



**XXXVIII  
НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ  
МОЛОДИХ ВЧЕНИХ ТА СПЕЦІАЛІСТІВ  
ІНСТИТУТУ ПРОБЛЕМ МОДЕЛЮВАННЯ В  
ЕНЕРГЕТИЦІ ІМ. Г.С. ПУХОВА НАН УКРАЇНИ**

**В.С. Подгуренко, В.Е. Терехов**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОИМОСТИ ЭНЕРГИИ, ВЫРАБАТЫВАЕМОЙ  
ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ**

**Киев, 2020**

# Актуальность

---

- Существует проблема подбора ветроэлектрических установок (ВЭУ) для конкретного места строительства.
- ВЭУ должны вырабатывать как можно больше товарной энергии и удовлетворять соотношению цена/качество.
- Уже стало мировой тенденцией, что эффективность работы ВЭУ повышается за счет роста их номинальной мощности. Но всегда ли верно такое решение?

# Задачи исследования

---

- Определить критерий подбора ВЭУ под конкретные ветровые условия.
- Определить наиболее влияющие на критерий подбора параметры ВЭУ и вычислить наиболее подходящие их значения для условий Северного Причерноморья.
- По результатам исследования проанализировать ВЭУ Украины.

# Решение задачи. Критерий подбора ВЭУ

---

- Критерий подбора ВЭУ с одной стороны должен учитывать количество вырабатываемой ВЭУ электроэнергии в заданных ветровых условиях, а с другой – стоимость капитальных затрат на её строительство.
- В работе Jung-Tae Lee и др. [1] определен **критерий оценки стоимости вырабатываемой электроэнергии (СЭ)** в виде соотношения капитальных затрат (КЗ) на строительство ВЭУ к её годовой выработке  $Q_G$ :

$$СЭ = \frac{КЗ}{Q_G} \cdot \left[ \frac{\$}{\text{МВт} \cdot \text{ч}} \right]$$

## Решение задачи. Выбор параметров ВЭУ

---

- Необходимо определить наиболее влияющие на годовую выработку  $Q_G$  параметры ВЭУ и зависимость стоимости капитальных затрат от их величины.
- В работе Подгуренко В.С., Терехов В.Е. [2] детально исследовано влияние параметров ВЭУ (номинальная мощность генератора  $X1$ , диаметр ветроколеса  $X2$  и высота его расположения  $X3$ ) на годовую выработку  $Q_G$  путем условного размещения в ветровые условия Северного Причерноморья 43-х единиц ВЭУ мегаваттного класса ведущих мировых производителей. В результате исследования была получена математическая модель (ММ) годовой выработки ВЭУ  $Q_G$  с заданными параметрами:

$$Q_G = -7125,25 + 1348,594 \cdot X1 + 97,52617 \cdot X2 + 28,81139 \cdot X3. \quad (1)$$

## Решение задачи. Выбор параметров ВЭУ

---

- Её смысл: повышение мощности ВЭУ на 1 МВт ведет к повышению  $Q_G$  на 1348,594 МВт·час; повышение диаметра ВК на 1 м ведет к повышению  $Q_G$  на 97,526 МВт·час; повышение высоты ВК на 1 м ведет к повышению  $Q_G$  на 28,811 МВт·час.
- Очевидно, что при равных установленных мощностях ( $XI$ ) КЗ на ВЭУ с более высокой башней и/или бóльшим размером лопастей будут выше.
- В мировой практике широко применяется критерий стоимости капитальных затрат на 1 МВт установленной мощности (далее –  $KZ_1$ ):

