підхід, який закріплений в Законі України «Про вищу освіту»; відсутні на державному рівні доступні відкриті загальні веб-ресурси для отримання персоналом структурованих знань з питань підвищення кваліфікації та багато інших невирішених актуальних проблем.

В роботі проаналізовано ці проблеми і запропоновано методи, технології і шляхи їх вирішення з використанням новітніх інформаційних технологій.

Досліджуються проблеми розвитку та застосування комп'ютерних тренажерних систем в МЕМ ОЕС України і в розвинених країнах світу, аналізуються наукові та технічні проблеми побудови комп'ютерних тренажерів, тренажерних систем і теоретичні основи технології їх конструювання, пропонується стратегія інноваційного розвитку електроенергетики на базі сучасних інтелектуальних концепцій.

Виявлено та сформульовано технічні і наукові проблеми побудови та функціонування комп'ютерних розподілених тренажерних систем у великих енергосистемах. Розглянуто сучасні питання стратегії розвитку віртуальних технологій в енергетиці на базі концепцій Smart Grid, IoT, BigData та Industry 4.0.

Проблема побудови веб-орієнтованих розподілених тренажерних систем має наступні основні складові-підпроблеми: розробка концептуальної схеми кластерної бази даних інформаційної моделі ОЕС України, розробка моделюючого комплексу, який працює в розподіленому середовищі, створення системи розподіленої візуалізації результатів моделювання, яка забезпечує поточною інформацією в темпі процесу велику кількість користувачів одночасно та розвинений веб-орієнтований інтерактивний інтерфейс з можливостями автоматизованого конструювання ТрЗ, відображати диспетчерські щити, панелі релейного захисту і автоматики та інше. Цей інтерфейс забезпечує оперативні перемикання в електричних мережах безпосередньо на електричних схемах мереж.

Виконано огляд та аналіз сучасного попиту на локальні комп'ютерні тренажери, виявлені недоліки і переваги, області застосування з метою створення нових підходів до розробки методів модельного конструювання комп'ютерних тренажерів та організації тренажерної підготовки оперативного персоналу МЕМ ЕЕС.

Проведено аналіз розроблених автором методів моделювання збурень в МЕМ ЕЕС з метою виявлення можливих потенційних технологічних загроз безпеки функціонування великих ЕЕС і ОЕС.

Розглянуто шляхи удосконалення існуючої системи підготовки і підвищення кваліфікації оперативно-диспетчерського персоналу МЕМ ОЕС України. В контексті проблеми створення сучасної професійної системи підготовки персоналу в магістральних мережах розроблені принципи реформування існуючої системи навчання оперативно-диспетчерського персоналу електроенергетичних компаній ОЕС України на базі комп'ютерних розподілених тренажерних систем з використанням сучасних електронних технологій навчання.

Виконано аналіз організації і стан системи роботи з персоналом на об'єктах МЕМ. Результати аналізу дозволили виявити її недоліки і сформульовані вимоги до комп'ютерних тренажерів, які є важливою складовою новітніх технологій електронного навчання.

Отже, методи моделювання і комп'ютерні технології побудови веб-орієнтованих тренажерних систем оперативно-диспетчерського персоналу МЕМ ОЕС України є важливою складовою інструментальних засобів для вирішення актуальної науково-технічної проблеми – розроблення теорії побудови веб-орієнтованих тренажерних систем з врахуванням особливостей їх впровадження, масштабування та підтримки функціонування в умовах ОЕС України.

У другому розділі роботи розглядаються питання онтологічного аналізу предметної області досліджень і розробки концептуальної, логічної і фізичної схем бази даних інформаційної частини моделі МЕМ ОЕС України, розглянуто проблеми побудови і моделювання інформаційної частини великих ЕЕС та ОЕС для використання у веб-орієнтованих тренажерних системах оперативно-диспетчерського персоналу МЕМ.

Розв'язання задачі ідентифікації математичної моделі об'єкта є одним з етапів будування імітаційної моделі з метою розв'язання різноманітних електроенергетичних прикладних задач (проектування, прогнозування і т. ін.). Тому поєднання в рамках однієї системи моделювання можливостей розв'язання ширшого класу задач видається доцільним та прогресивним.

ОЕС України – це розподілена на великій території ергатична система у вигляді сукупності електричних станцій з різними формами перетворення первинної енергії – атомної, теплової, гідро, вітрової і сонячної, приймачів енергії і електричних мереж, об'єднаних і пов'язаних між собою спільністю режиму. Інформаційна модель (ІМ) енергетичної системи будь-якої країни є дуже складною, її можна віднести до систем класу великих даних (BigData) і тому для вирішення окремих завдань моделювання великих систем зазвичай намагаються спростити постановку конкретної задачі або застосувати методи діакоптіки (розділити велику систему на окремі частини).

В роботі акцент зроблено на дослідженні математичних моделей ЕЕС для використання в моделюючому комплексі розподілених тренажерних систем. ЕЕС є електричною частиною енергетичної системи зі споживачами електричної енергії, які об'єднані спільністю процесу виробництва, передачі, розподілу і споживання електричної енергії. Декілька паралельно працюючих ЕЕС утворюють ОЕС України. Основна мета ОЕС України – забезпечити надійну і стійку паралельну роботу окремих ЕЕС і необхідну споживачам електроенергію високої якості і необхідної кількості без обмежень. Рівень надійності роботи ОЕС значною мірою залежить від рівня кваліфікації експлуатаційного оперативно-диспетчерського персоналу. Створення найбільш ефективних систем навчання і тренажерної підготовки оперативного персоналу МЕМ можливе із застосуванням повної інформаційної частини моделі ОЕС.

Найбільш поширеними засобами для раціонального і ефективного зберігання інформації про енергетику країни є промислові реляційні бази даних (БД). Вони забезпечують надійний захист даних і швидкі механізми пошуку інформації, що задовольняють функційним (комфортним) вимогам до продуктивності.

Створення БД ІМ ОЕС України є дуже складним процесом, який базується на розробці концептуальної схеми (КС) БД. КС – це схема БД, що визначає представлення бази даних, 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.

В роботі досліджено структуру предметної області ЕЕС та ОЕС на рівні країни, виявлені найбільш важливі сутності та їх зв'язки і побудована КС розподіленої (кластерної) БД ОЕС України для модельного конструювання тренажерних систем з використанням веб-орієнтованих комп'ютерних технологій.

Головна мета формування КС ІМ ОЕС полягає у створенні простого і зручного для подальшого аналізу уявлення про процеси, що відбуваються у великих ЕЕС, для забезпечення можливостей коректного відображення процесів постачання споживачам електроенергії необхідного об'єму і заданої якості, а також для перевірки можливостей ефективного використання у веб-орієнтованих комп'ютерних тренажерах.

Предметна область ЕЕС або ОЕС рівня країни представлена у вигляді різних сутностей (описів), об'єднаних певними технологічними зв'язками і стосунками, що

адекватно відображають основні властивості і режими її функціонування. Інформаційна структура сутностей у базі даних (БД) відображається таблицями, що містять стовпці і рядки. Кожна сутність відбиває якісь певні властивості об'єктів ЕЕС або ОЕС в цілому як технології. В таблиці 1 наведено скорочений перелік сутностей предметної області та їх короткий опис.

Таблиця 1.

№	Найменування сутності предметної області MEM ОЕС	Короткий опис
1.	EMPLOYEES_COUNTRY_CS	Система управління (СУ) персоналом
2.	BALANS_ENERGY_COUNTRY	Баланси потужності підприємств енергетики України
3.	CS	СУ устаткуванням
4.	DEPARTMENT_CS	Ієрархічні підрозділи СУ
5.	DIAGRAM	Сукупність електричних схем
6.	EMPLOYEES_CS	Персонал СУ
7.	DISP_CONTROL_PANEL_DIAGRAM	Сукупність диспетчерських щитів
8.	ENERGY	Енергетика країни
9.	EQUIPMENT_OF_LINES	Устаткування ЛЕП
10.	EQUIPMENT_OF_SUB	Устаткування підстанцій
11.	EQUIPMENT_OF_SUB_SWITCH	Вимикачі
12.	EQUIPMENT_OF_SUB_SWITCH_DEV	Регулятори напруги з РПН
13.	EQUIPMENT_NAME	Перелік підстанцій
14.	EQUIPMENT_TYPE_COMMON	Типи устаткування
15.	JOB_HISTORY_CS	Персональні дані
16.	JOBS_CS	Система посад персоналу
17.	LOCATION_CS	Розташування/адреса підрозділів
18.	MODEL_EQU_SUB	Моделі устаткування підстанцій
19.	MODEL_EQU_SUB_TRANSF	Моделі трансформаторів

Фрагмент КС інформаційної частини моделі ОЕС України наведено на рис. 1.

Виконано аналіз та вибір математичних, топологічних, інформаційних і комп'ютерних моделей елементів і об'єктів ЕЕС для використання у веб-орієнтованих розподілених тренажерних системах з метою порівняння можливостей їх ефективного застосування.

Як топологічні моделі електричних мереж ЕЕС зазвичай використовуються направлені графи (орграфи).

В термінах теорії графів загальна мережа ЕЕС (рис. 2) в роботі представляється окремими деревами, які з'єднані відповідними хордами (рис. 3). В роботі досліджена та вперше запропонована для створення системи автоматизації розрахунків багатоопорна топологічна модель мережі ЕЕС, яка на відміну від наявних одно опо-

рних методів дає змогу враховувати у розрахункових моделях вироджені контури, що можуть утворюватися парами окремих опорних (балансуючих) вузлів (рис. 4.).

