

УДК 621.31

Винансию Лиамбези Шатчилембе

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», аспирант Высшей школы электроэнергетических систем, Россия, Санкт-Петербург, телефон (812) 552-76-43, e-mail: satchilembeliambesse@gmail.com

Владимир Яковлевич Фролов

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», доктор технических наук, профессор Высшей школы электроэнергетических систем, Россия, Санкт-Петербург, телефон (812) 552-76-43, e-mail: frolov.eed@gmail.com

Дмитрий Владимирович Иванов

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», кандидат технических наук, доцент Высшей школы электроэнергетических систем, Россия, Санкт-Петербург, телефон (812) 552-76-43, e-mail: d.ivanov@spbstu.ru

Дмитрий Юрьевич Ланцев

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», кандидат технических наук, ассистент Высшей школы электроэнергетических систем, Россия, Санкт-Петербург, телефон (812) 552-76-43, e-mail: lantsev_dyu@spbstu.ru

Алексей Ибрагимович Таджибаев

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», доктор технических наук, доцент Высшей школы электроэнергетических систем, Россия, Санкт-Петербург, телефон (812) 552-76-43, e-mail: a_tadzhibaev@inbox.ru

Алексей Владимирович Погорелов

ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», старший преподаватель кафедры электроэнергетики и автоматики, Россия, Белгород, e-mail: pog_alex31@mail.ru

Имитационное моделирование параллельной работы ветрогенерирующих установок¹

Авторское резюме

Состояние вопроса. В настоящее время, несмотря на бурное развитие ветроэнергетики, уделяется недостаточное внимание вопросу влияния параллельной работы ветроэнергетических установок с полупроводниковыми преобразователями на качество вырабатываемой электрической энергии. В связи с этим исследования, направленные на анализ гармонических искажений напряжения и тока в системе электроснабжения с несколькими ветровыми генераторами, приводящих к значительным дополнительным потерям электрической энергии, являются актуальными и необходимыми для повышения энергоэффективности ветроэнергетических систем.

Материалы и методы. Исследование проведено с использованием имитационной модели параллельной работы сетевых ветрогенерирующих установок с трехфазным синхронным генератором с постоянными магнитами, созданной в среде Matlab/Simulink. Объектом исследования является система электроснабжения, состоящая из шести ветрогенераторов, подключенных к сети с помощью трансформаторной подстанции. Предметом исследования является энергоэффективность параллельной работы ветрогенерирующих установок ветрогенерирующей системы.

Результаты. Осуществлено моделирование трех синхронных генераторов с 4Q-преобразователями для исследования параллельной работы ветроэнергетических установок в составе ветроэнергетической системы, вводимой в сеть в режиме максимальной мощности. Установлено, что при неравных условиях работы установок, связанных с разной скоростью ветра (от 12 до 15 м/с), генерируются активные мощности, равные 1,39, 1,46 и 1,5 МВт соответственно. Суммарная генерируемая активная мощность трех генераторов на шине 690 В составляет 4,35 МВт, а реактивная мощность – 250 кВАр. Дополнительные потери активной мощности от высших гармоник составляют 10,48 % от основных потерь в элементах системы электроснабжения. Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения на напряжении 690 В превышают установленные нормы.

Выводы. Созданная модель является адекватной и обеспечивает достоверное моделирование режимов ветрогенерирующей системы при параллельной работе ветрогенерирующих установок с синхронными генераторами с

¹ Работа выполнена в рамках исследований по государственному заданию Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FSEG-2023-0012).

The research is carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Theme No. FSEG-2023-0012).

постоянными магнитами. На основании результатов моделирования и расчета мощностей, коэффициентов высших гармоник и потерь электрической мощности доказано, что параллельная работа генераторов усиливает негативное влияние мощных нелинейных устройств на электрическую сеть.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка, параллельная работа генераторов, 4Q-преобразователь, имитационная модель, спектр гармонических искажений

Venancio Liambesi Satchilembe

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Postgraduate Student of the Higher School of Electric Power Systems, Russia, Saint-Petersburg, telephone (812)552-76-43, e-mail: satchilembeliambesse@gmail.com

Vladimir Yakovlevich Frolov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of the Higher School of Electric Power Systems, Russia, Saint-Petersburg, telephone (812)552-76-43, e-mail: frolov.eed@gmail.com

Dmitry Vladimirovich Ivanov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Higher School of Electric Power Systems, Russia, Saint-Petersburg, telephone (812) 552-76-43, e-mail: d.ivanov@spbstu.ru

Dmitry Yuryevich Lantsev

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Assistant of the Higher School of Electric Power Systems, Russia, Saint-Petersburg, telephone (812) 552-76-43, e-mail: lantsev_dyu@spbstu.ru

Alexey Ibragimovich Tadzhibaev

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Associate Professor of the Higher School of Electric Power Systems, Russia, Saint-Petersburg, telephone (812) 552-76-43, e-mail: a_tadzhibaev@inbox.ru

Aleksei Vladimirovich Pogorelov

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Senior Lecturer of Electrical Power Engineering and Automation Department, Russia, Belgorod, e-mail: pog_alex31@mail.ru

Simulation modeling of parallel operation of wind power plants

Abstract

Background. At present, despite the rapid development of wind energy, insufficient attention is paid to the issue of the impact of parallel operation of wind power plants with semiconductor converters on the quality of generated electrical energy. Thus, studies aimed at analyzing harmonic distortions of voltage and current in the power supply system with several wind generators that lead to significant additional losses of electrical energy, are relevant and necessary to improve the energy efficiency of wind energy systems.