$$KZ_1 = \frac{KZ}{XI} \cdot \left[ \frac{\$}{\text{МВт}} \right]$$

# Решение задачи. Стоимость КЗ

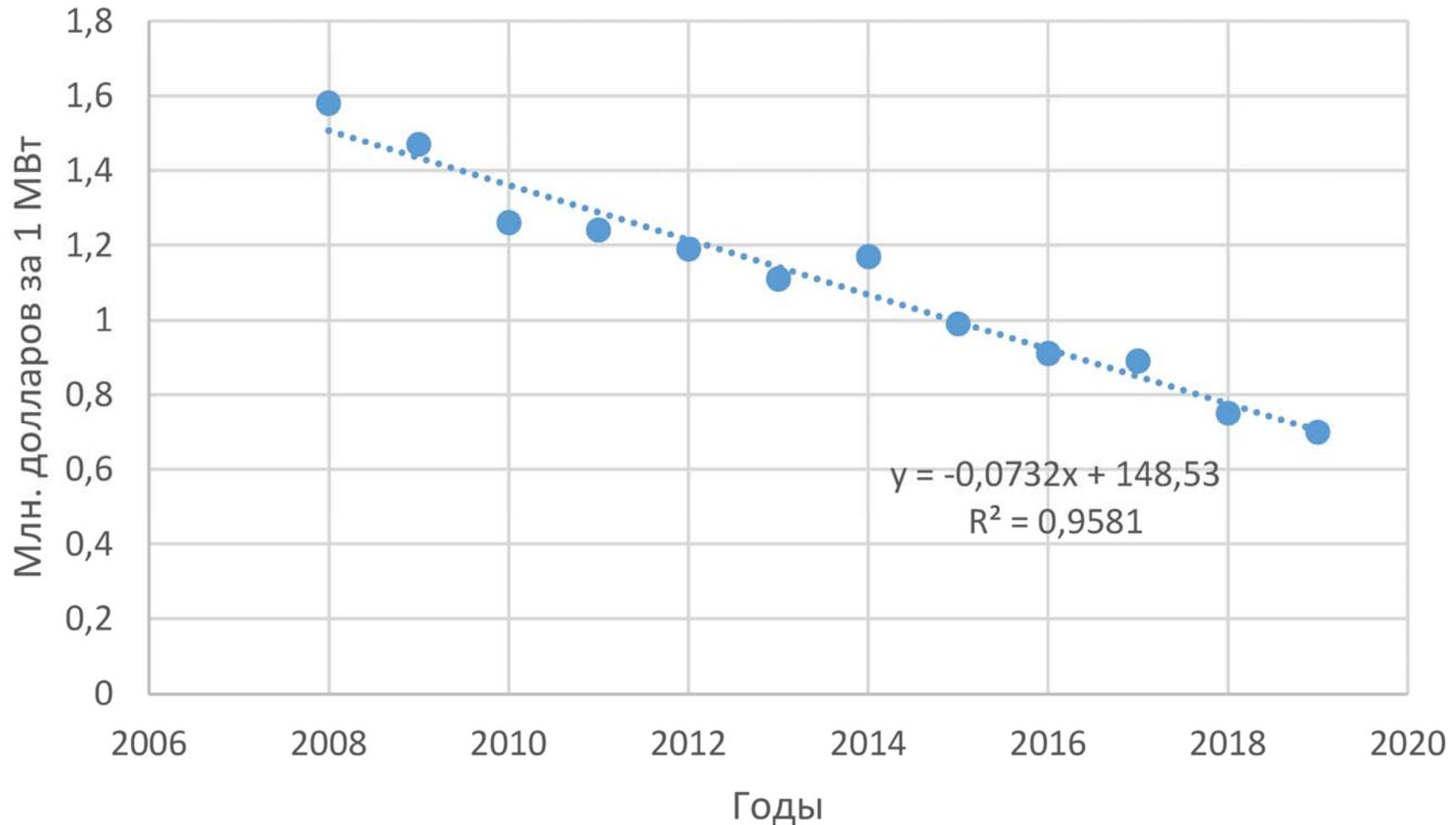


Рис.1 Стоимость 1 МВт установленной мощности ВЭС США [3]

# Решение задачи. Стоимость КЗ

---

На рис. 1 приведены данные стоимости 1 МВт установленной мощности ВЭС США, по которым получено уравнение линейной регрессии:

$$КЗ_1 = -0,0732 \cdot \text{Год} + 148,53 \quad (2)$$

Будем считать, что ввиду глобализации и существенного объема ветроэнергетического рынка США, цены на мировом рынке будут примерно соответствовать приведенным выше данным, т.е. рис.1 отображает стоимость среднестатистических  $КЗ_1$  (далее – базовая стоимость, БС). Очевидно, что в зависимости от выбранных параметров ВЭУ  $КЗ_1$  будут несколько больше или меньше БС на некоторый поправочный коэффициент  $k$ :

$$k = \frac{КЗ_1}{БС}.$$

# Решение задачи. Стоимость КЗ

На основании стоимости КЗ по некоторым ВЭУ по состоянию на 2012г [4] определены поправочные коэффициенты  $k$  (табл. 1).

Таблица 1

№ п/п	Мощность $X_1$ , МВт	Диаметр ВК $X_2$ , м	Высота оси ВК $X_3$ , м	КЗ на 2012 г, \$ млн.	КЗ <sub>1</sub> , \$ млн.	БС на 2012 г, \$ млн.	$k$
1	1,5	77	80	1,731	1,154	1,190	0,970
2	2,5	100	80	3,048	1,219	1,190	1,025
3	1,5	110	100	2,163	1,442	1,190	1,212
4	2,5	90	100	3,322	1,329	1,190	1,117
5	3,6	104	100	4,622	1,284	1,190	1,079
6	2,5	112	120	3,793	1,517	1,190	1,275
7	3	116,4	120	4,454	1,485	1,190	1,248
8	3	122	140	4,880	1,627	1,190	1,367
9	5	129	140	8,027	1,605	1,190	1,349

## Решение задачи. Стоимость КЗ

---

Для выявления стохастической связи между всеми данными таблицы 1 рассчитаем корреляционную матрицу:

Таблица 2

	<i>X1</i>	<i>X2</i>	<i>X3</i>	<i>k</i>
<i>X1</i>	1,000			
<i>X2</i>	0,663	1,000		
<i>X3</i>	0,654	0,868	1,000	
<i>k</i>	0,502	<b>0,904</b>	<b>0,961</b>	1,000

Корреляционная матрица свидетельствует о том, что определяющими факторами в значении коэффициента *k* являются высота оси ВК *X3* и диаметр ВК *X2*, в меньшей степени – номинальная мощность генератора *X1*.

# Решение задачи. Стоимость КЗ

Построим модель множественной линейной регрессии для всех факторов из таблицы 1:

Таблица 3

## ВЫВОД ИТОГОВ

Регрессионная статистика	
Множественный R	0,993
R-квадрат	0,986
Нормированный R-квадрат	0,977
Стандартная ошибка	0,021
Наблюдения	9,000

Дисперсионный анализ					
	df	SS	MS	F	Значимость F
Регрессия	3	0,158	0,053	115,418	0,00005
Остаток	5	0,002	0,000		
Итого	8	0,161			

	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика	P-Значение
Y-пересечение	<b>0,36884</b>	0,055	6,737	0,001
X1	<b>-0,03761</b>	0,010	-3,907	0,011
X2	<b>0,00345</b>	0,001	3,526	0,017
X3	<b>0,00505</b>	0,001	7,323	0,001

## Решение задачи. Стоимость КЗ

---

$$k = 0,36884 - 0,0376 \cdot X1 + 0,003345 \cdot X2 + 0,00505 \cdot X3. \quad (3)$$

Полученная математическая модель имеет высокий коэффициент множественной корреляции  $R$  объясняемого параметра  $k$  со всеми объясняющими факторами одновременно (0,993); высокий коэффициент детерминации  $R^2$ , нормированный на число факторов модели (0,986); небольшую стандартную ошибку (0,02). Модель значима в целом по Фишеру ( $P_F < 4,9 \cdot 10^{-5}$ ). Уровень значимости коэффициентов при объясняющих факторах по Стьюденту также мал ( $p < 0,02$ ).