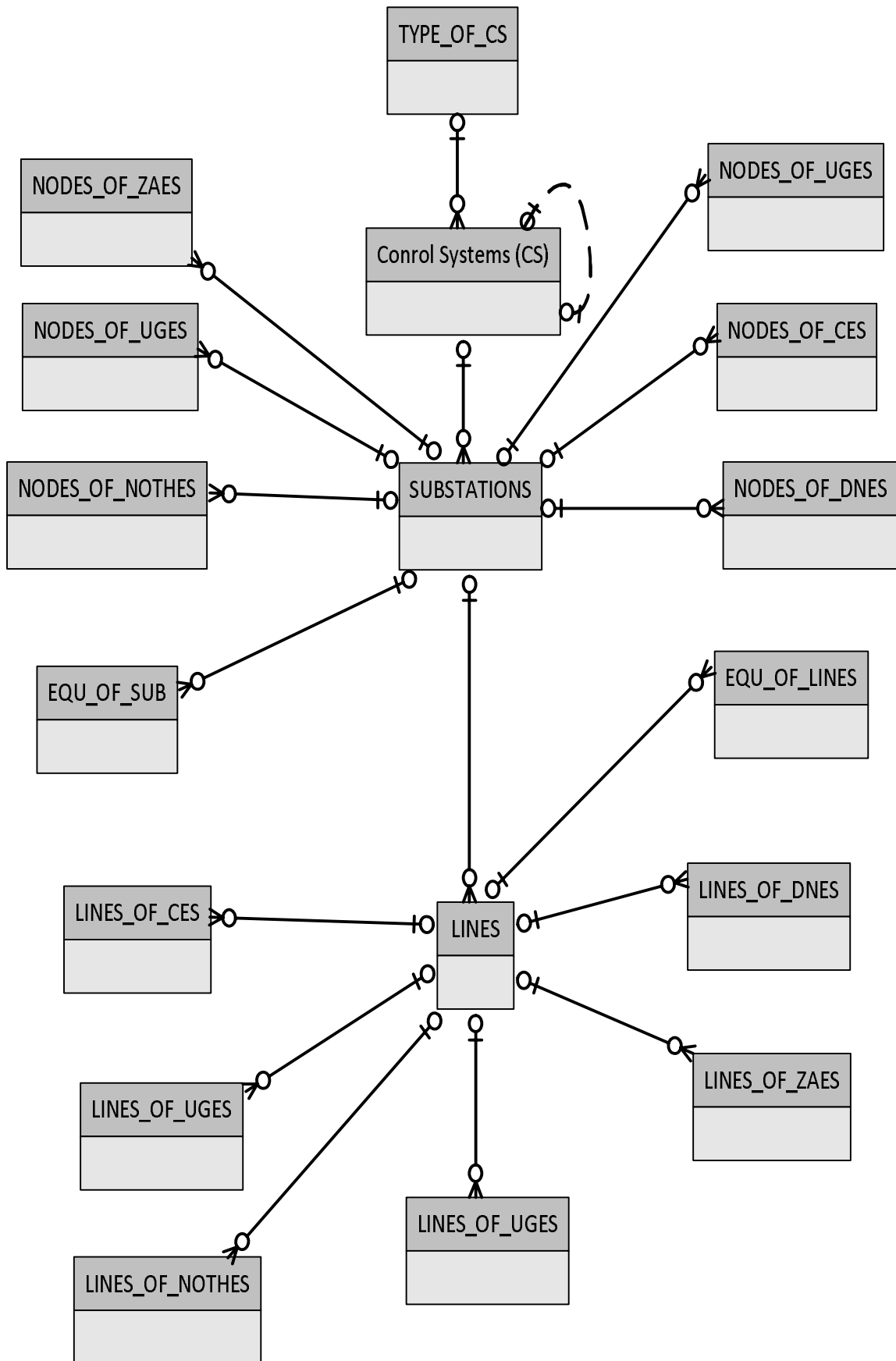


Рис. 1. Фрагмент КС ІМ ОЕС України

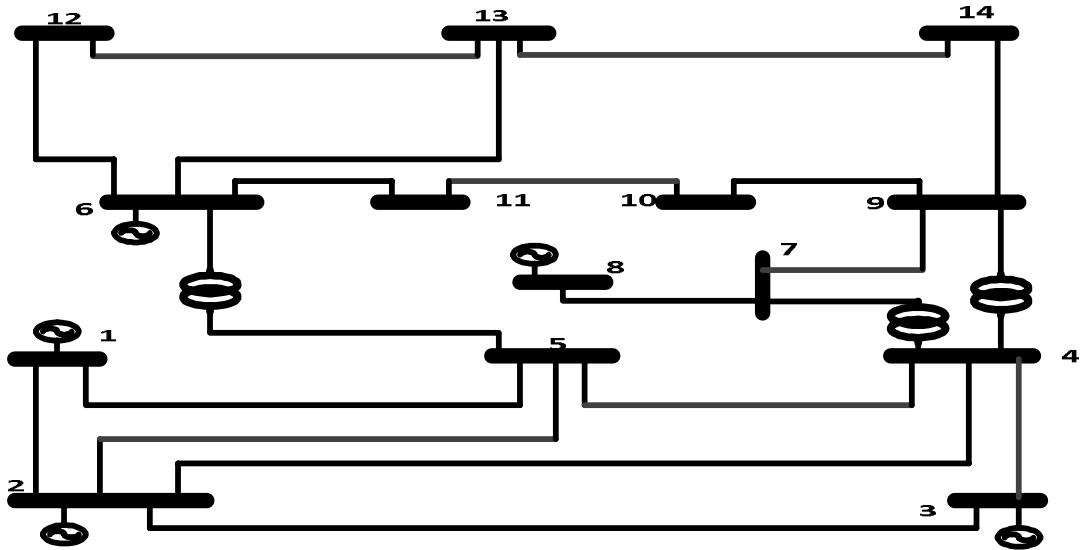


Рис. 2. Схема IEEE TEST 14 bus

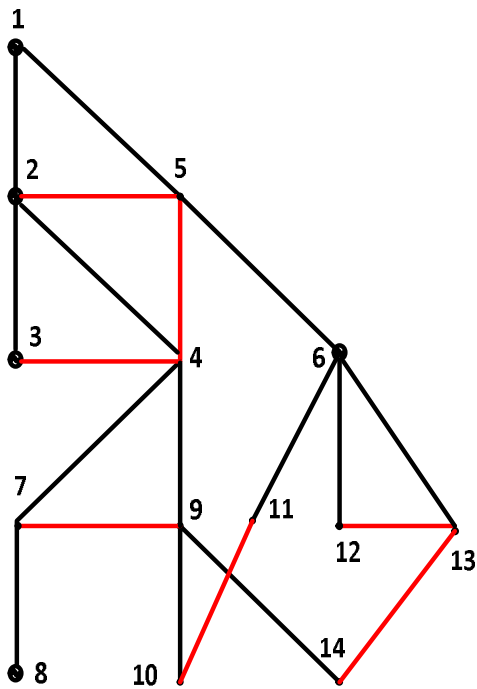


Рис. 3. Топологічна модель схеми IEEE TEST 14 bus для одно опорного методу РКС, чорні гілки – дерево, червоні – хорди, другий рівень ієрархічної декомпозиції

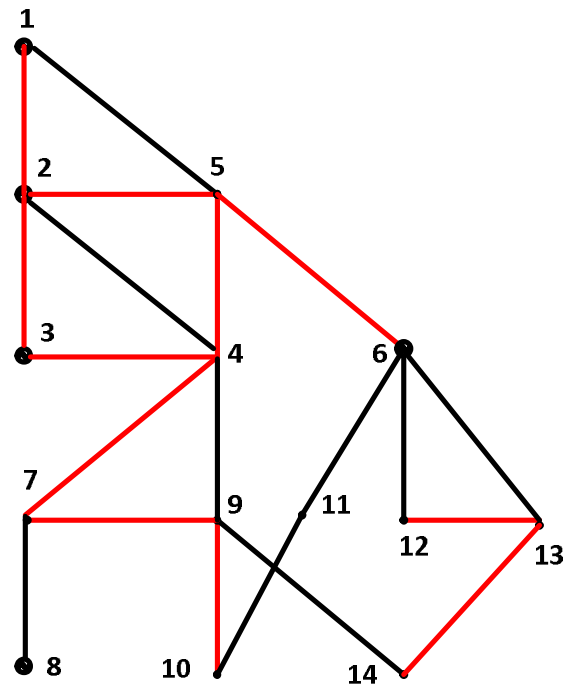


Рис. 4. Топологічна модель схеми IEEE TEST 14 bus для багатоопорного методу РКС

В роботі розроблено алгоритми автоматичної побудови топологічних моделей ЕЕС і ОЕС в розподіленому моделюючому середовищі з метою перевірки можливостей застосування їх для організації функціонування тренажерно-моделюючих систем підготовки персоналу МЕМ в реальному часі.

Фрагмент алгоритму побудови топологічних моделей ЕЕС та їх об'єднань представлений на рис. 5. Складовими системи топологічної моделі є спеціальним чином впорядковані гілки дерева і хорд мережі з однозначно визначеними адресами ІМ вузла початку, кінця і самої гілки. Гілки дерева і хорд впорядковані по ярусам,

починаючи від кореня дерев. Ярусна впорядкованість реалізована також за допомогою системи адресних посилань. Така структура топологічної моделі дає змогу застосувати один і той же універсальний алгоритм декомпозиції як на рівні ОЕС, так і ЕЕС. Адресна модель гілки призначена для виконання типової операції циклу – розрахунку напруги вузла кінця гілки (завжди відомі напруга вузла початку гілки, опір і струм гілки). Адресна модель ярусної впорядкованості використовується для організації циклів розрахунку напруги вузлів і струмів гілок і хорд, незалежно від того в яких БД розташовані ці ІМ. Такий підхід до організації розподіленого моделюючого середовища сприяє можливостям ефективного балансування навантаження серверів додатків і БД, призначених для моделювання великих ЕЕС і ОЕС.

В роботі наведено приклади використання розроблених алгоритмів автоматизації розрахунків для реалізації методів декомпозиції і побудови більш простих ІМ веб-орієнтованих тренажерних систем. Універсальність запропонованого методу декомпозиції великих ЕЕС і ОЕС полягає у тому, що структурною одиницею моделювання веб-орієнтованих тренажерних систем є окреме дерево, в якому струми хорд враховуються в якості струмів відповідних вузлів.

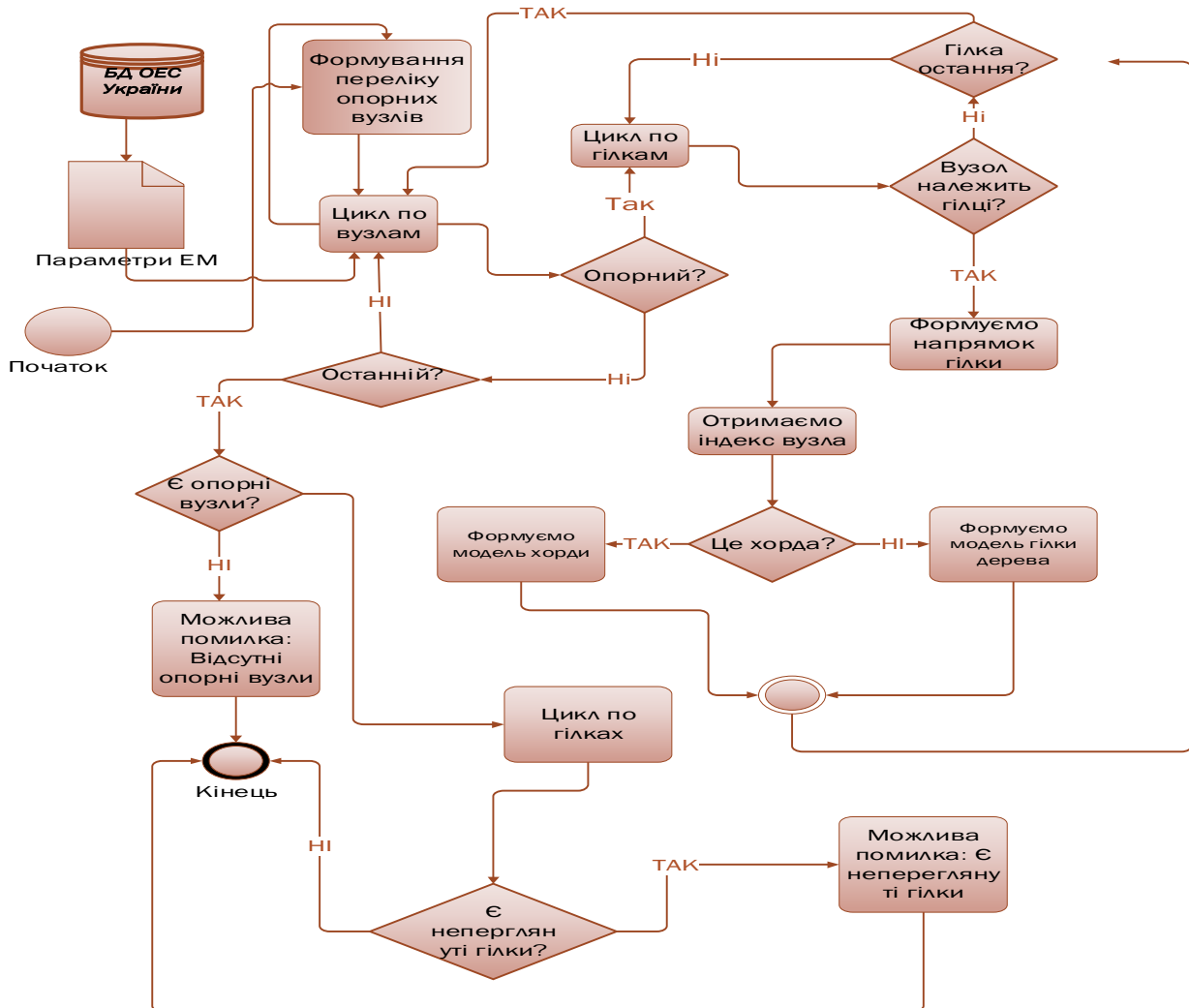


Рис. 5. Фрагмент алгоритм система автоматизації розрахунків режимів роботи великих ЕЕС

У **третьому розділі** розглядаються теоретичні проблеми моделювання веб-орієнтованих комп'ютерних тренажерів і аналізуються важливі властивості методів

розрахунку параметрів режиму великих ЕЕС і ОЕС, моделі яких використовуються в режимних комп'ютерних тренажерах оперативно-диспетчерського персоналу МЕМ.