Materials and methods. The study has been conducted using a simulation model of parallel operation of network wind power plants with a three-phase synchronous generator with permanent magnets developed in the Matlab/Simulink software. The object of the research is a power supply system consisting of six wind power plants connected to the grid using a transformer substation. The subject of the research is the energy efficiency of parallel operation of wind power plants of a wind energy system.

Results. The authors have obtained the results of modeling three synchronous generators with 4Q-converters to study the parallel operation of wind power plants as part of a wind energy system introduced into the network in maximum power mode. It is established that under unequal operating conditions of the plants due to different wind speeds (from 12 to 15 m/s) active powers equal to 1,39, 1,46 and 1,5 MW are generated respectively. The total generated active power of three generators on the 690 V bus is 4,35 MW, and the reactive power is 250 kvar. Additional losses of active power of higher harmonics amount to 10,48 % of the main losses in the elements of the power supply system. The values of the coefficients of harmonic component of voltage at a voltage of 690 V exceed the established standards.

Conclusions. The developed model is adequate and provides reliable modeling of wind energy system modes during parallel operation of wind power plants with synchronous generators with permanent magnets. Based on the results of modeling and calculation of capacities, the coefficients of higher harmonics and losses of electric power, it has been proved that parallel operation of generators increases the negative impact of powerful nonlinear devices on the electric grid.

Key words: wind power plants, parallel operation of generators, 4Q converter, simulation model, spectrum harmonic distortion

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.4.066-075

Введение. В последние годы ветроэнергетика стала значимой частью глобальной энергетической матрицы, стимулируя технологическое и экономическое развитие во многих регионах мира. Учитывая, что это новая технология, сектор ветряных электростанций все еще сталкивается с некоторыми проблемами при установке и эксплуатации крупных ветряных электростанций. В связи с этим исследования, повышающие эффективность работы систем с ветровыми установками, являются актуальными [1–3]. Ветроэнергетическая система (ВЭС) подразумевает параллельную работу ветроэнергетических установок (ВЭУ), т. е. их одновременную эксплуатацию в одной энергетической системе или на одном объекте [4, 5]. В таком режиме несколько генераторов могут работать совместно, обеспечивая стабильную подачу энергии в сеть, даже если один или несколько генераторов временно выходят из строя или производят меньше энергии из-за изменений в ветровых условиях.

Ключевое значение в компоновке ветроэнергетических систем имеет оптимизация уровня напряжения и длины кабельных линий электропередачи, связывающих ВЭУ [6]. Как правило, связь между ВЭУ в составе ВЭС осуществляется по кабелю среднего уровня напряжения (6–35 кВ), но также следует учитывать и подключения ВЭУ по коротким кабелям низкого уровня напряжения. Решение вопроса о длине кабельных линий зависит от способа соединения ВЭУ на шину распределительного устройства и выбора схемы выдачи мощности ВЭС в энергосистему. Выбор схемы выдачи мощности зависит от количества установок; расстояния между установками; установленной мощности ВЭС; близости нагрузки и распределительных сетей высокого напряжения. Различают три способа соединения ВЭУ на общую шину: радиаль-

ное, древовидное и соединение в кольцо. Радиальное соединение – это отдельное подключение ВЭУ или нескольких ВЭУ на общую шину без влияния одной установки на другие. При увеличении числа установок заметно увеличивается расстояние до общей шины, поэтому подключать каждую ВЭУ отдельно экономически невыгодно и рекомендуется к использованию древовидная схема подключения ВЭУ. Для повышения надежности также используется кольцевая схема подключения, т. е. при выходе из строя кабеля с одной стороны питание на шины поступает с другой.

Однако при параллельной работе ВЭУ могут возникать и другие проблемы [6]: нежелательные колебания напряжения и частоты системы при ошибках синхронизации генераторов друг с другом и сетью; неравномерность ветра, что требует гибкого распределения энергии по сети с учетом ее стабильности; перегрузки и сбои в системе, требующие постоянного мониторинга и контроля состояния генераторов. Параллельное соединение нескольких преобразователей также может вызвать значительные искажения тока и напряжения [5]. Эта проблема усугубляется, если большая ветряная электростанция установлена в слабой электрической системе, имеющей малую мощность короткого замыкания. Эти проблемы в большинстве случаев не решены, поэтому требуются тщательные исследования, чтобы сформировать рекомендации по повышению эффективности работы ветроэнергетических установок.

Рассмотрим особенности параллельной работы ветроэнергетических установок на примере одной группы из шести ВЭУ. На рис. 1 представлена электрическая однолинейная схема ВЭС, в которую входят шесть ВЭУ, соединенные кабельными линиями на уровне напряжения 0,69 кВ с двумя повышающими трансформаторами.