## Решение задачи. Стоимость КЗ

---

$$Q_{Г} = -7125,25 + 1348,594 \cdot X1 + 97,52617 \cdot X2 + 28,81139 \cdot X3. \quad (1)$$

$$k = 0,36884 - 0,0376 \cdot X1 + 0,003345 \cdot X2 + 0,00505 \cdot X3. \quad (3)$$

Сопоставительный анализ уравнений (1) и (3) показывает:

- Увеличение высоты оси ВК на 1 м увеличивает годовую выработку  $Q_{Г}$  на 29 МВт·ч, но в тоже время увеличивает стоимость КЗ на 0,005.
- Увеличение диаметра ВК на 1 м увеличивает годовую выработку  $Q_{Г}$  на 98 МВт·ч при увеличении стоимости КЗ на 0,003.
- В условиях Северного Причерноморья выгоднее использовать ВЭУ с большим диаметром ВК умеренной высоты.

## Решение задачи. Стоимость КЗ

---

Недостатком полученной модели (3) её привязанность к статистике 2012 года. Очевидно, что ВЭУ с коэффициентом  $k = 1$  обладает среднестатистическими параметрами на 2012 год.

Для проверки данного предположения привлечем исследование Javier Serrano-González [5] исторической эволюции параметров ВЭУ за период 2005 – 2014 гг.