Комп'ютерний тренажер для оперативно-диспетчерського персоналу МЕМ є програмно-технічним функціонально орієнтованим засобом навчання, який забезпечує персонал можливістю адекватно моделювати задані режими роботи і умови експлуатації устаткування великих енергосистем в навчальному процесі для формування ключових компетентностей персоналу за допомогою різноманітних тренувальних занять.

Відповідний набір таких занять дає змогу підтримувати належні ключові компетентності персоналу – розпізнавати умови і причини виникнення аварій, попереджати їх, а також формувати стійкі навички швидкої ліквідації наслідків аварій.

Як модель об'єкту управління (ОУ) МЕМ веб-орієнтованої тренажерної системи використовується система нелінійних рівнянь алгебри, що описує усталені режими роботи МЕМ у складі ЕЕС та ОЕС. Такі системи можуть бути розв'язані тільки ітераційними методами (простої ітерації, Зейделя, Ньютона і їх модифікаціями). До недоліків цих методів відноситься нестійкість збіжності і критична залежність від початкових наближень. Також, наявні методи і алгоритми розв'язання нелінійних систем рівнянь алгебри не дають контролювати поточні параметри режимів – струми гілок і напруги вузлів в процесі розрахунку (on-line, в темпі процесу).

Основні етапи процесу тренажерної підготовки можуть бути описані у вигляді етапів циклічного спостереження і аналізу оперативно-диспетчерським персоналом поточних режимних параметрів МЕМ. Спостереження здійснюється за допомогою інформації, представленої на диспетчерському щиті, SCADA і отриманою по телефону від оперативно-диспетчерського персоналу паралельно працюючих ЕЕС і підстанцій. У разі відхилення будь-яких параметрів режиму від номінальних, диспетчер повинен прийняти правильне і оптимальне рішення (із спектру можливих). Наприклад, він може змінити конфігурацію (топологию) електричної мережі (ЕМ) шляхом включення або відключення вимикачів ліній електропередач, генерацію або навантаження для цього моменту часу з подальшим аналізом наслідків цієї дії – адекватної реакції ОУ у вигляді наборів найбільш важливих параметрів режиму.

Режими роботи великих ЕЕС в загальному вигляді описуються математичною моделлю у вигляді системи алгебро-диференціальних рівнянь високої розмірності. Проблемам моделювання та питанням розрахунку усталених і перехідних режимів (УР і ПР) роботи великих ЕЕС присвячено багато досліджень та публікацій, в яких розглядаються математичні, інформаційні і комп'ютерні моделі методів моделювання, методи та засоби формування і розв'язання систем нелінійних рівнянь стану ЕМ, методи оцінки стану (ОС) ЕМ, питання збіжності ітераційних процесів різних методів моделювання, існування і єдиності розв'язання систем нелінійних рівнянь стану ЕМ, граничні режими та багато ін.

На жаль, незважаючи на великі зусилля науковців і накопичений досвід в області моделювання режимів роботи великих ЕЕС, поки що не отримані загальні аналітичні математичні моделі великих ЕЕС, та, відповідно, надійні і швидкодіючі методи розрахунку режимів їх роботи для використання в задачах реального часу.

В роботі розглянуто класичну постановку задачі розрахунку режимів роботи довільних ЕЕС для створення моделюючого комплексу веб-орієнтованих тренажерних систем.

Моделюючий комплекс створено 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 релейного захисту і автоматики (РЗА) та ін.

Структура (топология) схеми довільної ЕЕС моделюється за допомогою направлених графів, вузлами яких є вузли заступних схем джерел генерації та підстанцій, а гілками є лінії електропередачі, трансформатори та об'єкти підстанцій.

Моделювання режимів електромереж можливе за умови, коли відомі (задані) параметри ЕМ: топология мережі (перелік вузлів і гілок), напруга балансуючого вузла, потужності вузлів, параметри заступних схем 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.

У роботі досліджуються можливості одного із найбільш поширеного у світі методу Ньютона-Рафсона для моделювання режимів великих енергосистем та багатопорного методу (БОМ) розрахунку контурних струмів (РКС) з метою перевірки доцільності їх використання у комп'ютерних тренажерних системах.

Для розрахунків ustalених 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 $[i_s]$ і напруги \dot{U}_s , можна записати так:

$$[\dot{S}_s]^T = [i_s]^T [\hat{U}_s]_d, \quad (1)$$

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

Струми вузлів ЕМ розраховуються за допомогою лінійного алгебраїчного рівняння:

$$[i_s] = [\dot{Y}_{ss}][\dot{U}_s], \quad (2)$$

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

Системи рівнянь (1) і (2), як моделі об'єкту управління (ОУ) МЕМ, використовується у балансовій формі для вузлів довільної електричної мережі у вигляді (3).

Такі нелінійні системи можуть бути розв'язані тільки ітераційними методами (простої ітерації, Зейделя, Ньютона і їх модифікаціями). До недоліків цих методів відноситься нестійкість збіжності і критична залежність від початкових наближень.

$$\begin{aligned} \dot{S}_i = & -|U_i|^2 \cdot \left(\sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{j=k} \dot{Y}_{ij} + \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{j=k} |K|_{ij}^2 \cdot \dot{Y}_{ij} \right) + \hat{U}_i \cdot \left(\sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{j=k} \dot{U}_j \cdot \dot{Y}_{ij} + \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{j=k} \dot{U}_j \cdot \dot{K}_{ji} \cdot \dot{Y}_{ij} + \right. \\ & \left. \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{j=k} \dot{U}_j \cdot \hat{K}_{ji} \cdot \dot{Y}_{ij} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

де \dot{S}_i – задана потужність вузла i (комплексна величина); $|U_i|^2$ – квадрат модулю напруги вузла i ; $|K|_{ij}^2$ – квадрат модулю коефіцієнта трансформації трансформатора i - j (комплексна величина); \dot{K}_{ji} – прямий комплекс коефіцієнта трансформації трансформатора i - j ; \hat{K}_{ji} – спряжений комплекс коефіцієнта трансформації трансформатора i - j ; \dot{Y}_{ij} – взаємна провідності гілки i - j (комплексна величина); j – номер (індекс) прилеглому вузла; n – загальна кількість вузлів мережі; k – кількість прилеглих гілок до вузла i ; \dot{U}_j – напруга j -го вузла (прямий комплекс); \hat{U}_i – напруга i -го вузла (спряжений комплекс).

Для програмної реалізації методу Ньютона-Рафсона була використана полярна система координат.

Діагональні елементи матриці Якобі для j -го вузла електричної схеми з трансформаторами обчислюються за формулою:

$$\begin{bmatrix} \frac{dP_j}{d\delta_j} & \frac{dP_j}{dV_j} \\ \frac{dQ_j}{d\delta_j} & \frac{dQ_j}{dV_j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_j \cdot V_i \cdot c1 & -2 \cdot V_j \cdot g_{ji} - V_i \cdot c2 \\ V_j \cdot V_i \cdot c2 & -2 \cdot V_j \cdot b_{ji} + V_i \cdot c1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

де $c1 = (-\sin\delta_{ji} \cdot (g_{ji} \cdot K'_{ji} - b_{ji} \cdot K''_{ji}) + \cos\delta_{ji} \cdot (g_{ji} \cdot K''_{ji} + b_{ji} \cdot K'_{ji}))$,

$c2 = -(\cos\delta_{ji} \cdot (g_{ji} \cdot K'_{ji} - b_{ji} \cdot K''_{ji}) + \sin\delta_{ji} \cdot (g_{ji} \cdot K''_{ji} + b_{ji} \cdot K'_{ji}))$.

Взаємні елементи матриці Якобі для j -го вузла:

$$\begin{bmatrix} \frac{dP_j}{d\delta_i} & \frac{dP_j}{dV_i} \\ \frac{dQ_j}{d\delta_i} & \frac{dQ_j}{dV_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_j \cdot V_i \cdot c1 & V_j \cdot c2 \\ V_j \cdot V_i \cdot c2 & -V_j \cdot c1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

де $c1 = \sin\delta_{ji} \cdot (g_{ji} \cdot K'_{ji} - b_{ji} \cdot K''_{ji}) - \cos\delta_{ji} \cdot (g_{ji} \cdot K''_{ji} + b_{ji} \cdot K'_{ji})$,

$c2 = \cos\delta_{ji} \cdot (g_{ji} \cdot K'_{ji} - b_{ji} \cdot K''_{ji}) + \sin\delta_{ji} \cdot (g_{ji} \cdot K''_{ji} + b_{ji} \cdot K'_{ji})$.

Представлення великих ЕЕС у вигляді системи (1-3) використовується для вирішення широкого класу режимних електроенергетичних завдань, пов'язаних з диспетчерським управлінням, дослідженням усталених і перехідних режимів і процесів, проектуванням нових, модернізацією і розвитком наявних ЕЕС, а також для побудови моделюючого комплексу тренажерних систем.

Підходам, методам і питанням рішення систем (1-3) у всьому світі приділяється велика увага, але багато з них ще невирішені.

Важливо зазначити, що незалежно від типу конкретної електроенергетичної задачі для ЕЕС великої розмірності завжди доводиться вирішувати дві основні проблеми: гарантії (умови збігу та існування) отримання рішення і мінімізації часу розрахунку системи (2). Ці проблеми повною мірою досі не вирішені і потребують подальшого дослідження.

Дуже часто, залежно від конфігурації електричної мережі або певного співвідношення загального навантаження і генерації ЕЕС, відомі наявні для розрахунку режиму ітераційні методи не збігаються і час розрахунку стає неприйнятним для прийняття оперативно-диспетчерським персоналом потрібних рішень. Тому такі методи не прийнятні для використання в моделюючих комплексах тренажерних систем і це примушує шукати нові.

В якості математичної моделі моделюючого комплексу створеної автором веб-орієнтованої тренажерної системи підготовки персоналу МЕМ прийнята і використовується система нелінійних рівнянь алгебри (2), отриманих шляхом лінеаризації початкової алгебро-диференційної системи рівнянь в околі деякої точки аналізованого простору режимних станів.

Важливими умовами успішного використання моделюючого комплексу для веб-орієнтованих розподілених тренажерних систем є гарантії вирішення проблеми збіжності і отримання комфортного часу розрахунку для осіб (диспетчерів), що приймають рішення в реальному часі в процесі диспетчерського управління.

Для цього були досліджені і розроблені моделі реальних та віртуальних структур об'єктів ЕЕС в розподіленому моделюючому просторі. Загальна математична модель великої ЕЕС автоматично розділяється на окремі адміністративно-територіальні підприємства (АТП), БД яких гарантовано підтримуються в актуальному стані відповідним персоналом цих підприємств – спеціально закріпленим для цієї мети персоналом – режимною групою. Ці окремі частини інформаційної частини моделі об'єднані відповідними лініями електропередачі і розміщуються на окремих серверах, включаючи віртуальні, в розподіленому моделюючому середовищі. Параметри об'єднуючих окремих частин ОЕС – ліній електропередачі або трансформаторів (вимикачів), зберігаються на окремому сервері, можливо віртуальному, і використовуються для забезпечення автоматичної підтримки цілісності (урівноваження) результатів моделювання режимів роботи загальної ОЕС, як єдиної системи. Умови запуску тригерної системи розрахунку струмів хорд визначаються змінами напруги у граничних вузлах окремих АТП. Якщо напруга граничних вузлів змінюється на величину похибки, яка менше від заданої, то струми хорд не перераховуються.