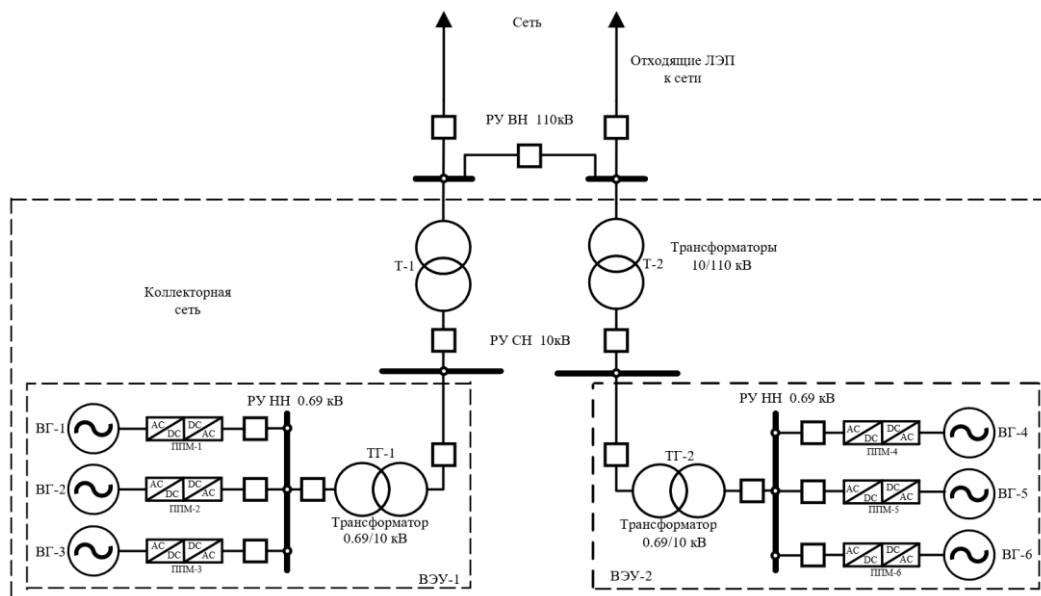


Рис. 1. Однолинейная схема выдачи мощности ВЭС

Для передачи мощности на большие расстояния используются воздушные линии электропередачи на высоком уровне напряжения, что обеспечивает снижение энергетических потерь. Для повышения уровня генераторного напряжения (0,69 кВ на схеме) до 10 кВ и до 110 кВ используются силовые трансформаторы.

Мощность сети составляет 2000 МВА. К одному трансформатору 0,69/10 кВ подключаются три ветрогенератора мощностью 1,5 МВт. Параметры трансформаторов, воздушных и кабельных линий этой сети представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Параметры трансформатора

Трансформатор	S _{ном} , МВА	U _{ном} обмоток, кВ		U _к , %	ΔP_k , кВт	P _х , кВт	I _х , %	Группа соединения
		ВН	НН					
ТРДЦН-63000	63	115	10	10,5	260	59	0,6	У/Д11
ТСЗП-6300	6,3	10	0,69	9	33	9,5	0,5	Д11/У

Таблица 2. Параметры воздушных и кабельных линий

Длина, км	F _{эк} , мм ²	Марка и сечение кабеля, мм ²	I _{расч} , А	R ₀ , Ом/км	X ₀ , Ом/км	I _{доп} , А
0,3	1031	КГ 5 х 240	1649	0,0156	0,0117	2000
10	406	АПвП 3х240	254,6	0,125	0,071	500

В электрической сети установлены автоматические воздушные выключатели серии OptiMat (табл. 3), которые предназначены для пропускания тока в нормальных условиях и защиты электрических цепей. Эти устройства оснащены

множеством защитных функций, обеспечивающих соответствие требованиям по координации и селективности защиты в данной сети [2].

Схема соединения и состав этой группы ветрогенерирующих установок представлены на рис. 2.

Таблица 3. Параметры автоматических выключателей серии OptiMat

Тип	OptiMat A
Номинальный ток I _n , А	630–6300
Номинальная частота	50 Гц
Номинальное рабочее напряжение	690 В
Предельная коммутационная способность переменного тока I _{св}	85–00 кА
Степень защиты (IP)	IP20
Климатическое исполнение	У3

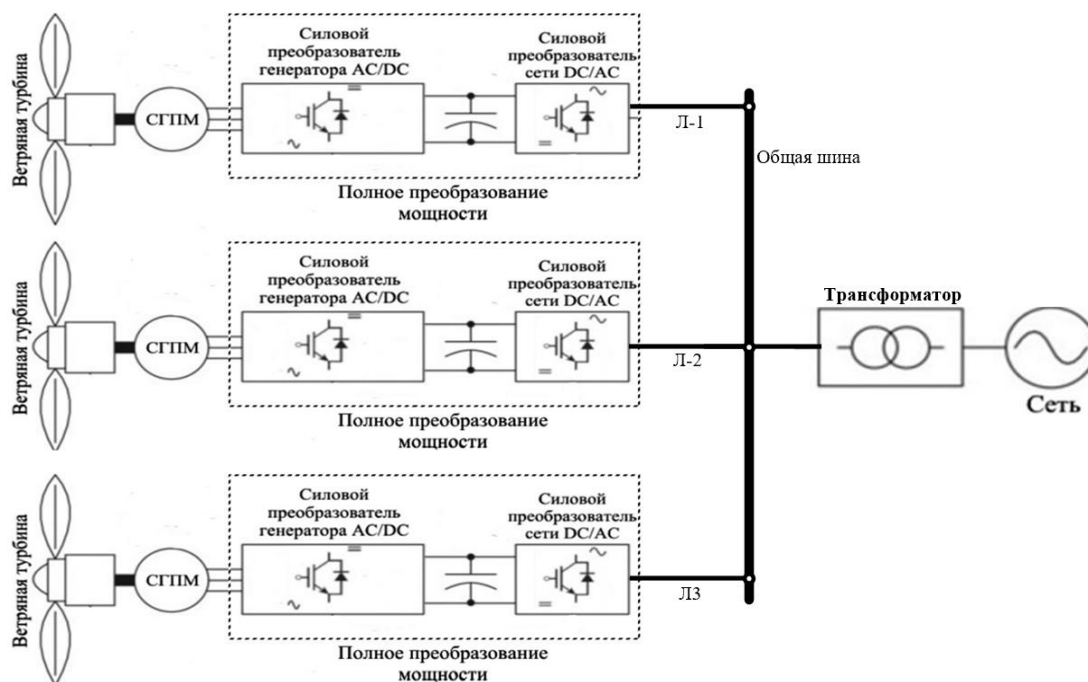


Рис. 2. Структурная схема параллельного подключения ВЭУ к сети

Каждый синхронный генератор с постоянными магнитами оснащен преобразователем, который состоит из выпрямителя и инвертора и управляет активной и реактивной мощностью генератора [7–9]. Необходим так называемый «полноразмерный» 4Q-преобразователь (рис. 3),

рассчитанный на полную мощность электрической машины [10]. Силовой преобразователь содержит силовой каскад, схему управления и защиты, датчики тока и температуры, а также радиатор [10].