# Решение задачи. Стоимость КЗ

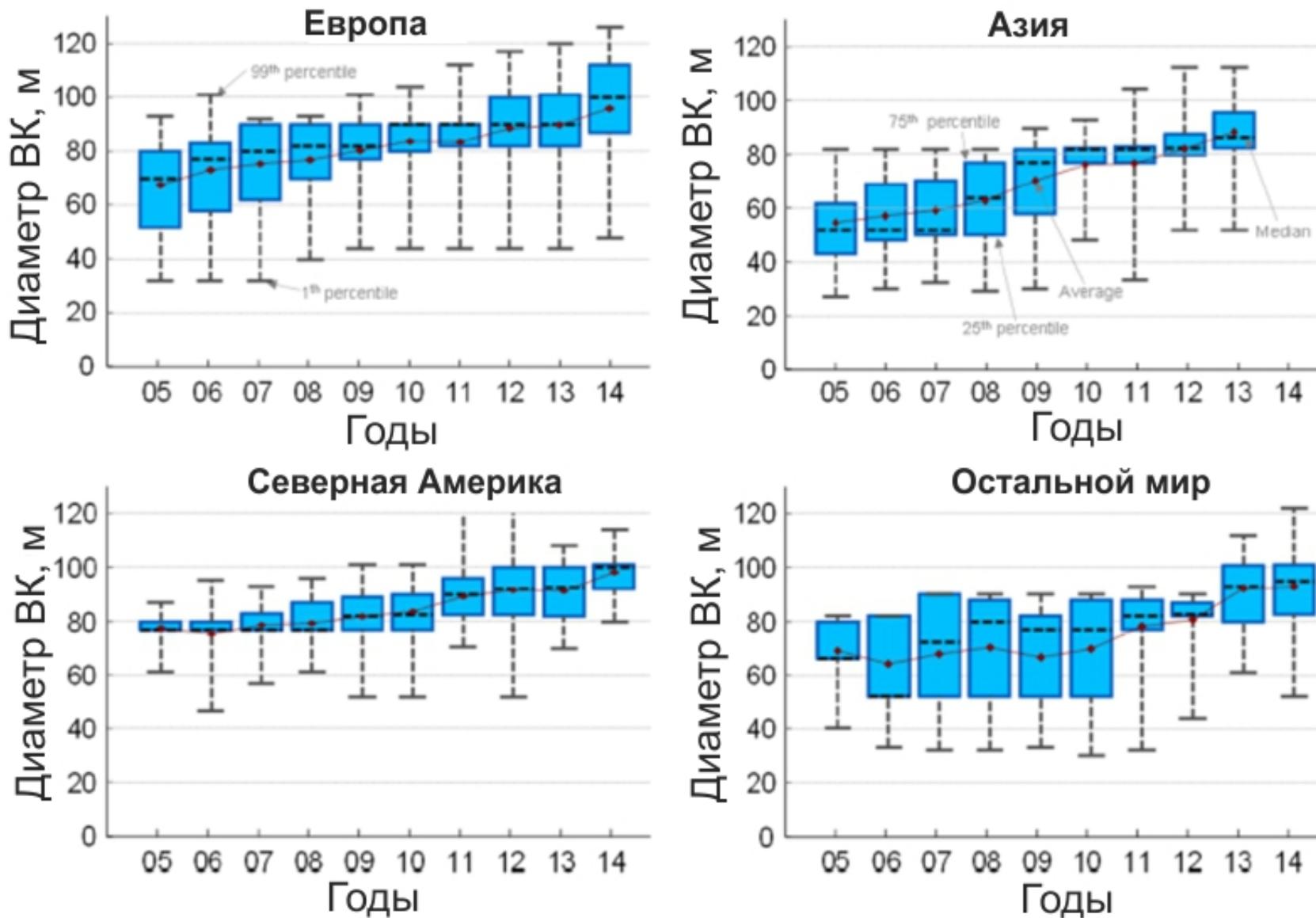


Рис.2 Эволюция диаметра ВК

# Решение задачи. Стоимость КЗ

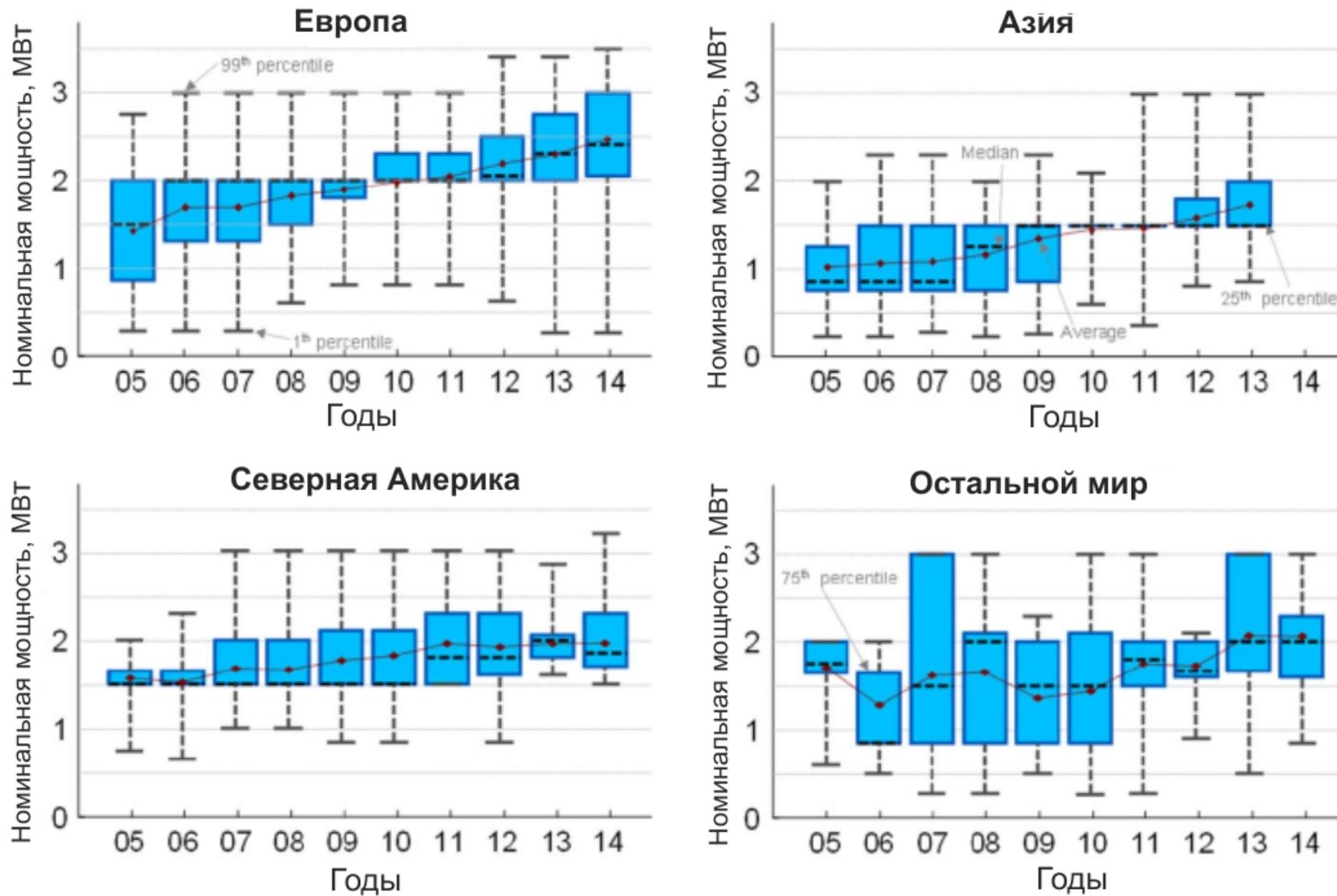


Рис.3 Эволюция номинальной мощности ВЭУ

# Решение задачи. Стоимость КЗ

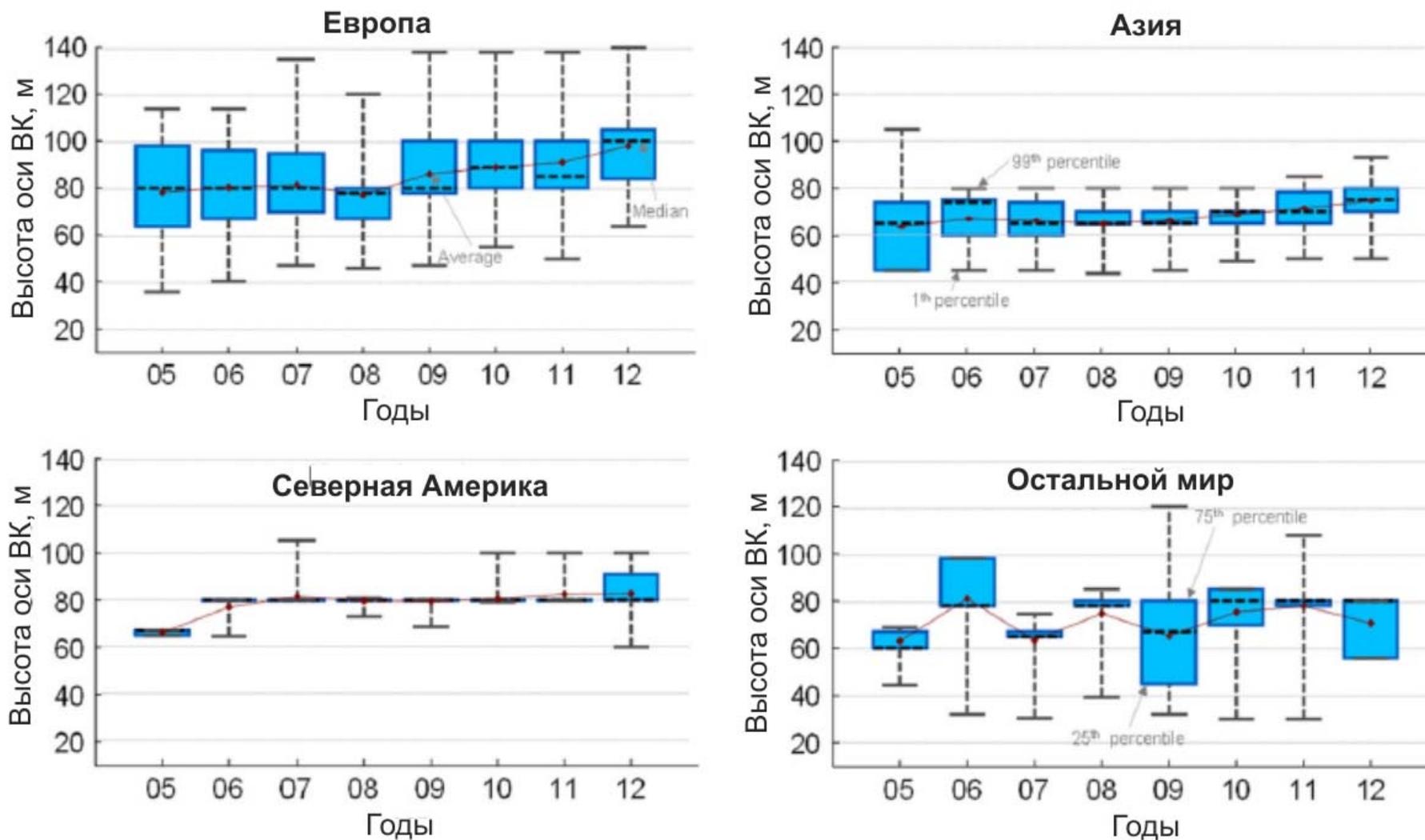


Рис.4 Эволюция высоты оси ВК

## Решение задачи. Стоимость КЗ

Не беря в расчет Азию и остальной мир, по опубликованным данным определим численные осредненные (Европа, Сев. Америка) значения параметров ВЭУ и соответствующие линейные зависимости:

Таблица 4

Год	Ном. Мощность X1	Диаметр ВК X2	Высота оси ВК X3
2005	1,5	72	72
2006	1,6	74	78
2007	1,7	77	82
2008	1,8	78	79
2009	1,9	81	83
2010	1,9	83	85
2011	2,1	86	87
2012	<b>2,1</b>	<b>90</b>	<b>91</b>
2013	2,2	91	
2014	2,3	96	

## Решение задачи. Стоимость КЗ

---