Система нелінійних алгебраїчних рівнянь, що описує режими роботи ЕЕС і була використана для досліджень і побудови моделюючого комплексу всіх l паралельно працюючих ЕЕС і АТП має вигляд:

$$[\dot{S}_i] = ([\dot{Y}_{it}] \cdot [\dot{U}_i] \pm [I_{l+1}], [\hat{U}_i]), \quad (6)$$

де \dot{I}_{l+1} – вектор струмів гілок (хорд), які об'єднують окремі l і $(l+1)$ енергосистеми в єдину систему.

Струми гілок хорд обчислюються за допомогою рівняння:

$$[I_{l+1}] = [\dot{Y}_{l+1}] \cdot ([\dot{U}_i]_l - ([\dot{U}_i]_{l+1})), \quad (7)$$

Будь-яке збурення в параметрах довільної частини ЕЕС, що виникає у відповідності до сценарію ТрЗ або є наслідком аварійної ситуації, призводить до запуску моделюючого комплексу збуреної частини ЕЕС і послідовному розв'язуванню (6) і

(7) для інших окремих підсистем загальної моделі ОЕС для отримання їх усталених або післяаварійних режимів.

Нові результати розрахунку інших частин ОЕС можуть викликати новий розрахунок струмів гілок–хорд, які є прилеглими до граничних вузлів різних частин загальної моделі ОЕС. Процес закінчується за умови досягнення заданої точності розрахунків по напрузі і потужності у всіх вузлах загальної мережі ОЕС.

З метою пошуку методів, що забезпечують можливість зменшення часу розрахунку режиму роботи великих ЕЕС були запропоновані та досліджені параметричні методи.

Розглянуто метод чисельного розв'язку системи нелінійних рівнянь (3) для $\hat{O}(x)=0$, де x є елемент евклідова простору E^n , а компоненти $\Phi_j(x)$, $j=1,\dots,n$, вектору $\hat{O}(x)$ є досить гладкими функціями. Як x розглядаються напруги вузлів.

Для матриці S , що містить $n-1$ стовпець, виконується рівність

$$S^*S = I_{n-1}, S^*\Phi(x_k) = 0. \quad (8)$$

Тут і далі зірочка на місці верхнього індексу – знак транспонування, а I_i – одинична матриця порядку i .

Якщо в околі розв'язання x_* якобіан $\Phi'(x)$ не вироджений, то досить близька до x_* точка x_k з'єднується з розв'язкою кривої М:

$$M = \{x : S^*\Phi(x) = 0\}. \quad (9)$$

Крім того, якщо $x(\alpha)$ – параметризація багатovidу (9), а $\alpha_* = \arg \min F[x(\alpha)]$, де $F(x) = \frac{1}{2} \|\Phi(x)\|^2$, то $x(\alpha_*) = x_*$.

Вектор $\Phi(x)$ зберігає напрям уздовж кривої (9), змінюється тільки його довжина. Дотична до кривої (9) збігається з ньютонівським напрямом і тому побудова лінійної апроксимації параметризації $x(\alpha)$ відповідає методу Ньютона.

В просторі точок $[x, y] \in E^{n+1}$ розглядається багатovid

$$M_y = \{[x, y] : \Phi(x) + y\Phi(x_k) = 0\}. \quad (10)$$

Якщо $y_0 = -1$, то $[x_k, y_0] \in M_y$.

Припускаючи, що $\hat{O}'(x_k)$ – невироджена матриця, параметризація багатovidу (8) розглядається у формі

$$x(\alpha) = x_k + \alpha p_x + u(\alpha) \quad (11)$$

$$y(\alpha) = y_0 + \alpha, \quad (12)$$

де $p_x = -\Phi'^{-1}(x_k)\Phi(x_k)$, а $u(\alpha)$ – таке відображення $E^1 \rightarrow E^n$, що

$$\Psi[x(\alpha), y(\alpha)] = \Phi[x(\alpha)] + y(\alpha)\Phi(x_k) = 0. \quad (13)$$

З (9) витікає, що $y(1) = 0$. Точка $[x(1), y(1)] \in M_y$, тобто $\Phi[x(1)] = 0$, і тому для побудови чергового наближення необхідно вміти обчислювати вектор $x(1)$, апроксимуючи нелінійне відображення $u(\alpha)$ в околі точки $\alpha = 0$. Це означає, що треба визначити вектори $u'(0), u''(0)$ і так далі для подальшого створення різних апроксимацій, наприклад, таких:

$$\bar{x}(\alpha) = x_k + \alpha p_x + \bar{u}(\alpha)$$

$$\bar{u}(\alpha) = \alpha u'(0) + \frac{1}{2} \alpha^2 u''(0) + \frac{1}{6} \alpha^3 u^{(3)}(0) + \frac{1}{24} \alpha^4 u^{(4)}(0) \quad (14)$$

Вектори $u'(0), u''(0)$ і т. ін. обчислюються послідовним диференціюванням виразу (3) по α . З рівняння

$$(\hat{O}'_i[x(0)x'(0), x'(0)]) + (\hat{O}'_i[x(0)], u''(0)) = 0 \quad (15)$$

отримуємо $u''(0) = 0$. Похідні по α від компонент вектору (12) мають вигляд

$$\hat{O}'[x_k][p_x + u'(0)] + \hat{O}(x_k) = 0 \quad (16)$$

звідки

$$\Phi'(x_k)u''(0) = - \begin{bmatrix} (\Phi'_i(x_k)p_x, p_x) \\ \dots \\ (\Phi'_n(x_k)p_x, p_x) \end{bmatrix} \quad (17)$$

Якщо позначити $F_i(x, p) = \Phi'_i(x)p$, p і диференціюючи вирази (8) ще двічі, отримаємо рівняння для визначення векторів $u^{(3)}(0), u^{(4)}(0)$:

$$\Phi'(x_k)u^{(3)}(0) = -3 \begin{bmatrix} (\Phi'_i(x_k)u''(0), p_x) \\ \dots \\ (\Phi'_n(x_k)u''(0), p_x) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (F'_1(x_k, p_x), p_x) \\ \dots \\ (F'_n(x_k, p_x), p_x) \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \Phi'(x_k)u^{(4)}(0) = & -4 \begin{bmatrix} (\Phi'_i(x_k)u^{(3)}(0), p_x) \\ \dots \\ (\Phi'_n(x_k)u^{(3)}(0), p_x) \end{bmatrix} - 3 \begin{bmatrix} (\Phi'_i(x_k)u''(0), u''(0)) \\ \dots \\ (\Phi'_n(x_k)u''(0), u''(0)) \end{bmatrix} - \\ & -4 \begin{bmatrix} (F'_1(x_k, p_x), u''(0)) \\ \dots \\ (F'_n(x_k, p_x), u''(0)) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (F'_1(x_k, p_x), p_x, p_x) \\ \dots \\ (F'_n(x_k, p_x), p_x, p_x) \end{bmatrix} \quad (19) \end{aligned}$$

Побудова параметризації (11), (12) можлива для невідродженої матриці $\Phi'(x_k)$.

Якщо виявилось, що ранг $\Phi'(x_k)$ менше від n і в розбитті

$$\Phi'(x_k) = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \quad (20)$$

матриця A_{11} , порядку $m < n$ є невідродженою, то можна побудувати параметризацію багатовиду:

$$M_m = \{[x, y]: \Psi(x, y) = \varphi(x) + y\varphi_m(x_k) = 0\} \quad (21)$$

Тут $\varphi_m(x)$ – вектор з компонентами $\Phi_i(x), i = 1, \dots, m$. Нехай також $\varphi_{n-m}(x)$ – вектор з компонентами $\Phi_i(x), i = m+1, \dots, n$, а вектор x розіб'ємо на частини таким чином: $x = [\xi, \eta], \xi \in E^{n-m}$.

Градiєнт функції F на поверхні $x(z, \gamma)$ у точці x_k має вигляд

$$F'_{z\gamma}[x(0,0)] = x_{z\gamma}^*(0,0)F'(x_k) = - \begin{bmatrix} p_z \\ \gamma_k \end{bmatrix},$$

де

$$p_z = A_{12}^* A_{11}^{*-1} A_{21}^* \varphi_{n-m}(x_k) - A_{22}^* \varphi_{n-m}(x_k), \quad (22)$$

$$\gamma_k = \|\varphi_m(x_k)\|^2 + \varphi_m^*(x_k) A_{11}^{*-1} A_{21}^* \varphi_{n-m}(x_k). \quad (23)$$

Переміщаючись по кривій $x(\alpha) = x(\alpha p_z, \alpha \gamma_k)$ з точки x_k ми зменшуємо значення F і при $\alpha_k = \gamma - 1_k$ потрапляємо на поверхню $x(z, \gamma_*)$, де $\varphi_m(x) = 0$.

Вважаємо $v(\alpha) = u(\alpha p_z, \alpha \gamma_k)$. Для апроксимації кривої $x(\alpha)$ побудуємо рівняння для визначення векторів $v'(0), v''(0)$ і так далі. З (21) витікає, що

$$\Phi_i[x(\alpha p_z, \alpha \gamma_k)] + y(\alpha \gamma_k) \Phi_i(x_k) = 0, i = 1, \dots, m,$$

звідки

$$(\Phi'_{i\xi}(x_k), v'(0)) + (\Phi'_{i\eta}(x_k), p_z) + \Phi_i(x_k) \gamma_k = 0, \quad (24)$$

$$A_{11} v'(0) = -[A_{12} p_z + \gamma_k \varphi_m(x_k)] \quad (25)$$

Диференціюючи по α вирази (24), отримуємо рівняння для визначення вектору $v''(0)$:

$$A_{11} v''(0) = - \begin{bmatrix} (\Phi''_{1\xi\xi}(x_k) v'(0), v'(0)) \\ \dots \\ (\Phi''_{m\xi\xi}(x_k) v'(0), v'(0)) \end{bmatrix} - 2 \begin{bmatrix} (\Phi''_{1\xi\eta}(x_k) p_z, v'(0)) \\ \dots \\ (\Phi''_{m\xi\eta}(x_k) p_z, v'(0)) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (\Phi''_{1\eta\eta}(x_k) p_z, p_z) \\ \dots \\ (\Phi''_{m\eta\eta}(x_k) p_z, p_z) \end{bmatrix}. \quad (26)$$

Аналогічно можна визначити вектори $v^{(3)}(0)$ і так далі, а на основі векторів $v'(0), v''(0)$ будується апроксимація кривої $x(\alpha)$ такого виду:

$$\bar{x}(\alpha) = \begin{bmatrix} \xi(\alpha p_z, \alpha \gamma_k) \\ \eta(\alpha p_z, \alpha \gamma_k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi_k + \alpha v'(0) + \frac{1}{2} \alpha^2 v''(0) \\ \eta_k + \alpha p_z \end{bmatrix} \quad (27)$$

Обчислювальна схема методу рішення рівнянь $\Phi(x) = 0$. має наступні кроки.

1. У точці x_k обчислюється матриця $A = \Phi'(x_k)$. Якщо в процесі факторизації A одним з вибраних способів виявилось, що A вироджена, то переходимо до п. 2. Якщо A – невироджена матриця, то розв'язуємо рівняння $A p_x = -\Phi(x_k)$ відносно p_x . Послідовно формуємо праві частини в рівняннях (7), (18), (19), розв'язуємо їх відносно векторів $u''(0), u^{(3)}(0), u^{(4)}(0)$. З використанням формули (19) формуємо криву $\bar{x}(\alpha) = x_k + \alpha p_z + \bar{u}(\alpha)$, вважаємо $\alpha_* = 1$ і переходимо до п. 3.