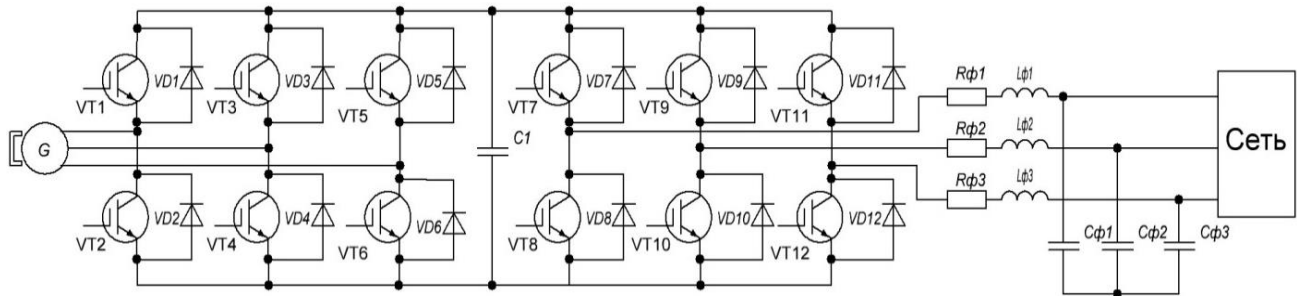


Рис. 3. Схема включения «полноразмерного» 4Q-преобразователя

Транзисторы выбирают по условию:

$$\begin{cases} I_{\text{спот}} \geq I_{\text{к max}}; \\ I_{\text{CRM}} \geq I_{\text{ки max}}; \\ U_{\text{ces}} \geq U_{\text{кэ max}} \end{cases}$$

где $I_{\text{спот}}$ – предельно допустимый длительный ток коллектора транзистора; I_{CRM} – предельно допустимый повторяющийся импульсный ток коллектора транзистора; U_{ces} – предельно допустимое повторяющееся напряжение коллектор-эмиттер транзистора; $I_{\text{к max}}$ – максимальный ток коллектора транзистора; $I_{\text{ки max}}$ – максимальный импульсный ток коллектора транзистора; $U_{\text{кэ max}}$ – максимальное обратное напряжение коллектор-эмиттер транзистора [3].

В соответствии с параметрами электрической сети и синхронного генератора получаем:

$$\begin{cases} I_{\text{спот}} = 2400 > I_{\text{к max}} = 936,8 \text{ A}, \\ I_{\text{CRM}} = 4800 > I_{\text{ки max}} = 1686,3 \text{ A}, \\ U_{\text{ces}} = 1700 > U_{\text{кэ max}} = 813 \text{ В}. \end{cases}$$

По заданному условию выбираем IGBT транзистор типа МТКИ-2400-17Т. Параметры

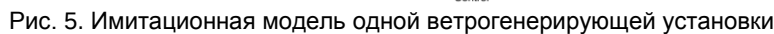
модуля МТКИ-2400-17Т приведены в табл. 4 [10]. Внешний вид выбранного 4Q-преобразователя представлен на рис. 4.



Рис. 4. 4Q-преобразователь для генератора мощностью 1,5 МВт

Таблица 4. Параметры транзистора МТКИ-2400-17Т

Напряжение коллектор-эмиттер, В	U_{ces}	1700
Ток коллектора при $T_c = 25^\circ\text{C}$, А	I_c	2400
Импульсный ток коллектора, А	I_{cm}	4800
Падение напряжения при насыщении на транзисторе, В	U_{CE}	2,6
Максимальная рассеиваемая мощность, Вт	P_D	19200
Время задержки включения, нс	$t_{d(\text{on})}$	300
Время задержки выключения, нс	$t_{d(\text{off})}$	1500
Рабочая температура, $^\circ\text{C}$	T_j	$-55..+150$
Падение напряжения при насыщении на диоде, В	U_f	2,1
Ток диода при $T_c = 25^\circ\text{C}$, А	I_f	2400
Тепловое сопротивление переход-корпус транзистора, $^\circ\text{C/W}$	R_{jc1}	0,0032
Тепловое сопротивление переход-корпус диода, $^\circ\text{C/W}$	R_{jc2}	0,012
Тепловое сопротивление корпус-охладитель, $^\circ\text{C/W}$	R_{cs}	0,002



Для исследования влияния совместной работы ветрогенерирующих установок на электрическую сеть была разработана имитационная модель, представленная на рис. 6. На рис. 7, 8 представлены результаты моделирования активных мощностей трех ветрогенерирующих установок, активных и реактивных мощностей на сторонах 690 В и 10 кВ трансформатора, а также осциллограммы и спектральные зависимости напряжения и тока на сторонах 690 В и 10 кВ трансформатора.