Подставив выделенные параметры (2012 г) в ММ (2) получим поправочный коэффициент  $k = 1,06$ . Разница в 6% между данными [5] и ММ показывает, что по состоянию на 2012 год данные параметры действительно являлись среднестатистическими как минимум на территории Европы и Северной Америки.

По данным табл. 4 определены соответствующие линейные зависимости, которые иллюстрируются рис.5:

$$X1 = 0,0806 \cdot \text{Год} - 160,1; \quad (4)$$

$$X2 = 2,5515 \cdot \text{Год} - 5044,7; \quad (5)$$

$$X3 = 2,2798 \cdot \text{Год} - 4497,1. \quad (6)$$

# Решение задачи. Стоимость КЗ

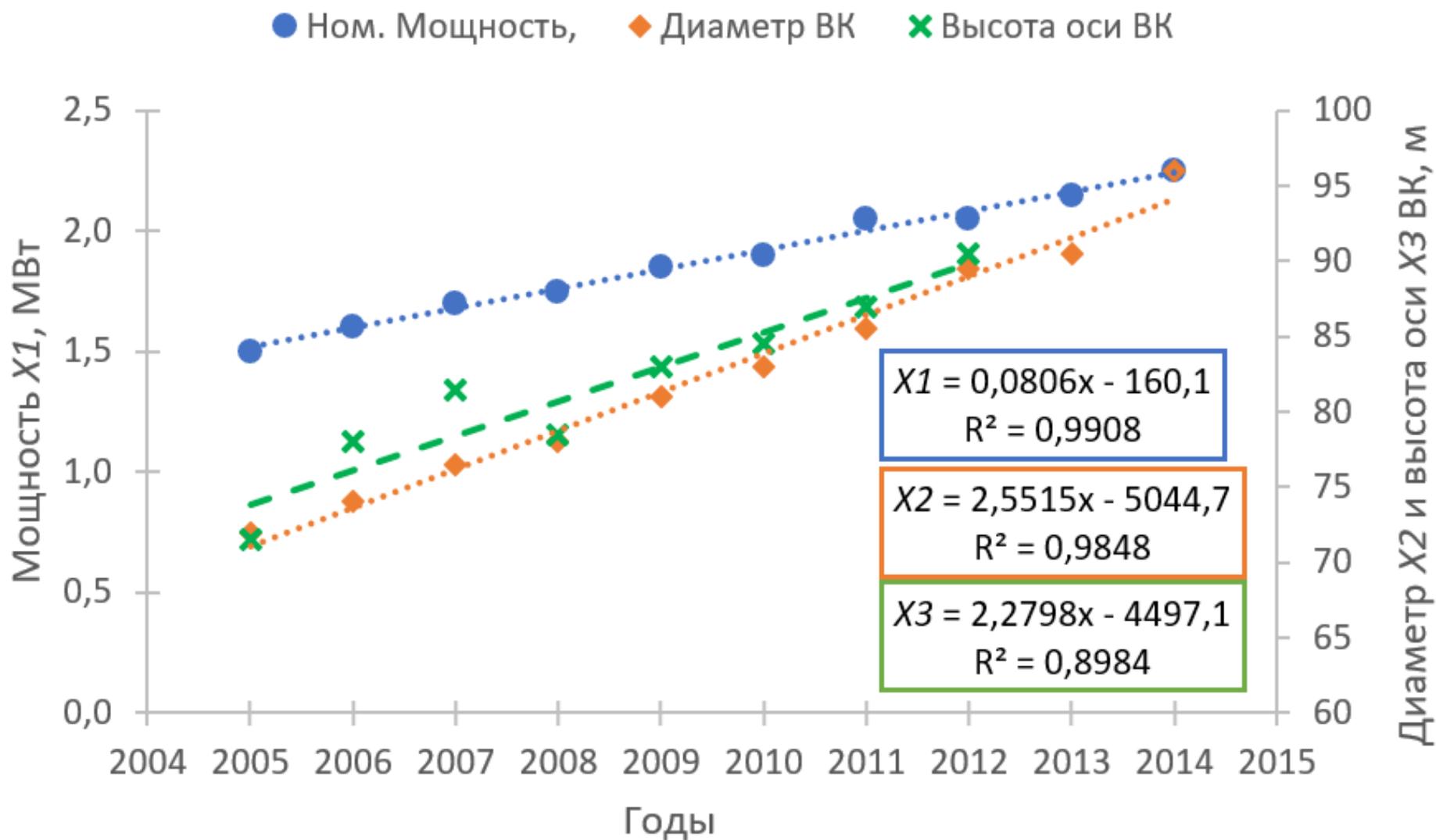


Рис. 5 Эволюция параметров ВЭУ

## Решение задачи. Параметры ВЭУ

---

Проверим полученные результаты на еще одном предположении. Корреляционная матрица (табл.2) свидетельствует о существующей связи между номинальной мощностью  $X1$ , диаметром ВК  $X2$  и высотой оси ВК  $X3$ .