2. За формулами (18), (19) обчислюємо вектор p_z і число γ_k . Формуємо праву частину рівняння (17) і розв'язуємо його відносно $v'(0)$. Потім обчислюємо праву частину рівняння (18) і розв'язуємо його відносно вектору $v''(0)$. За формулою (18) будуємо криву $\bar{x}(\alpha)$, вважаємо $\alpha_* = \gamma_k^{-1}$ і переходимо до п. 3.

3. Вважаємо $x_{k+1} = \bar{x}(\alpha_k)$, де α_k вибирається з умови

$$F(x_{k+1}) - F(x_k) \leq -\alpha_k \varepsilon \|\Phi(x_k)\|^2, 0 < \varepsilon < \frac{1}{4}. \quad (28)$$

Виконання нерівності (28) забезпечується поділом навпіл кроку α_k , починаючи з величини α_* .

Якщо для апроксимації кривої (11) використати у формулі (14) не четвертий порядок похідних вектор-функції $u(\alpha)$, а i -й порядок, $i \geq 2$, то оцінка швидкості збіжності буде такою:

$$\|x_{k+1} - x_*\| \leq C \|x_k - x_*\|^{i+1}.$$

У загальному випадку четвертий порядок апроксимації реалізується важко, оскільки в правих частинах рівнянь (18), (19) фігурують треті і четверті похідні.

Проте у задачах розрахунку режимів рівняння $\Phi_j(x)=0$ квадратичні відносно x і похідні вище другого порядку дорівнюють нулю. Нехай вектор $r(p_1, p_2)$ має компоненти $(\Phi_j''(x_k)_{p_1, p_2})$, $j = 1, \dots, n$. Тоді для таких квадратичних завдань рівняння (17), (18),

(18) приймають вид відповідно

$$\Phi'(x_k)u''(0) = -r(p_x, p_x)$$

$$\Phi'(x_k)u^{(3)}(0) = -3r(u''(0), p_x)$$

$$\Phi'(x_k)u^{(4)}(0) = -4r(u^{(3)}(0), p_x) - 3r(u''(0), u''(0))$$

У завданнях розрахунку режимів роботи електричних мереж рівняння $\hat{O}_j(x) = 0$ такі, що матриці $\Phi_j''(x)$ складаються з одного ненульового стовпця і одного ненульового рядка. Це дає змогу будувати апроксимації типу (14) будь-якого порядку, обмежуючись тільки другими похідними.

В цих випадках потрібно мати адаптивні алгоритми для забезпечення збіжності розрахунків. В роботі запропонований ефективний алгоритм адаптивного розвантаження схеми для класу задач реального часу з метою гарантованого отримання достовірного результату та визначення потрібних дій, що відповідають за цей результат.

Окрім цього, розроблено новий алгоритм визначення оптимальних значень коефіцієнтів прискорення ітераційних процесів розрахунку режимів роботи ЕМ за допомогою запропонованого автором 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 численні приклади, 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 мереж 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 є 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:

$$x_j = \frac{k_j - k_j^0}{\Delta k_j}, \quad j = 1, 3;$$

$$\text{де } k_j^0 = \frac{k}{j_{\max}^2 \min} - \text{основний рівень фактору } k_j, \Delta k_j = \frac{k}{j_{\max}^2 \min} - \text{інтервал варію-$$

вання, k_j^{\max} та k_j^{\min} – відповідно верхній та нижній рівні фактору k_j .

Априорний аналіз функцій відгуку показав, що зміну кількості ітерацій Y доцільно описати рівнянням регресії наступного виду:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3, \quad (29)$$

Коефіцієнти рівняння регресії (29) у загальному вигляді визначаються за методом найменших квадратів наступним чином:

$$B = (X^T X)^{-1} X^T Y$$

В таблиці 2 наведена структура плану ПФЕ для тестової ЕМ із 14 вузлів.

Користуючись наведеними в таблиці 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 2

№ дослід- ду	Фактори у натуральному ма- сштабі			Фактори у безрозмірній сис- темі координат			Y
	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.

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: $\sigma = 3,24 \cdot 10^{-16}$, 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 методом дихотомії.

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 дає змогу забезпечити оптимальні швидкісні характеристики не тільки багатоопорного методу розрахунку струмів контурів, а і методу Ньютона-Рафсона.

В таблиці 3 наведено порівняльні результати розрахунків досліджуваних методів моделювання режимів роботи великих ЕЕС.

Таблиця 3.

№	Найменування ЕЕС	Кількість вузлів ЕМ	Кількість контурів ЕМ	Час розрахунку, сек			
				Локальне середовище		Розподілене середовище	
				Метод Ньютона- Рафсона	БОМ розра- хунку стру- мів контурів	Метод Нью- тона- Рафсона	БОМ розра- хунку стру- мів контурів
1.	Західна	2010	617	1.023	0.311	1.657	0.131
2.	Південно Західна	1804	303	0.905	0.315	1.341	0.127
3.	Південна	1506	356	0.801	0.243	1.289	0.065
4.	Центральна	2503	471	1.084	0.312	1.597	0.099
5.	Північна	5007	905	1.326	0.431	1.943	0.107
6.	Кримська	1650	323	0.852	0.274	1.358	0.093
7.	Донбаська	2118	375	0.954	0.312	1.412	0.089
8.	ОЕС України	13158	9628	3.671	1.191	3.981	0.959

Відомо, що режими роботи великих ЕЕС в загальному вигляді описуються математичною моделлю у вигляді системи алгебро-диференціальних рівнянь високої розмірності.

У разі потреби вирішення конкретних електроенергетичних завдань реального часу в комп'ютерних веб-орієнтованих тренажерах, як правило, ретельно досліджують та вибирають відповідну систему допущень, спрощень і умов, які можуть забезпечити необхідну точність і адекватність результатів розрахунку задач цього класу.

Найбільш загальною математичною моделлю для цих цілей вважається повна система диференціальних рівнянь Парка-Горева в системі прямокутних координат (осях) $d-q$, які обертаються разом з ротором. Використані рівняння досить адекватно описують режими роботи синхронних генераторів ЕЕС в нормальних і аварійних перехідних процесах і були реалізовані в моделюючому комплексі ПОРТ:

$$\frac{d\psi_d}{dt} = -\omega_s \cdot (u_d + r \cdot i_d + (1 + s) \cdot \psi_q) \quad (30)$$

$$\frac{d\psi_q}{dt} = -\omega_s \cdot (u_q + r \cdot i_q + (1 + s) \cdot \psi_d) \quad (31)$$

$$\frac{d\psi_r}{dt} = \frac{1}{T_r} (E_r - E_q) \quad (32)$$

$$\frac{d\psi_{rdi}}{dt} = -\frac{1}{T_{rdi}} E_{rqi} \quad (33)$$

$$\frac{d\psi_{rqk}}{dt} = \frac{1}{T_{rqk}} E_{rak} \quad (34)$$

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{T_j} \cdot (M_T - M_E) \quad (35)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_s \cdot (s - s_v) \quad (36)$$

де ψ_{rdi} , ψ_{rqk} – потокозчеплення обмотки збудження, поздовжнього і поперечного демпферних контурів;

u_d , u_q – напруга на обмотках статора поздовжнього і поперечного контурів;

i_d, i_q – струм обмоток статора поздовжнього і поперечного контурів;

s – ковзання генератора;

r – активний опір обмотки статора;

T_r, T_{rdi}, T_{rqk} – постійні часу відповідно обмотки збудження, поздовжнього і поперечного демпферних контурів при розімкнених обмотках статора і збудження;

E_q, E_{rak}, E_{rqi} – ЕРС, індуковані в статорі магнітним полем струмів відповідних контурів;

E_r – напруга що прикладена до обмотки збудження;

M_T – еквівалентний вихідний параметр парової турбіни;

M_E – еквівалентна електрична потужність генератора;

T_j – час інерції генератора;

ω_s – кутова швидкість генератора.

Початкова система диференціальних рівнянь руху роторів синхронних генераторів (30) – (36) послідовно розв'язується для кожного генератора ЕЕС методом Рунге-Кутти 4-го порядку з урахуванням нелінійних обмежень.

Основними тестовими схемами для проведення чисельних експериментів з метою підтвердження отриманих результатів були вибрані дві широко відомі спеціально призначені для цієї цілі тестові схеми з 14 і 37 вузлами, а також схеми Західної, Південно-Західної, Південної, Центральної, Північної, Дніпровської ЕЕС і високонвольтної схеми 220 ... 750кВ ПрАТ "НЕК "Укренерго" (зимовий максимуми і літній мінімум). Для дослідження алгоритмів і програм розрахунків тривалих електро-механічних перехідних процесів була створена схема демо версії (51 вузол на базі Західної, Південно-Західної ЕЕС та іншої еквівалентної частини ОЕС), яка в цілому адекватно відображає поведінку режимів ЕЕС цієї частини ОЕС України.

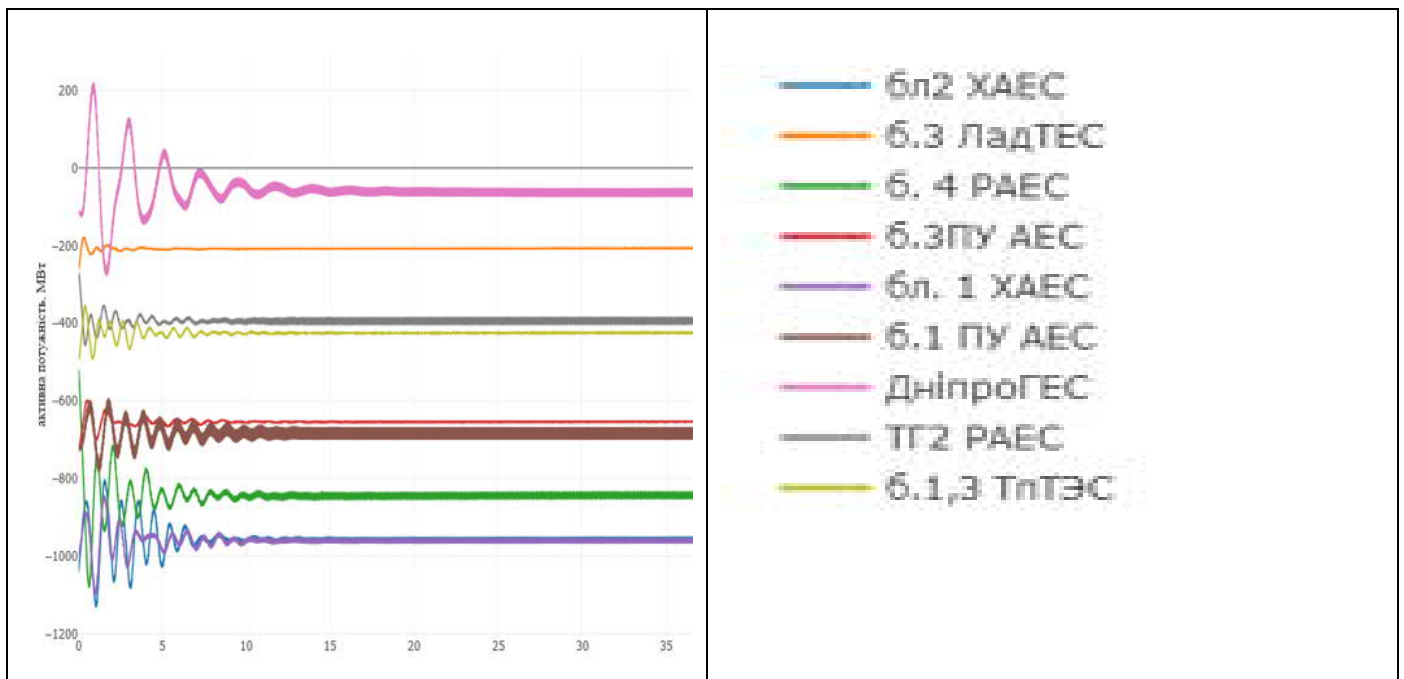


Рис. 6. Графік генерації активної потужності СГ блоків АЕС

Результати перехідних процесів найбільш важливих для прийняття рішень параметрів синхронних генераторів для демо версії наведено на рис. 6. Зовнішнім збудженням є: вимкнення лінії 750 кВ РАЕС – Київська.