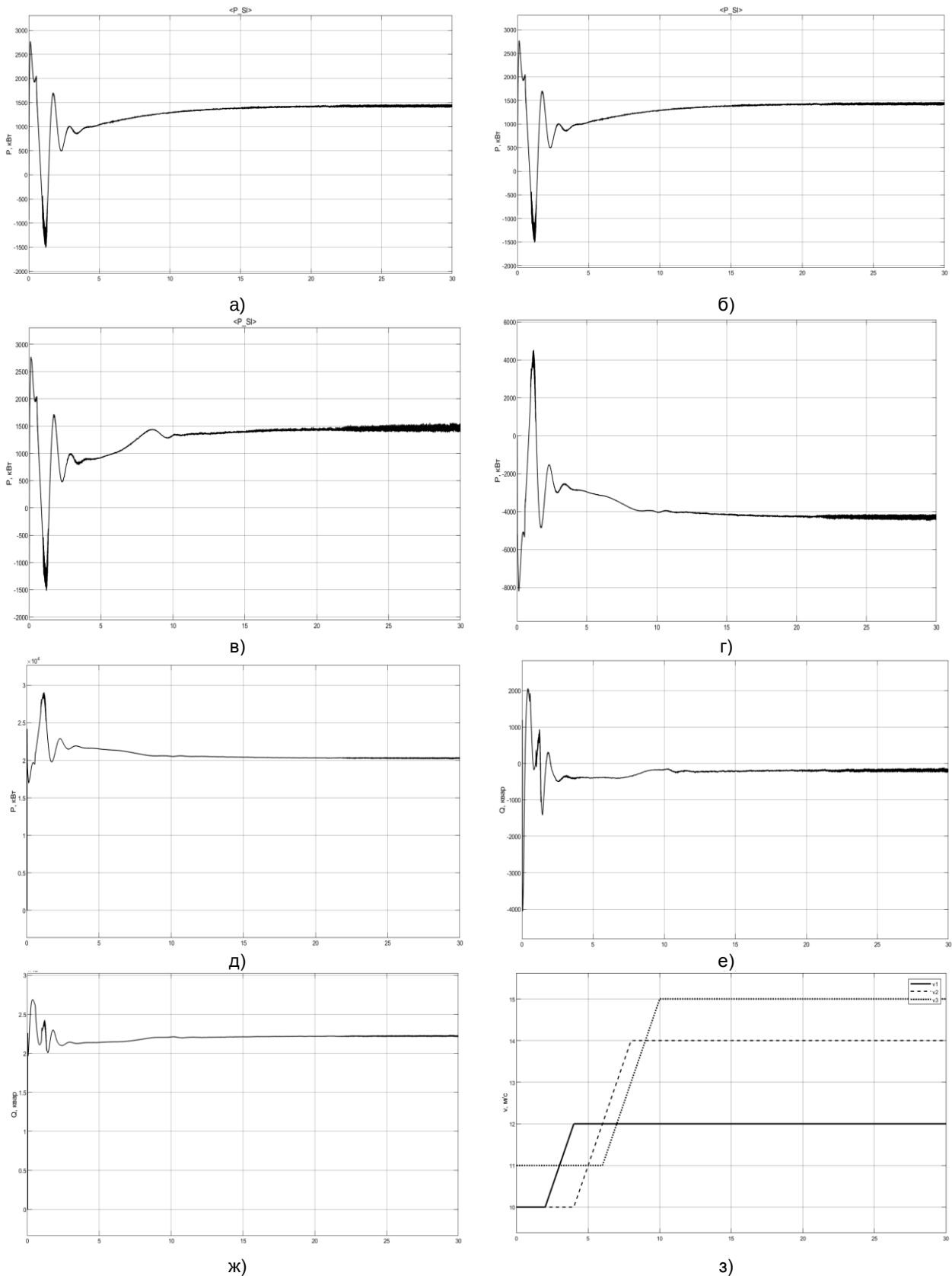
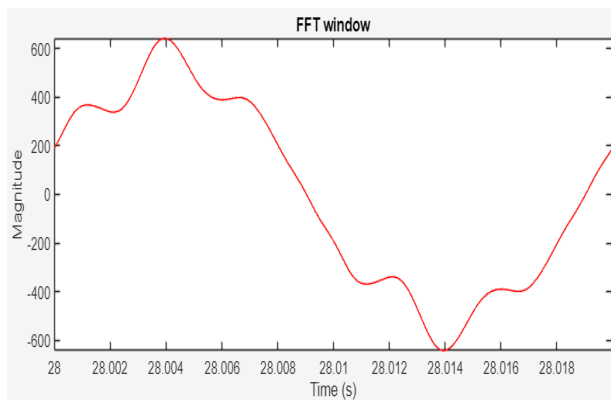
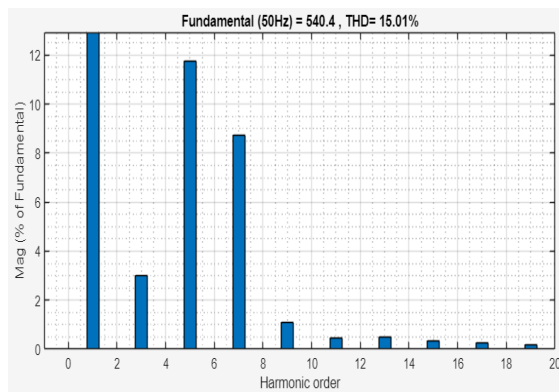


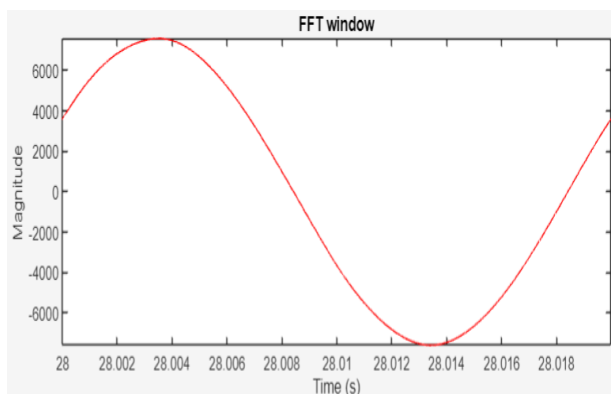
Рис. 7. Результаты моделирования мощностей и скорости ветра: а – активная мощность генератора 1; б – активная мощность генератора 2; в – активная мощность генератора 3; г – активная мощность на стороне 690 В; д – активная мощность на стороне 10 кВ; е – реактивная мощность на стороне 690 В; ж – реактивная мощность на стороне 10 кВ; з – заданные графики изменения скорости ветра для каждого генератора (сплошная линия, пунктирная линия и точечная линия соответствуют первой, второй и третьей ВЭУ)



