

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»**

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

№ 3

Нижний Новгород 2021

УДК 621.3
ББК 31.2

Интеллектуальная электротехника / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2021. № 3 (15). – 128 с.

Выходит 4 раза в год

Главный редактор А.Б. Лоскутов

зам. гл. редактора

Андрей Борисович Дарьенков д-р техн. наук, доцент
Елена Николаевна Соснина д-р техн. наук, проф.

отв. секретарь

Андрей Владимирович Шалухо канд. техн. наук

отв. редактор

Валерия Игоревна Казакова канд. филос. наук, доцент

гл. редактор выпуска

Иван Алексеевич Липужин канд. техн. наук

ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ:

Геннадий Яковлевич Вагин	д-р техн. наук, профессор
Николай Иванович Воропай	член-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор
Леонид Абрамович Герман	д-р техн. наук, профессор
Валерий Геннадьевич Гольдштейн	д-р техн. наук, профессор
Игорь Васильевич Гуляев	д-р техн. наук, профессор
Павел Владимирович Илюшин	д-р техн. наук
Анатолий Викторович Кузнецов	д-р техн. наук, профессор
Александр Леонидович Куликов	д-р техн. наук, профессор
Виктор Николаевич Мещеряков	д-р техн. наук, профессор
Георгий Борисович Онищенко	д-р техн. наук, профессор
Александр Сергеевич Плехов	канд. техн. наук, доцент
Александр Юрьевич Смирнов	д-р техн. наук, доцент
Владимир Георгиевич Титов	д-р техн. наук, профессор
Олег Станиславович Хватов	д-р техн. наук, профессор
Юрий Иванович Хохлов	д-р техн. наук, профессор
Александр Иванович Чивенков	д-р техн. наук, профессор
Roustiam Chakirov	Dr.-Ing., Prof. Dr., проф. H-BRS, Германия

Учредитель:

федеральное государственное образовательное учреждение
высшего образования «Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева»

(603950, Нижегородская обл., г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24)

Электронная версия журнала:
<https://ie.nntu.ru>

*Свидетельство о регистрации
периодического печатного издания
ПИ № ФС77-81688 от 06 августа 2021 г.*

ISSN 2658-6754

УДК 621.3

© Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ.....	4
Лоскутов А.А., Лоскутов А.Б., Шальнов Ю.С. Анализ устойчивости энергетической системы 110 кВ с использованием малогабаритных устройств продольной компенсации для воздушных ЛЭП.....	4
Герман Л.А., Гончаренко В.П., Карабанов А.А., Ковтун А.В. Переключаемая фильтрокомпенсирующая установка на посту секционирования контактной сети.....	23
Ермолаев А.И., Ерофеев В.И., Плехов А.С., Титов Д.Ю. Исследование магнитной вибрации асинхронного электродвигателя посредством МКЭ-моделирования.....	37
Кузнецов О.Н., Аверьянов Д.А. Анализ возможности повторения техасского сценария в Российских энергосистемах, содержащих значительную долю ВИЭ.....	57
Бурмакин О.А., Гуляев В.В., Малышев Ю.С., Попов С.В. Моделирование судовой электростанции со встроенной сетью постоянного тока в среде Matlab.....	75
Филатов Д.А., Терентьев П.В., Полумордвинов А.С. Исследование режимов работы систем освещения растений для вертикальных ферм с дифференцированным тарифом на электроэнергию.....	85
Рыжова Е.Л. Использование форматов виртуальной реальности при подготовке кадров для электроэнергетической отрасли посредством имитационного компьютерного моделирования.....	95
СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА	107
Куликов А.Л., Ваняев В.В., Дарьенков А.Б., Шахов А.В. Источник резервного электропитания с водородным топливным элементом и литий-железо-фосфатной аккумуляторной батареей.....	107

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.311.1

DOI 10.46960/2658-6754_2021_3_4

**АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
СИСТЕМЫ 110 кВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
МАЛОГАБАРИТНЫХ УСТРОЙСТВ ПРОДОЛЬНОЙ
КОМПЕНСАЦИИ ДЛЯ ВОЗДУШНЫХ ЛЭП****А.А. Лоскутов**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижегород, Россия