	$X1$	$X2$	$X3$
$X1$	1,000		
$X2$	0,663	1,000	
$X3$	0,654	0,868	1,000

Из базы данных сайта [wind-turbine-models.com](http://wind-turbine-models.com) [6] отобраны и исследованы параметры 230 ВЭУ ведущих мировых производителей мощностью от 1 до 5 МВт.

## Решение задачи. Параметры ВЭУ

---

Корреляционный анализ также подтверждает существование достаточно сильной связи между  $X1$  и  $X2$ ,  $X2$  и  $X3$ , в меньшей степени между  $X1$  и  $X3$ .

Таблица 5

	$X1$	$X2$	$X3$
$X1$	1		
$X2$	0,804088	1	
$X3$	0,62698	0,764819	1

По данным [6] получены следующие линейные регрессионные уравнения:

$$X2 = 21,391 \cdot X1 + 48,487; \quad (7)$$

$$X3 = 0,6374 \cdot X2 + 31,143. \quad (8)$$

# Решение задачи. Параметры ВЭУ

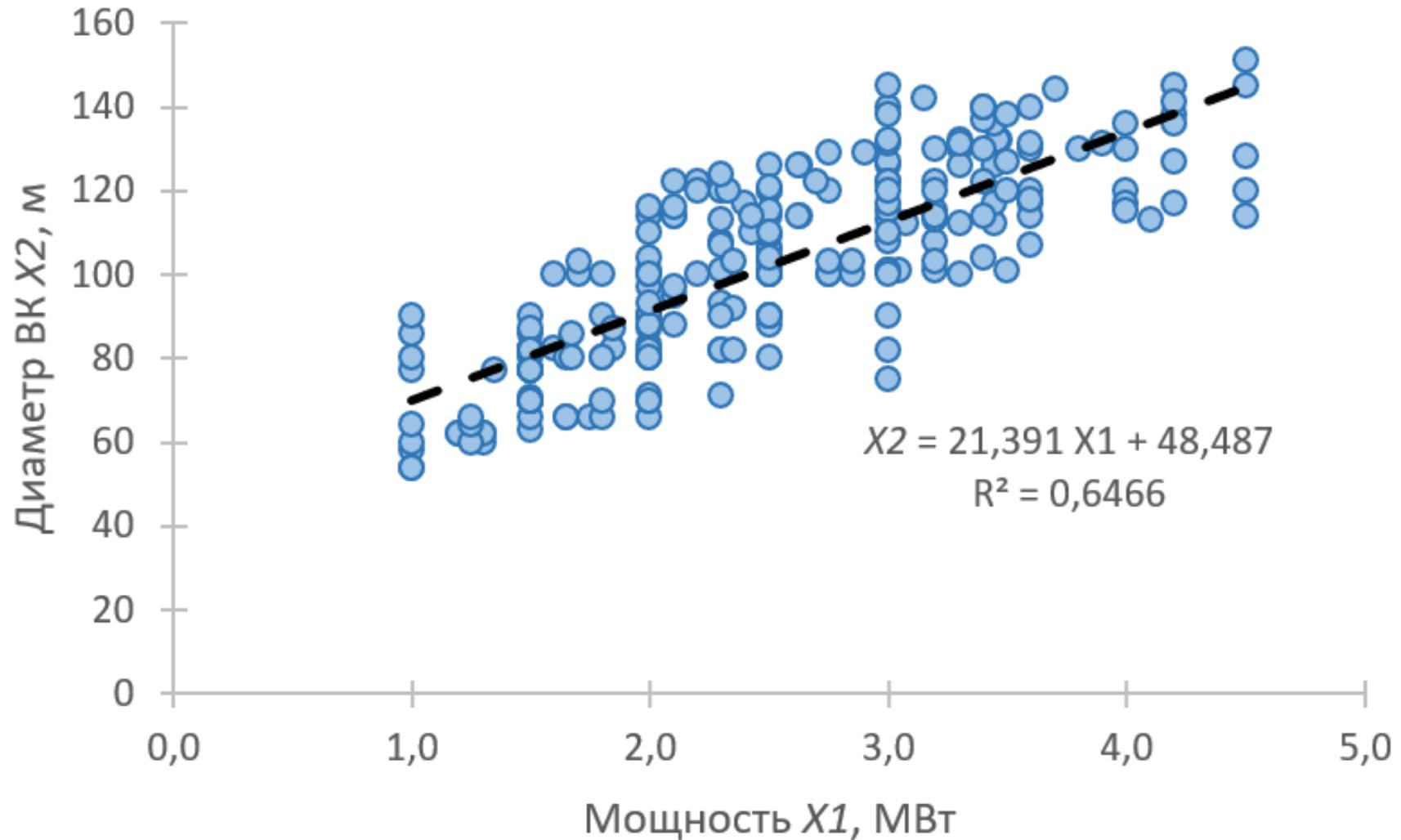


Рис.6 Зависимость мощности ВЭУ от диаметра ВК

# Решение задачи. Параметры ВЭУ

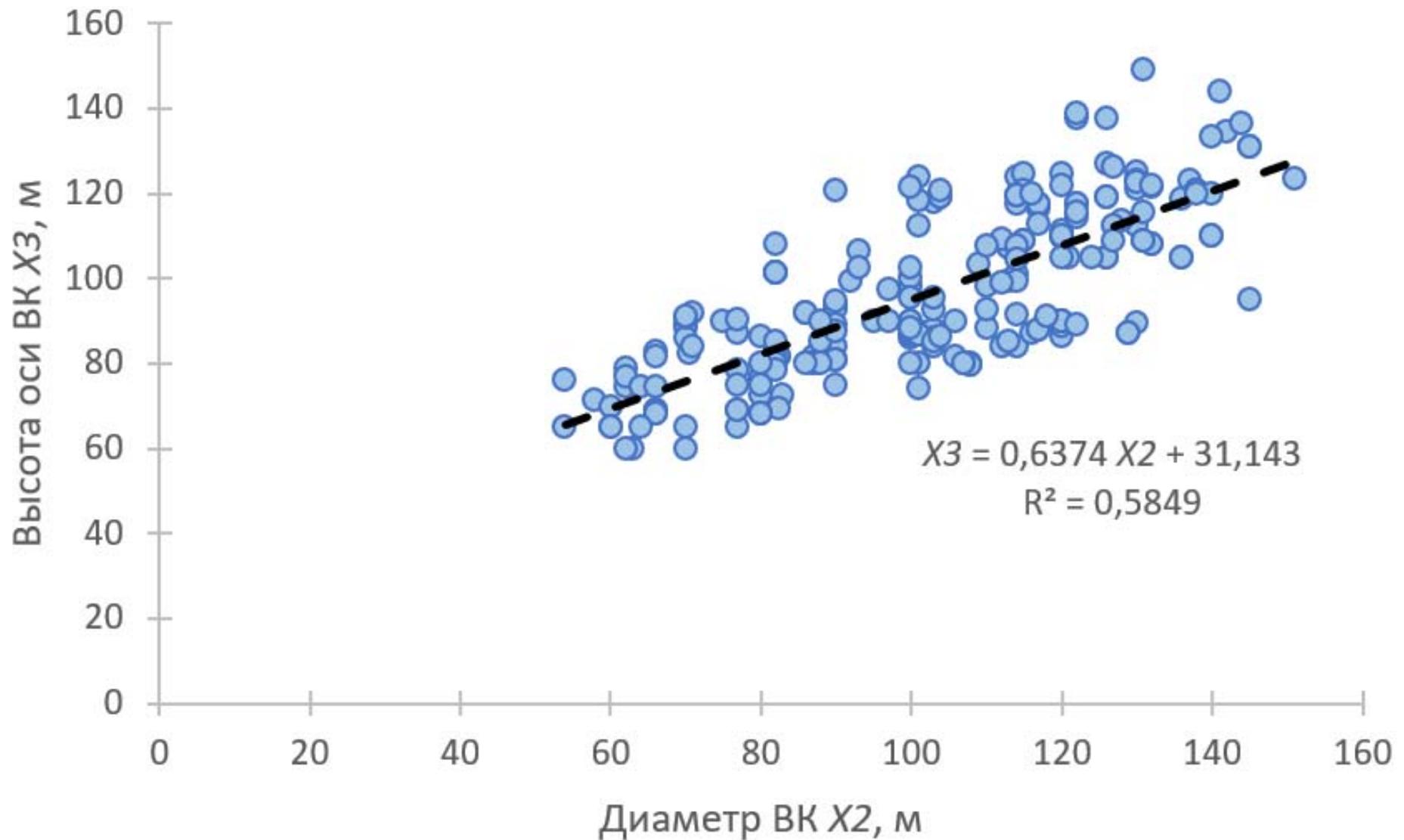


Рис.7 Зависимость высоты оси ВК от диаметра

# Решение задачи. Параметры ВЭУ

---

Невысокие коэффициенты детерминации показывают, что параметры ВЭУ могут колебаться в достаточно большом диапазоне, и, как правило, это связано с ветровым классом ВЭУ.

К примеру, ВЭУ Enercon E-82 E4 3.000 ( $X1 = 3$  МВт,  $X2 = 82$  м,  $X3 = 84$  м) относится к ветровому классу Ia [6] (класс сильных ветров согласно IEC 61400).

А Gamesa G114-2.1 ( $X1 = 2.1$  МВт,  $X2 = 114$  м,  $X3 = 140$  м) оптимизирована под ветровой класс IIIa (слабые ветра).