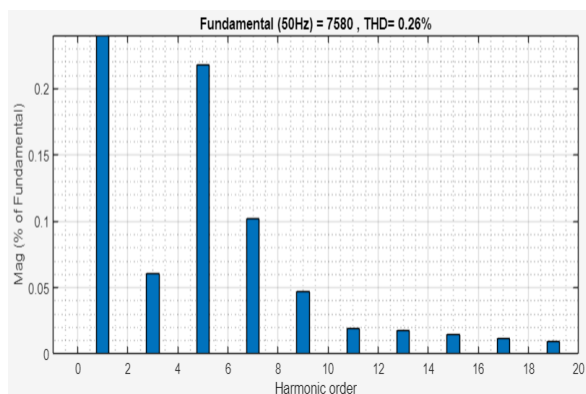
а)



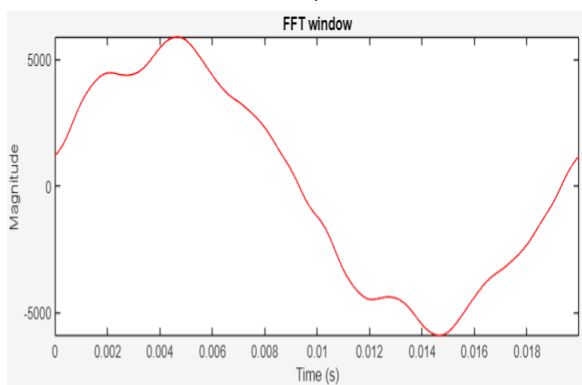
б)



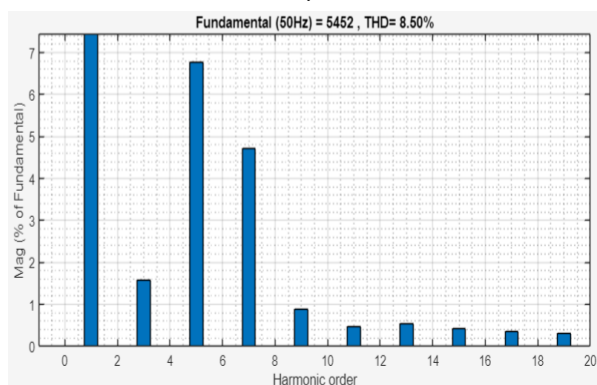
в)



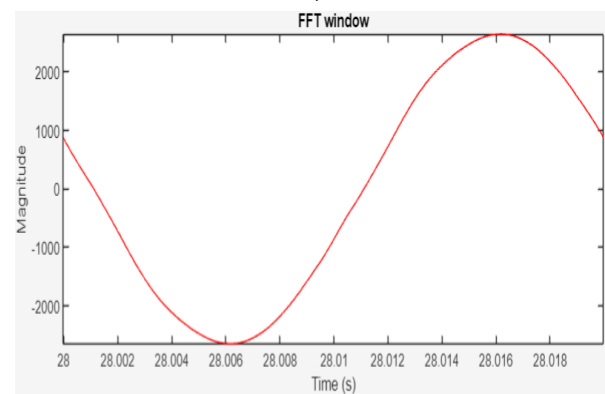
г)



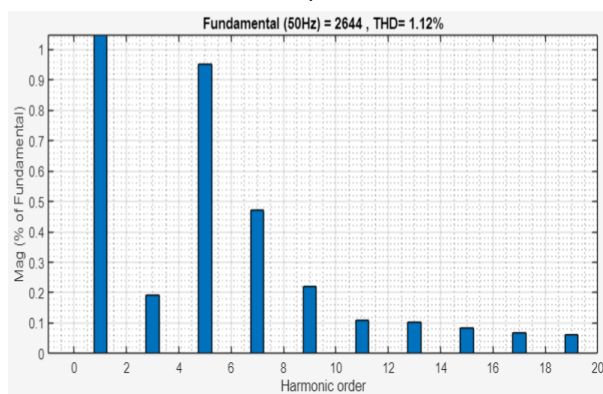
д)



е)



ж)



з)

Рис. 8. Результаты моделирования напряжения и тока: а – напряжение ВЭС на стороне 690 В; б – спектр напряжения ВЭС на стороне 690 В; в – напряжение ВЭС на стороне 10 кВ; г – спектр напряжения ВЭС на стороне 10 кВ; д – ток ВЭС на стороне 690 В; е – спектр тока ВЭС на стороне 690 В; ж – ток ВЭС на стороне 10 кВ; з – спектр тока ВЭС на стороне 10 кВ

Активная мощность каждой ветроустановки начинает расти с увеличением скорости ветра, достигая своего стабилизированного значения. В связи с этим была смоделирована ситуация, в которой ветрогенераторы работают при различных условиях, обусловленных разной скоростью ветра (12, 14, 15 м/с), что приводит к различным генерируемым активным мощностям (1,39, 1,46, 1,5 МВт). Суммарная генерируемая активная мощность трех генераторов на шине

690 В составила, 4,35 МВт, а реактивная мощность составила 250 кВАр, что является очень хорошим показателем. Активная мощность на стороне НН трансформатора 110/10 кВ составила 21 МВт, а реактивная мощность – 22,5 МВАр, что говорит о необходимости компенсации реактивной мощности. Результаты измерения коэффициентов гармонических составляющих напряжений и их нормированные значения² представлены в табл. 5.