В четвертому розділі розглянуто теоретико-методологічні основи комп'ютерних технологій конструювання веб-орієнтованих тренажерних систем підготовки оперативно-диспетчерського персоналу в МЕМ.

Нині у світі дуже швидко розвиваються і широко використовуються віртуальні інформаційні технології, тому в роботі виконано аналіз властивостей та можливостей застосування віртуальних технологій у веб-орієнтованих розподілених тренажерних системах підготовки персоналу.

Під віртуальним середовищем моделюючої системи, використовуваної для підготовки персоналу в МЕМ, розумітимемо сукупність розподілених систем серверів додатків і систем управління базами даних (СУБД), включаючи віртуальні, розподілене середовище моделювання режимів роботи ЕЕС, адаптивні інтерактивні інтерфейси і навчально-методичне забезпечення для організації і проведення процесів навчання, підвищення кваліфікації і тренажерної підготовки з урахуванням кібербезпеки.

Віртуальні веб-орієнтовані тренажери є інтерактивними програмними комплексами для формування і розвитку ключових компетентностей оперативно-диспетчерського персоналу.

Можливості віртуальної реальності в аварійних ситуаціях роблять ефект повного занурення, що особливо важливо саме для аварійних і небезпечних ситуаціях.

Віртуальні тренажери простіше допрацювати, відновити і розповсюдити. У них завжди можуть бути внесені зміни, завжди доступні усім користувачам Інтернету.

В роботі аналізувались дві віртуальні платформи VMware – платна і XEN/KVM – умовно безкоштовна з відкритим кодом. Кращі швидкісні показники були отримані на XEN. Для операційної системи SUSE Linux ця технологія є вбудованою, вона легко інтегрується з віддаленими серверами і БД.

Розподілена система баз даних (РСБД) і серверів додатків обчислювальної мережі (ОМ) веб-орієнтованої тренажерної системи об'єднана в глобальну мережу (ГМ) і може функціонувати у складі приватної або загальної корпоративної хмарної інфраструктури з доступом в Інтернет.

Окремі бази даних і сервери додатків, включаючи віртуальні, можуть встановлюватися в різних, зручних для цих цілей, місцях (АЕС, ТЕС, ГЕС, енергопостачальні компанії та ін.).

Така структура ГМ дає змогу досить адекватно і швидко моделювати різноманітні аварійні режими паралельно працюючих ЕЕС і/ОЕС. На рис 7. наведена загальна структура віртуального розподіленого моделюючого середовища для ОЕС України.

В роботі розвинуто теоретичні та методологічні основи функціонування моделюючого комплексу веб-орієнтованих тренажерно-моделюючих систем підготовки персоналу, запропоновані принципи побудови ефективних методів розрахунку параметрів режимів роботи великих ЕЕС.

Запропонована ієрархічна декомпозиція великих ЕЕС, яка полягає у наступному.

У складі будь-якої великої ЕЕС або ОЕС завжди є адміністративно-територіальні підприємства (АТП), які мають свою систему диспетчерського управління. Тому перший рівень ієрархічної декомпозиції може бути представлений виділеними АТП, об'єднаними відповідними лініями електропередачі і які є хордами для цього рівня мережі (рис. 8).

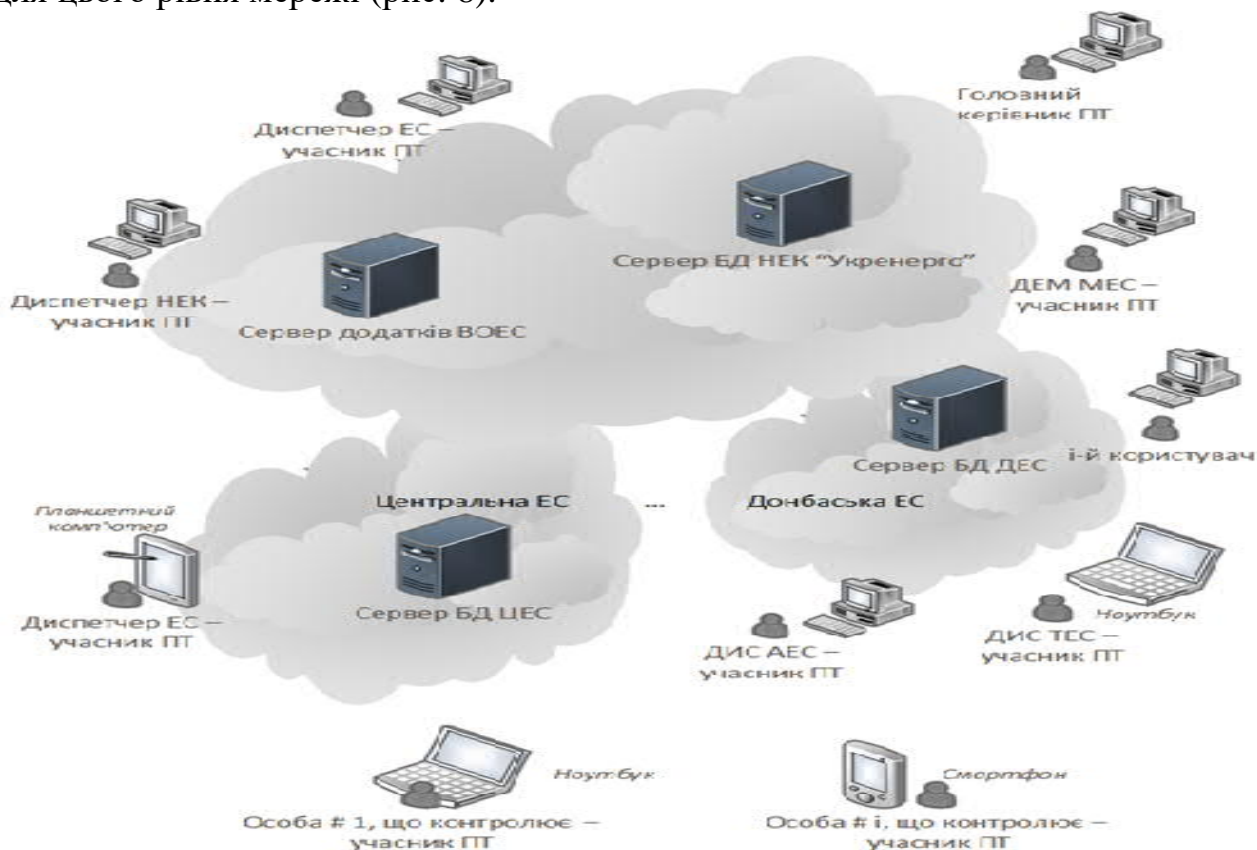


Рис. 7. Загальний склад та структура віртуального розподіленого моделюючого середовища ОЕС України

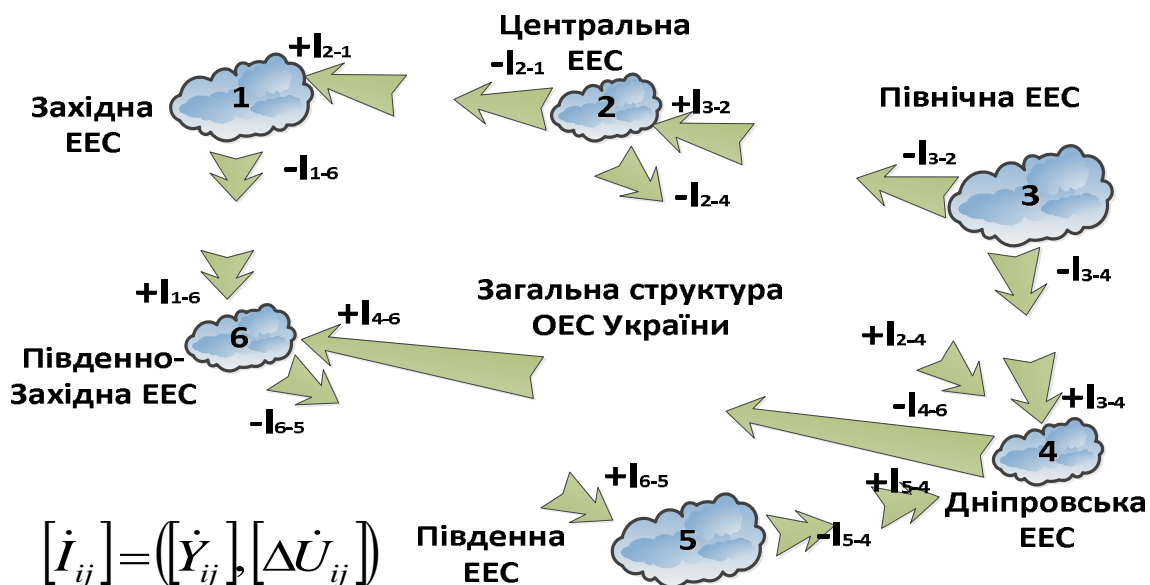


Рис. 8. Перший рівень ієрархічної декомпозиції ОЕС України

Це дає змогу розраховувати і аналізувати режими роботи виділених АТП незалежно від інших, якщо відповідні потужності (або струми) об'єднуючих ліній електропередачі будуть враховані у вузлах початку і кінця хорд.

Ретроспективний аналіз розвитку методів розрахунку режимів роботи великих ЕЕС засвідчує велику актуальність цієї проблеми у всьому науковому світі та підтверджує необхідність подальших досліджень і пошуку відповідних та належних систем допущень, що завжди приймаються, для найбільш ефективного розв'язання задач моделювання режимів для різних умов функціонування індивідуально.

Досліджено можливості, переваги і недоліки використання розподіленого віртуального середовища для моделювання режимів роботи великих ЕЕС та ОЕС.

Головним недоліком розподіленого середовища моделювання з використанням технологій Інтернету є деяка невизначеність з часом обміну інформацією між серверами додатків та БД. Серед переваг – можливість масштабування і гнучкість моделювання режимів роботи великих ЕЕС і ОЕС.

Для деяких збурень, пов'язаних із зміною топології електричної мережі або великим навантаженням режим роботи ЕЕС або ОЕС, таких режимів фізично може не існувати і тому немає збіжності ітераційного процесу розрахунку режиму (Рис.9).

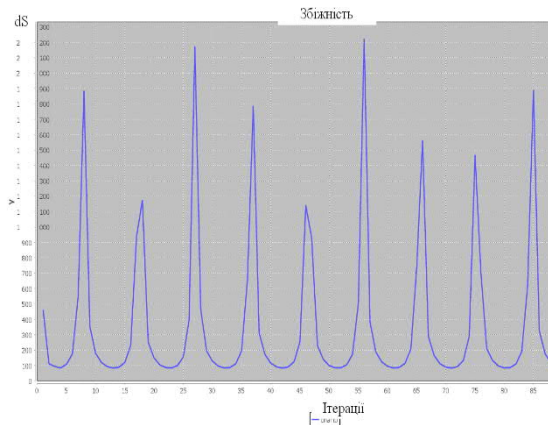


Рис. 9. Ітераційний процес не збігається

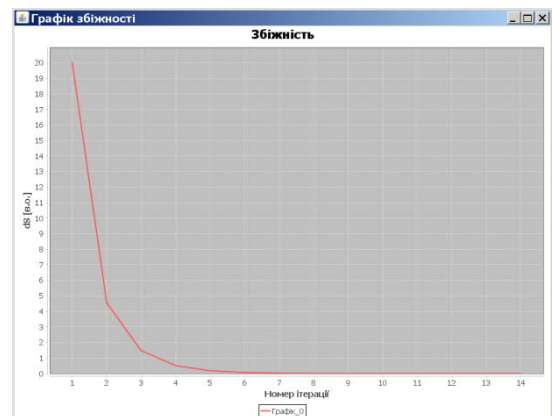


Рис. 10. Ітераційний процес збігається

В таких випадках потрібно мати методи, які забезпечують збіжність ітераційних процесів. В роботі запропонований підхід адаптивного розвантаження ЕМ з метою отримання достовірного результату та визначення потрібних дій, що відповідають за цей результат (рис. 10).