Полученные уравнения (7) и (8) сопоставим с уравнениями (4) - (6) и экстраполируем до 2025 года.

# Решение задачи. Параметры ВЭУ

Таблица 6

Год	X1 по(4)	X2 по (5)	X3 по(6)	X2' по (7)	X3' по (8)	X2 - X2'	X3 - X3'	(X2 + X2')/2	(X3 + X3')/2
2005	1,5	72	72	81	83	-9	-11	76	77
2006	1,6	74	78	83	84	-9	-6	78	81
2007	1,7	77	82	85	85	-8	-4	81	83
2008	1,8	78	79	86	86	-8	-7	82	82
2009	1,9	81	83	88	87	-7	-4	85	85
2010	1,9	83	85	89	88	-6	-3	86	86
2011	2,1	86	87	92	90	-7	-3	89	88
2012	<b>2,1</b>	<b>90</b>	<b>91</b>	<b>92</b>	<b>90</b>	<b>-3</b>	<b>1</b>	<b>91</b>	<b>90</b>
2013	2,2	91	92	94	91	-4	1	92	92
2014	2,3	96	94	97	93	-1	2	96	94
2015	2,3	97	97	98	94	-1	3	97	95
2016	2,4	99	99	100	95	0	4	99	97
2017	2,5	102	101	101	96	0	6	102	98
2018	2,6	104	104	103	97	1	7	104	100
2019	2,6	107	106	105	98	2	8	106	102
2020	2,7	109	108	106	99	3	9	108	104
2021	2,8	112	110	108	100	4	10	110	105
2022	2,9	114	113	110	101	4	11	112	107
2023	3,0	117	115	112	102	5	13	114	109
2024	3,0	120	117	113	103	6	14	116	110
2025	3,1	122	119	115	105	7	15	119	112

# Решение задачи. Параметры ВЭУ

---

По табл. 6 можно сделать следующие выводы:

- Подтверждено, что ВЭУ с мощностью 2,1 МВт в большинстве своем имеют диаметр и высоту оси ВК около 90 м.
- Перспектива эволюции параметров ВЭУ по данным 2005 – 2014 годов является более оптимистичной по сравнению с существующими на сегодня предложениями, что, возможно, говорит о некотором снижении интенсивности развития ветроэнергетики, особенно в направлении увеличения высоты.