Таблица 5. Коэффициенты гармонических составляющих напряжения

Порядок гармонической составляющей	Значения коэффициентов напряжения гармонических составляющих в % от U_1 по ГОСТ		Значения коэффициентов напряжения гармонических составляющих в % от U_1 в модели	
	напряжение электрической сети, кВ			
	0,38–1	6–25	0,69	10
3	5	3	2,25	0,055
5	6	4	10,7	0,205
7	5	3	8,5	0,108
9	1,5	1	1,5	0,04
11	3,5	2	0,48	0,018
13	3	2	0,5	0,015
15	0,3	0,3	0,3	0,011
17	2	1,5	0,3	0,012
19	1,5	1	0,1	0,01
21	0,2	0,2	0,1	0,009
Суммарный	8	5	15,01	0,26

Расчет дополнительных потерь мощности в линиях электропередачи [15] производится по формуле

$$\Delta P_{\text{ЛЭП}} = 3 \sum_{n=2}^m I_n^2 R_{\text{ЛЭП}} k_m, \quad (1)$$

где n – номер гармоники; m – число учитываемых гармоник; I_n – ток n -й гармоники; $R_{\text{ЛЭП}}$ – активное сопротивление линии на основной частоте; k_m – коэффициент увеличения сопротивлений в ЛЭП, учитывающий влияние поверхностного эффекта [3]:

$$k_m = 1 + \frac{\lambda^4}{3} \quad \text{для } \lambda < 1; \quad (2)$$

$$k_m = \lambda + 0,25 + \frac{0,047}{\lambda} \quad \text{для } \lambda > 1, \quad (3)$$

где $\lambda = 0,1 \sqrt{\frac{n}{r_{0(1)}}}$; n – номер гармоники; $r_{0(1)}$ – удельное активное сопротивление, Ом/км.

Потери мощности от высших гармоник в трансформаторах³ [3–13] рассчитываются как

$$\Delta P_T = \Delta P_{\text{xx}} \sum_{n=2}^m \left(\frac{U_n}{U_{\text{ном}}} \right)^2 + 0,607 \frac{\Delta P_{\text{xx}}}{U_{\text{кз}}^2} \times \sum_{n=2}^m \left(\left(\frac{1 + 0,05n^2}{n\sqrt{n}} \right) \left(\frac{U_n}{U_{\text{ном}}} \right)^2 \right), \quad (4)$$

где ΔP_{xx} – потери холостого трансформатора; n – номер гармоники; m – число учитываемых гармоник; $\Delta P_{\text{кз}}$ – потери короткого замыкания трансформатора; $U_{\text{кз}}$ – напряжение короткого замыкания трансформатора; U_n – напряжение n -й гармоники; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение.

Результаты расчета основных и дополнительных потерь активной мощности в элементах системы электроснабжения для разных уровней напряжения представлены в табл. 6.

Дополнительные потери от высших гармоник на напряжении 10 кВ составляют 0,047 % от основных потерь мощности. Следовательно, на шине 10 кВ компенсации высших гармоник тока не требуется. Дополнительные потери, вызванные высшими гармониками на уровне напряжения 0,69 кВ, составляют 10,48 % от основных потерь мощности, что свидетельствует о необходимости снижения уровня высших гармоник тока на этой шине.

² ГОСТ 30804.4.7–2013 Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств. – М.: Стандартинформ, 2013. – 40 с.; ГОСТ 32144–2013 Электрическая энергия. Совместимость технических

средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 36 с.

³ Там же.

Таблица 6. Расчет потерь активной мощности в элементах системы электроснабжения

Потери, кВт	ЛЭП 0,69 кВ	ЛЭП 10 кВ	T 110/10	T 10/0,69	Сумма 0,69 кВ	Сумма 10 кВ
Основные	242,7	23	319	42,5	561,7	65,49
Дополнительные	0,256	0,609	0,008	6,25	0,264	6,865

Вывод. В результате проведенных исследований можно сделать вывод о негативном влиянии параллельной работы ветрогенераторов на систему электроснабжения, связанном с несинусоидальностью напряжения и тока, что приводит к дополнительным потерям электроэнергии и другим нежелательным последствиям. Система распределенной генерации с параллельным подключением ветроустановок нуждается в разработке технических средств, предназначенных для повышения энергоэффективности работы ветроэнергетической системы.