Дослідження можливостей наявних алгоритмів, методів і засобів синтезу статичних і динамічних відеограм (візуалізація) для відображення не лише результатів моделювання режимів роботи великих ЕЕС в процесі ТрЗ, але і можливих кібератак на об'єкти цих ЕЕС є найважливішим завданням. Його розв'язок дає змогу використати ефективні розподілені тренажерні системи для формування у персоналу навичок не лише ліквідації аварій, але і навичок розпізнавання умов виникнення кіберзагроз. Досліджено найбільш вірогідні напрями кібератак в ОЕС України.

У розробленій веб-орієнтованій тренажерній системі підготовки персоналу МЕМ використовується принцип максимальної подібності образів об'єктів управління та візуалізації реальних елементів систем: диспетчерського щита, панелі управління релейному захисту і автоматики, вимірювальні прилади, сигналізація та ін. Візуальний аналіз даних дає змогу знаходити (ідентифікувати) ознаки і умови вини-

кнення аварійних ситуацій (параметри і стан) експлуатованого устаткування і вибрати міру деталізації для отримання необхідної додаткової інформації про вірогідність виникнення аварії з необхідною точністю. Такі ж ознаки можна використати для моделювання кібератак і навчання персоналу методам їх протидії.

Людино-машинний інтерфейс реалізованої системи тренажерної підготовки виконаний за допомогою стандартних методів і засобів типу діалогових вікон, випадних меню і спливаючих підказок. Процес підготовки сценаріїв штатних і протиаварійних тренувань автоматизований і забезпечений вбудованим редактором-конструктором. Візуалізація результатів моделювання різних режимів роботи енергосистем і етапів кібератак реалізується за допомогою відображення вибраних користувачем атрибутів елементів даних у властивості образів. Таке представлення образів моделювання дає змогу групувати великі об'єми даних з метою повнішого аналізу початкових даних.

Приклад реалізації розробленого методу візуалізації представлений на рис. 11. Найявні повнофункціональні режимні тренажери – найефективніші засоби навчання і тренажерної підготовки, але, в теж час, вони дуже дорогі і орієнтовані, як правило, на моделювання конкретного енергетичного устаткування (функціонуючі АЕС, ТЕС, ЕЕС та ін.). Це ускладнює перенесення і застосування отриманих навичок і знань по ліквідації аварій в подібні частини великих ЕЕС.

Типові сценарії штатних і аварійних протиаварійних тренувань доповнюються результатами моделювання усіх етапів несанкціонованого доступу з необхідною мірою деталізації.

В **п'ятому розділі** дисертації розглядаються питання модельної організації функціонування веб-орієнтованих тренажерних систем підготовки персоналу МЕМ.

Наведено приклади застосування комп'ютерних технологій організації функціонування веб-орієнтованих тренажерних систем підготовки персоналу, заснованих на принципах розподіленого середовища моделювання віртуальної системи підготовки персоналу в МЕМ, яка демонструє її нові функціональні можливості. Головну увагу приділено розв'язанню задач інтеграції підсистем веб-орієнтованих комп'ютерних протиаварійних тренажерів для підготовки персоналу на різних рівнях ієрархічної системи управління ОЕС України.



Рис. 11. Приклад реалізації учбового інтерактивного інтерфейсу

Розглянуто два основних методи конструювання ТрЗ в рамках наявних тренажерних тем: імітаційно-технологічний метод (ІТМ) та сценарно-педагогічний метод (СПМ).

ІТМ створення ТрЗ базується на використанні інформаційної частини моделі ЕЕС або ОЕС та математичної моделі режимів їх роботи в реальному часі.

Реалізація цього методу передбачає наявність заздалегідь підготовленого сценарію ТрЗ, який складається із системи логічних правил, що використовуються для опису моделі діяльності (послідовності відповідних операцій) персоналу з виконання службових інструкцій згідно наявної технології диспетчерського управління.

З метою автоматизації процесів конструювання логічних правил створена інтерактивна інтерфейсна таблиця 4, кожен рядок якої є унікальним правилом з певною умовою або часом виконання цього правила відносно початку ТрЗ. Передбачена можливість формувати 2 типи правил: ті, що використовуються для опису етапів ліквідації аварій (тип USER) – призначені для користувачів і ті, які спрацюють автоматично як заплановані збурення в процесі створення умов виникнення або ліквідації аварій – тренажерні типу TREN (файл заздалегідь запланованих подій).

Таблиця 4. Фрагмент конструктора-редактора логічних правил

№ логічного правила	Тип операції	Правило	Назва дії	Назва ел-ту (вибір із меню)	Диспетчерське найменування (автоматично із БД)	Затримка відносно старту ТЗ (сек.)	Виконати до правила №	Виконати після правила №	Значення параметра
1	Tren	Змінити стан	Відключення ПЛ-330 Шепетівка-Житомир	ПЛ		10	-	-	-
2	Tren	Змінити стан	Встановити активну потужність для вузла 723	Вуз-ли	Північна	30	-	1	440
4	Tren	Змінити стан	Встановити активну генерацію на бл. 1 ХАЕС	Вуз-ли	бл. 1 ХАЕС	70	-	3	-1030
6	User	Змінити стан	Включити ПЛ Шепетівка – Житомир	ПЛ	ПЛ-330 Шепетівка-Житомир	-	-	-	-

Останні, як правило, використовуються для формування першої частини ТрЗ – переліку послідовних дискретних етапів розвитку аварій у вигляді логічних правил із необхідною і достатньою мірою їх деталізації. В процесі створення логічних правил інструктор-викладач використовує схему ЕЕС або ОЕС із параметрами режиму (рис. 12), конструктор-редактор для створення послідовних логічних правил із допоміж-

ними функціями: запустити або зупинити ТрЗ, зберегти вихідний стан схеми для ТрЗ, відновити вихідний стан схеми для ТрЗ, запустити на виконання будь-яке логічне правило і таке ін.

Передбачена можливість конструювати логічні дії для моделювання телефонних діалогів диспетчерів із використанням 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 дає змогу створювати правила для моделювання роботи пристроїв релейного захисту і автоматики (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 струмової відсічки лінії електропередачі можлива при умові досягнення струму, більше максимально заданої величини – уставки струму.

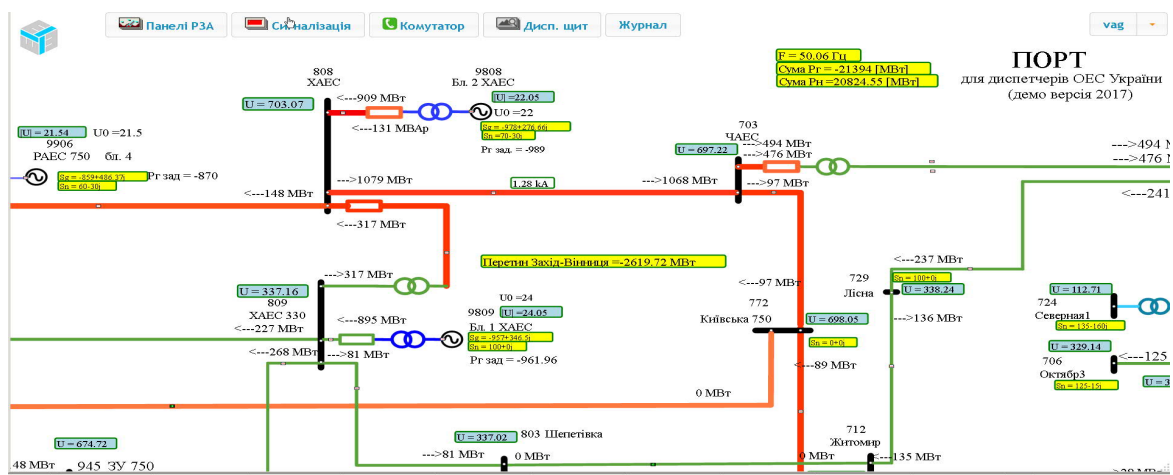


Рис. 12. Приклад моделі ЕЕС для створення ТрЗ

Розглянуто також СПМ створення ТрЗ, запропонований д.т.н., проф. Самойловим В.Д., який базується на застосуванні методів ситуаційного моделювання.

В цьому методі всі логічні правила ТрЗ будуються у відповідності із його метою. Кожен крок сценарію заздалегідь створюється за допомогою моделюючого комплексу, який дає змогу конструювати результати розрахунку режимів у вигляді поліноміальних функцій. Ці функції дають змогу відображати реакцію тренажерної системи на довільні збурення в електричних схемах розрахунку режиму в реальному часі.

Проблеми формалізації і моделювання причинно-наслідкових зв'язків в електроенергетичних системах досліджувалися у великій кількості робіт. Доцільно розрізняти три типи причинно-наслідкових зв'язків (ПНЗ).

Дискретна ПНЗ починається перевіркою деякої логічної умови і завершується виконанням однієї з альтернативних дій залежно від відповіді ТАК або НІ:

$$\mathbf{ЯКЩО} \langle \text{ця умова задовольняється} \rangle, \mathbf{ТО} \langle \text{ця дія виконується} \rangle \quad (37)$$

Дія ПНЗ дискретного типу спрямована на зміну положення одного або групи комутаційних апаратів, що змінюють конфігурацію ЕМ.

Наприклад, якщо частота в енергосистемі впродовж заданого інтервалу часу менше заданої величини, то спрацьовує певна черга автоматичного частотного розвантаження. Умова ПНЗ дискретного типу може бути відносно складною і включати значну кількість елементарних логічних функцій.

В результаті сукупності дій дискретних ПНЗ виникають певні дискретні стани ЕМ. Можливі переходи між різними дискретними станами однієї і тієї ж системи можна представити графом дискретних станів (ГДС).

Дискретний стан електричної системи може бути рівноважним, якщо в ньому досягнуті баланси моментів, що обертаються на валах усіх синхронних генераторів (СГ), і нерівноважним, якщо такого балансу хоч би на одному СГ немає. У рівноважних станах ЕЕС спостерігаються тільки статичні ПНЗ, які можна виразити матричним співвідношенням:

$$\Delta Y = \left(\frac{\partial Y}{\partial X} \right) \cdot \Delta X, \quad (38)$$

Тут X – вектор характеристик режиму електричної системи, що розглядаються в ролі причин;

Y – вектор характеристик режиму, що розглядаються в ролі наслідків;

Δ – оператори малих відхилень від початкового режиму;

$\frac{\partial Y}{\partial X}$ – матриця частинних похідних від наслідків з причин.

Кожен елемент матриці $\frac{\partial Y}{\partial X}$ є функцією параметрів електричної системи і координат X, Y . У загальному випадку розмірності векторів X і Y не збігаються і матриця частинних похідних виявляється прямокутною.

Під час вирішення конкретних завдань може знадобитися звернення причинно-наслідковому зв'язку (38). Якщо розмірність векторів X і Y однакові, матриця $\frac{\partial Y}{\partial X}$ квадратна і операція звернення ПНЗ зводиться до добре освоєної в аналізі електричних систем. У загальному випадку в разі прямокутної матриці результат звернення статичної ПНЗ має вигляд

$$\Delta X = \left(\frac{\partial Y}{\partial X} \right)^{-1} \cdot \Delta Y, \quad (39)$$

де $\left(\frac{\partial Y}{\partial X} \right)^{-1}$ – псевдо обернена матриця.