Косвенно об этом можно судить исходя из того факта, что предлагаемые на сегодня наибольшие высоты ВЭУ не превышают 160 – 170 м. Между тем, первая ВЭУ с высотой оси ВК 160 м была построена еще 2006 году [7] (Fuhrlander FL 2500-90 в Лаазо, Германия).

# Решение задачи. Параметры ВЭУ

Усредняя значения  $X2$  и  $X2'$ , а также  $X3$  и  $X3'$  получим окончательные параметры среднестатистической ВЭУ на 2012 г. Назовем их базовыми параметрами:

$$X1_B = 2,1 \text{ МВт}; X2_B = 91 \text{ м}, X3_B = 90 \text{ м}.$$

Перепишем табл. 1, преобразовывая абсолютные значения параметров в относительные:

Таблица 7

$X1/X1_B$	$X2/X2_B$	$X3/X3_B$	$k$
0,71	0,85	0,89	0,97
1,19	1,10	0,89	1,02
0,71	1,21	1,11	1,21
1,19	0,99	1,11	1,12
1,71	1,14	1,11	1,08
1,19	1,23	1,33	1,28
1,43	1,28	1,33	1,25
1,43	1,34	1,56	1,37
2,38	1,42	1,56	1,35

## Решение задачи. Параметры ВЭУ

---

По табл. 7 построим модель множественной линейной регрессии:

$$k = 0,36884 - 0,079 \cdot \frac{X1}{X1_B} + 0,31378 \cdot \frac{X2}{X2_B} + 0,45487 \cdot \frac{X3}{X3_B} \quad (9)$$

Исследуем стоимость вырабатываемой электроэнергии по состоянию на 2020 год некоторых ВЭУ, эксплуатирующихся в Украине.

По табл. 6 определим базовые параметры ВЭУ на 2020 г:

$$X1_B = 2,7 \text{ МВт}; X2_B = 108 \text{ м}, X3_B = 104 \text{ м}.$$

Базовая стоимость (БС) 1 МВт на 2020 г по ур. (2) составляет  $KЗ_1 = \$ 0,67$  млн.

# Исследование ВЭУ Украины

Таблица 8

ВЭС	ВЭУ	X1	X2	X3	k	K31	K3	Q	СЭ
		2,7	108	104	1,00	0,67	1,81	10 045	180,1
ВП Очаковский	FL 2500-100	2,5	100	100	1,02	0,67	1,71	8 880	193,1
ВП Причерноморский	WTU 3.0	3	120	100	1,11	0,67	2,22	11 505	193,1
	WTU 3.2	3,2	120	100	1,01	0,67	2,15	11 775	183,0
Ботиевская	Vestas V112	3,075	112	94	1,01	0,67	2,08	10 653	195,0
Новороссийская	Vestas V112	3,075	112	119	1,18	0,67	2,43	11 373	213,7
ВП Старый Самбир -1	Vestas V112	3,3	112	94	0,94	0,67	2,08	10 956	190,1
ВП Старый Самбир -2	Vestas V126	3,45	126	117	1,21	0,67	2,79	13 187	211,3
Овид Винд	GE 3.6	3,6	137	131	1,14	0,67	2,74	14 865	184,5
Новотроицкая	Vestas V126	3,65	126	117	1,14	0,67	2,79	13 456	207,3
	Gamesa 2.0-114	2	114	93	1,09	0,67	1,46	9 369	155,4

# Выводы

---

1. Определен критерий оценки стоимости вырабатываемой электроэнергии, учитывающий как стоимость капитальных затрат на ВЭУ, так и её производительность в конкретных ветровых условиях.
2. Определены влияющие параметры и построена математическая модель расчета стоимости электроэнергии.
3. Определена стоимость вырабатываемой электроэнергии для ВЭУ, установленных на ВЭС Украины.
4. Выявлено значительное завышение стоимости электроэнергии на промышленных ВЭС Украины (Новороссийская, Старый Самбир -2 в пределах 17 – 19%). На остальных ВЭС Украины выявлено также завышение стоимости выше среднего на уровне как минимум 1,6%, как максимум 15%.
5. В условиях Северного Причерноморья вполне реально достичь значительного снижения стоимости электроэнергии, о чем убедительно свидетельствует последняя строка табл.8.

# Литература

---

1. Lee J.-T., Kim H.-G. \*, Kang Y.-H., Kim J.Y.. Determining the Optimized Hub Height of Wind Turbine Using the Wind Resource Map of South Korea. *Energies* **2019**, 12, 2949; doi:10.3390/en12152949.
2. Подгуренко В.С., Гетманец О.М., Терехов В.Е.. Повышение эффективности производства электроэнергии ветроэлектрической установкой на основе математического моделирования. *Электрон. моделювання*. **2020**. Т.42, №2, с. 121 –127; doi:10.15407/emodel.42.02.121.
3. Price index for wind turbines in the U.S. from 2008 to 2019.  
<https://www.statista.com/statistics/499491/us-wind-turbine-price-index>.
4. Levandowski C. Evaluating Tall Wind Turbine Towers in the Field. **2015**.  
[https://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1116&context=undergradresearch\\_symposium](https://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1116&context=undergradresearch_symposium).
5. Javier Serrano González. Technological evolution of onshore wind turbines—a market-based analysis. *Wind Energy*. 2016. DOI: 10.1002/we.1974  
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/we.1974>
6. База данных *wind-turbine-models.com*
7. <https://www.atlasobscura.com/places/fuhrlander-wind-turbine-laasow>