Список литературы

1. Шатчилямбе В.Л., Фролов В.Я., Таджибаев А.И. Имитационное моделирование режимов работы ветроэлектростанции на базе трехфазного синхронного генератора с постоянными магнитами // *Электричество*. – 2024. – № 8. – С. 60–69. DOI: 10.24160/0013-5380-2024-8-60-69.
2. Каталог автоматических выключателей OptiMat-A [Электронный ресурс]. – URL: <https://energo5.ru/wp-content/uploads/2019/01/Katalog-OptiMat-A.pdf> (дата обращения: 10.04.2025).
3. Прасол Д.А. Электромагнитная совместимость в высоковольтных рудничных сетях с мощными тиристорными электроприводами постоянного тока [Электронный ресурс]: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Красноярск: СФУ, 2018.
4. Задорожный Я. Ветряные электростанции. Краткий обзор свойств и применений // *Przegląd Elektrotechniczny*. – 2012. – Т. 88, № 10а. – С. 1–6.
5. The Study of Solar and Wind Power Systems under Different Weather Conditions / A. Rama Krishna, A. Vijay Kumar, A. Gopala Krushna, et al. // *E3S Web of Conferences*. – 2024. – Т. 547. – 03009. DOI.org/10.1051/e3sconf/202454703009.
6. Ресурсы и технологии использования возобновляемых источников энергии / В.В. Елистратов, И.В. Богун, Р.С. Денисов и др. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – 528 с.
7. Фролов В.Я., Смородинов В.В. Источники питания. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 159 с.
8. Фролов В.Я., Сурма А.М., Васерина К.Н. Силовая полупроводниковая элементная база. Технология производства. Конструктивные решения. – СПб.: Изд-во «Лань», 2019. – 228 с.
9. Фролов В.Я., Смородинов В.В., Зверев С.Г. Силовая электроника. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 281 с.
10. IGBT модуль МТКИ-2400-17Т [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elvpr.ru/ru/catalog/silovye-poluprovodnikovye-pribory/igbt-i-frd-moduli/igbt-moduli/igbt-modul-mtki-2400-17t/?ysclid=m6c09dyu9b957667222> (дата обращения 02.01.25).
11. Гордиевский Е.М. Разработка модели ветроэнергетической установки в программе Matlab/Simulink // *Наука ЮУрГУ*. – 2020. – № 7. – С. 25–32.
12. Рамадан А. Обоснование параметров систем энергоснабжения на основе ВИЭ для условий Сирии: дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2020. – 183 с.
13. Оценка дополнительных потерь мощности от снижения качества электрической энергии в элементах системы электроснабжения / С.Ю. Долингер, А.Г. Лютаревич, В.Н. Горюнов и др. // *Омский научный вестник*. – 2013. – № 2. – С. 178–183.

References

1. Shatchilembe, V.L., Frolov, V.Ya., Tadzhibaev, A.I. Imitatsionnoe modelirovanie rezhimov raboty vetroelektrostantsii na baze trekhfaznogo sinkhronnogo generatora s postoyannymi magnitami [Simulation modeling of wind power plant operating modes based on a three-phase synchronous generator with permanent magnets]. *Elektrichestvo*, 2024, no. 8, pp. 60–69. DOI: 10.24160/0013-5380-2024-8-60-69.
2. Katalog avtomaticheskikh vyklyuchateley OptiMat-A [Catalog of OptiMat-A circuit breakers]. Available at: <https://energo5.ru/wp-content/uploads/2019/01/Katalog-OptiMat-A.pdf> (date of access: 10.04.2025).
3. Prasol, D.A. Elektromagnitnaya sovместimost' v vysokovol'tnykh rudnichnykh setyakh s moshchnymi tiristornymi elektroprivodami postoyannogo toka. Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Electromagnetic compatibility in high-voltage mine networks with powerful thyristor DC electric drives. Abstr. cand. tech. sci. diss.]. Krasnoyarsk: SFU, 2018.
4. Zadorozhnyy, Ya. Vetryanye elektrostantsii. Kratkiy obzor svoystv i primeneniye [Wind Power Plants – A Brief Review of Properties and Applications]. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2012, vol. 88, no. 10a, pp. 1–6.
5. Rama Krishna, A., Vijay Kumar, A., Gopala Krushna, A., Shanmugapriyan, J., Keertana, C. The Study of Solar and Wind Power Systems under Different Weather Conditions. *E3S Web of Conferences*, 2024, vol. 547, 03009. DOI.org/10.1051/e3sconf/202454703009.
6. Elistratov, V.V., Bogun, I.V., Denisov, R.S., Kudryasheva, I.G., Romanov, M.V. *Resursy i tekhnologii ispol'zovaniya vozobnovlyаемых istochnikov energii* [Resources and Technologies for Using Renewable Energy Sources]. Saint-Petersburg: POLITECH-PRESS, 2022. 528 p.
7. Frolov, V.Ya., Smorodinov, V.V. *Istochniki pitaniya* [Power Sources]. Saint-Petersburg: Izdatel'stvo Politekhnikheskogo universiteta, 2008. 159 p.
8. Frolov, V.Ya., Surma, A.M., Vaserina, K.N. *Silovaya poluprovodnikovaya elementnaya baza. Tekhnologiya proizvodstva. Konstruktivnye resheniya* [Power semiconductor element base. Manufacturing technology. Design solutions]. Saint-Petersburg: Izdatel'stvo «Lan», 2019. 228 p.
9. Frolov, V.Ya., Smorodinov, V.V., Zverev, S.G. *Silovaya elektronika* [Power electronics]. Saint-Petersburg: Izdatel'stvo Politekhnikheskogo universiteta, 2011. 281 p.
10. IGBT module MTKI-2400-17T. Available at: <https://www.elvpr.ru/ru/catalog/silovye-poluprovodnikovye-pribory/igbt-i-frd-moduli/igbt-moduli/igbt-modul-mtki-2400-17t/?ysclid=m6c09dyu9b957667222> (accessed 02.01.25).
11. Gordievskiy, E.M. Razrabotka modeli vetroenergeticheskoy ustanovki v programme Matlab/Simulink [Development of a wind power plant model in the Matlab/Simulink program]. *Nauka YuUrGU*, 2020, no. 7, pp. 25–32.
12. Ramadan, A. *Obosnovanie parametrov sistem energosnabzheniya na osnove VIE dlya usloviy Sirii*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Justification of the parameters of energy supply systems based on renewable energy sources for Syrian conditions. Cand. tech. sci. diss.]. Saint-Petersburg, 2020. 183 p.
13. Dolinger, S.Yu., Lyutarevich, A.G., Goryunov, V.N., Safonov, D.G., Cheremisin, V.T. Otsenka dopolnitel'nykh poter' moshchnosti ot snizheniya kachestva elektricheskoy energii v elementakh sistemy elektrosnabzheniya [Assessment of Additional Power Losses from a Decrease in the Quality of Electrical Energy in Elements of the Power Supply System]. *Omskiy nauchnyy vestnik*, 2013, no. 2, pp. 178–183.