У нерівноважних станах електричної системи спостерігаються також динамічні ПНЗ, загальне вираження яких може мати вигляд

$$\Delta Y^{(i+1)} = \left(\frac{\partial Y}{\partial X} \right)^{(i+1/i)} \cdot \Delta X^{(i)}, \quad (40)$$

Тут символи X, Y, Δ мають сенс, аналогічний (31) і (32).

Індекс i відповідає номеру кроку чисельної інтеграції перехідного процесу.

Матриця $\left(\frac{\partial Y}{\partial X} \right)^{(i+1/i)}$ містить коефіцієнти переходу від причин на i -му кроці до наслідків на $(i+1)$ кроці. До формули (38) в загальному випадку застосовна операція псевдо звертання, а у разі квадратної матриці – операція звичайного звернення з урахуванням тієї обставини, що звернення динамічної ПНЗ означає, окрім зміни ролей причин і наслідків, також і зміна напрямку часу.

Кількісними характеристиками ПНЗ є граничні значення змінних в логічних умовах (37) і елементи матриць у виразах (39) – (40). Для оцінки цих характеристик можна застосувати відомі методи аналізу електричних систем.

Для проведення чисельних експериментів та дослідження перехідних процесів в ОЕС України, як це було згадано вище, була створена тестова схема на базі даних Південно-Західної ЕЕС та еквівалентної іншої частини ОЕС України (Рис. 12). Передбачені можливості досліджувати умови виникнення низькочастотних коливань, різкого підвищення та зниження частоти, що може привести до аварійної ситуації з розділенням системи на окремі частини.

Розроблена та запропонована типова тематика сценаріїв протиаварійних тренувань оперативно-диспетчерського персоналу, яка передбачає можливість перевірки дій оперативного персоналу та формування стійких навичок з ліквідації аварійних ситуацій через пониження частоти (при відділенні енергосистеми чи її частини від ОЕС України), в разі виникненні надлишку потужності, що супроводжується підвищенням частоти, запобігання технологічним порушенням (аваріям) в разі відключенні ліній електропередачі або іншого устаткування, в разі пониженні напруги в основних вузлових пунктах енергосистеми, в разі підвищення рівнів напруги на устаткуванні, понад допустимі значення, ліквідації порушення синхронної роботи окремих частин енергосистем і електростанцій та багато інших.

Розроблена та запропонована система оцінки компетентності персоналу за допомогою енергетичного рейтингу, суть якої полягає у використанні імовірнісної системи оцінок згідно з методикою професора А. Ело в шахах.

В додатках наведені акти впровадження результатів роботи в ЕЕС ПрАТ «НЕК «Укренерго». Також в **додатках** роботи наведено учбово-методичне забезпечення для організації та підтримки функціонування веб-орієнтованої тренажерної системи навчання та тренажерної підготовки оперативно-диспетчерського персоналу МЕМ.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі 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.

Отримані результати дають підстави сформулювати відповідні висновки та рекомендації, що мають теоретичне й практичне значення.

1. Запропонована та реалізована система автоматизованої побудови сценаріїв протиаварійних тренувань та тренувальних занять, які базуються на розроблених в роботі математичних моделях, методах і алгоритмах розрахунків режимів роботи електричних мереж, досліджені динамічні властивості об'єктів МЕМ ЕЕС і ОЕС, виявлені особливості штатних та аварійних режимів їх роботи, що дає змогу будувати моделі тренувальних занять у вигляді семантичної мережі управління об'єктами електричних мереж з використанням моделей професійної діяльності персоналу і створювати умови та можливості для поетапної розробки мережі сучасної веб-орієнтованої професійної системи підготовки оперативно-диспетчерського персона-

лу МЕМ ОЕС України на базі наявних освітніх організацій та із залученням веб-орієнтованих комп'ютерних технологій.

2. Розв'язана задача 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, яка дає змогу використати переваги розподіленого моделюючого середовища та методи декомпозиції: зберігати окремі частини моделі ОЕС з необхідною мірою деталізації в різних БД та значно спростити доступ до потрібної інформації.

3. Запропонована та реалізована система автоматизації розрахунків режимів роботи великих енергосистем на базі багатопорної топологічної моделі мережі ЕЕС та ОЕС, яка орієнтована на можливість використання розподіленого моделюючого середовища, що дає змогу 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 дає змогу 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 дає змогу 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 дає змогу спростити розробку та створення веб-орієнтованих режимних диспетчерських тренажерів для різних рівнів ієрархічної системи керування великими ЕЕС з використанням розробленою автором 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 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. Юнєва 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:

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

5. Цифровые имитационные тренажеры / [В. А. Гурєєв, 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. Гурєєв, А. И. Ришкевич. // Моделирование в тренажерных системах: Сб. науч. тр. АН УССР. – 1990. – С. 50-56.

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

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

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

10. Гурєєв В. А. Метод одновременного вычисления установившихся режимов и минимальных потерь в электрических сетях / В. А. Гурєєв, 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. Редковский Н. Н. О стратегиях поведения итерационных методов при вырождении якобиана / Н. Н. Редковский, В. А. Гуреев. // 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. Гуреев. // 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. Аветисян О. В. Розробка та застосування віртуальних ієрархічних структур для моделювання режимів, навчання і тренажу персоналу ОЕС України / О. В. Аветисян, В.О. Гуреев, 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., Sanginova O. 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. Юнеєва, Т. М. Гуреева, В. О. Гуреев. // 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. Гуреев В. О. Концепція освітньої професійної мережі центрів системи підготовки персоналу департаменту електрифікації та електропостачання ПАТ "Українська залізниця" / В. О. Гуреев, Ю. Г. Куцан, Л.П. Заїкіна. // Моделювання та інформаційні технології. Збірник наукових праць ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова. – 2017. Вип. 81.– С. 52-61.

27. Гуреев 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. Гуреев, Є.М. Лисенко // Електронне моделювання. – 2018. – №4. – С. 55-64.

29. Гуреев 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 // Электронное моделирование. – 2019. – №1. – С. 81-92.

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

32. Гуреев В.О. Дослідження впливу параметрів прискорення збіжності ітераційних процесів моделювання режимів роботи великих енергосистем/ О.В. Сангинова, 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 / Гуреев 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. Гурєєв В.А., Редковский Н.Н., Суманенков В.Г. Информационная технология управления сложными распределенными техническими системами. тези доповідей I Українська конференція з автоматичного керування. "Автоматика-94". Київ, 18-23 травня 1994, С. 230-231.

36. Гурєєв 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., Гурєєв В.А., Сангинова О.В. Разработка и применение виртуальных иерархических структур для моделирования режимов, обучения и тренажа персонала ОЭС Украины // Матеріали III 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 2019 року. – 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 (ВОЭС) 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 ОЭС Украины / В. Н. Авраменко, Т. М. Гуреева, В. А. Гуреев. // Электрические сети и системы. – 2016. – № 2. – С. 14-20.

АНОТАЦІЯ

Гуреев В.О. Методи і комп'ютерні технології побудови веб-орієнтованих тренажерних систем оперативно-диспетчерського персоналу магістральних електромереж. – 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 НАН України, Київ, 2020.

Дисертація 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 ОЕС України.

Проведено дослідження та розробка комп'ютерного моделюючого комплексу розподіленої тренажерної системи шляхом вирішення великої кількості прикладних і тестових задач, які підтверджують їх адекватність.

Розроблені ефективні методи розрахунку усталених режимів та довготривалих перехідних процесів для використання у веб-орієнтованих розподілених тренажерно-моделюючих системах підготовки персоналу великих ЕЕС і ОЕС.

Теоретичні результати з розроблення моделей та алгоритмів комп'ютерних систем розрахунку режимів роботи великих ЕЕС були використані при розробці веб-орієнтованої тренажерної системи ПОРТ для персоналу підстанцій та ЕЕС ОЕС України. Результати роботи впроваджені на всіх підстанціях ДП "НЕК "Укренерго".

Ключові слова: інформаційна модель, віртуальні технології, сценарії тренувальних завдань, моделювання аварійних режимів, перехідні довготривалі процеси, тренажерна система, учбово-методичне забезпечення, ключові компетентності, методи ліквідації аварій.

АННОТАЦІЯ

Гуреев В.А. Методы и компьютерные технологии создания веб-ориентированных тренажерных систем оперативно-диспетчерского персонала магистральных электросетей. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы. – Институт проблем моделирования в энергетике им. Г.Е. Пухова НАН Украины, Киев, 2020.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-прикладной проблемы разработки теории построения веб-ориентированных тренажерных систем оперативно-диспетчерского персонала магистральных электросетей с учетом особенностей их внедрения, масштабирования и поддержки функционирования в условиях ОЭС Украины.

В работе рассмотрены проблемы и принципы организации существующей системы подготовки, повышения квалификации и контроля компетентностей персонала в магистральных электросетях ОЭС Украины, а также предложены методы, технологии и пути их решения с использованием новейших информационных технологий.

Исследованы проблемы конструирования и применения компьютерных тренажерных систем в магистральных электросетях ОЭС Украины и в развитых странах мира, выполнен анализ научных и технических проблем построения компьютерных тренажеров, распределенных тренажерных систем и теоретические основы технологии их построения, предложена стратегия инновационного развития профессиональной электронной системы обучения и контроля компетентностей оперативно-диспетчерского персонала магистральных электросетей.

Рассмотрена и решена проблема построения веб-ориентированных распределенных тренажерных систем, которая имеет следующие основные составляющие-подпроблемы: разработка концептуальной схемы кластерной базы данных информационной модели ОЭС Украины, разработка моделирующего комплекса, который

работает в распределенной среде, создание системы распределенной визуализации результатов моделирования, которая обеспечивает текущей информации в темпе процесса пользователей и развит веб-ориентированный интерактивный интерфейс с возможностями автоматизированного конструирования тренировочных занятий, отображать диспетчерские щиты, панели релейной защиты, автоматики и обеспечивать в процессе тренажерной подготовки оперативные переключения непосредственно на электрических схемах сетей в браузерах пользователей.

Разработаны эффективные методы расчета установившихся режимов и длительных переходных процессов для использования в веб-ориентированных тренажерных системах подготовки персонала больших ЭЭС и ОЭС.

Теоретические результаты по разработке алгоритмов компьютерных систем расчета режимов работы больших ЭЭС были использованы при создании веб-ориентированной тренажерной системы ПОРТ для персонала подстанций и ЭЭС ОЭС Украины. Результаты работы внедрены на всех высоковольтных подстанциях НЭК "Укрэнерго".

Ключевые слова: информационная модель, виртуальные технологии, сценарии тренировочных заданий, моделирования аварийных режимов, переходные долговременные процессы, тренажерная система, учебно-методическое обеспечение, ключевые компетентности, методы ликвидации аварий.

ABSTRACT

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

Thesis for a Doctor of Sciences Degree in specialty 01.05.02 – Mathematical modeling and computational methods. – Pukhov Institute for Modeling in Energy Engineering, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2020.

The thesis deals with the solution of the actual scientific and applied problem of developing the theory of constructing web-oriented simulating systems for the operational and dispatching personnel of the trunk electric grids, considering the peculiarities of their implementation, scaling, and support of functioning in the conditions of the United Energy System of Ukraine.

The effective methods for calculating steady-state modes and transient long-term processes for web-oriented distributed simulation training systems for large power systems have been developed.

Theoretical results of the development of algorithms for computer systems for calculating the operating modes of large power systems were used to develop a full-featured web mode simulator (FWMS) for substation and power station personnel of the United Energy System of Ukraine. The results of the work were implemented at the substations of the State Enterprise NPC Ukrenergo.

Keywords: information model, virtual technologies, training task scenarios, emergency mode simulation, transient long-term processes, training system, teaching and methodical support, key competencies, emergency response methods.