ORCID: 0000-0003-2228-596X e-mail: loskutov.nnov@gmail.com

А.Б. ЛоскутовНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижегород, Россия

ORCID: 0000-0003-1961-1728 e-mail: loskutovab@mail.ru

Ю.С. ШальновНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижегород, Россия

e-mail: shalnov_yura@mail.ru

Рассмотрены распределенные средства продольной компенсации, устанавливаемые по всей длине воздушных линий (ВЛ) электропередачи, а именно: малогабаритные устройства продольной компенсации (МУПК). Выявлены основные преимущества использования МУПК, монтируемых на проводах ВЛ. С помощью программного комплекса *PSCAD* рассмотрено применение МУПК в электрической сети 110 кВ. Получены результаты по увеличению пропускной способности ВЛ и улучшению статической устойчивости узла нагрузки электрической сети путем повышения напряжения на конце электропередачи.

Ключевые слова: имитационное моделирование, малогабаритные устройства продольной компенсации, повышение пропускной способности, устойчивость электрической сети, FACTS, PSCAD.

Для цитирования: Лоскутов, А.А. Анализ устойчивости энергетической системы 110 кВ с использованием малогабаритных устройств продольной компенсации для воздушных ЛЭП / А.А. Лоскутов, А.Б. Лоскутов, Ю.С. Шальнов // Интеллектуальная электротехника. 2021. № 3. С. 4-22. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_3_4

ANALYSIS OF POWER SYSTEM 110 kV STABILITY USING SMALL LONGITUDINAL COMPENSATION DEVICES FOR OVERHEAD LINE

A.A. Loskutov

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

ORCID: 0000-0003-2228-596X e-mail: loskutov.nnov@gmail.com

A.B. Loskutov

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

ORCID: 0000-0003-1961-1728 e-mail: loskutovab@mail.ru

Yu.S. Shalnov

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

e-mail: shalnov_yura@mail.ru

Abstract. The article discusses the distributed means of longitudinal compensation installed along the entire length of the transmission line, namely, small-sized longitudinal compensation devices (SLCD). The main advantages of using SLCDs mounted on overhead lines are revealed. The application of the compensation devices in the 110 kV electrical network is considered using the PSCAD. Results were obtained to increase the transmission capacity of overhead lines and improve the static stability of the load node of the electrical network by increasing the voltage at the end of the transmission line.

Keywords: electrical grid stability, increasing transmission line capacity, FACTS, PSCAD, simulation, small-sized longitudinal compensation devices.

For citation: A.A. Loskutov, A.B. Loskutov and Yu.S. Shalnov, "Analysis of power system 110 kV stability using small longitudinal compensation devices for overhead line", *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 4-22, 2021.

DOI: 10.46960/2658-6754_2021_3_4

I. Введение

В России возрастают требования к максимальному использованию пропускной способности электрических сетей с целью повышения эффективности работы уже существующих линий электропередач, что может обеспечиваться с помощью управляемых (гибких) систем электропередач переменного тока (*FACTS*). Передача энергии ведется по проводам, следовательно, максимальная передаваемая мощность будет зависеть от пара-

метров линии. Строительство дополнительных высоковольтных линий может быть сопряжено с высокими затратами, соответственно, необходимо увеличивать пропускную способность уже имеющихся линий, уделяя также внимание повышению устойчивости электрических систем. Целесообразно внедрять в электрические системы и сети установки по компенсации реактивной мощности и компенсации индуктивного сопротивления, что является очевидным уже на этапе технико-экономической разработки плана развития сетевого района.

В России устройства *FACTS* пока не получили широкого распространения. Это связано с длительным сроком сооружения, высокой стоимостью и необходимостью отведения значительных площадей для размещения. Распределенные малогабаритные устройства продольной компенсации (МУПК) [1-5, 8, 10, 11] могут быть альтернативным устройствам *FACTS* вариантом. Данный класс устройств за счет управляемого воздействия на реактивную составляющую сопротивления воздушной линии (ВЛ) может осуществлять изменение их пропускной способности, обеспечивая оптимальное перераспределение потоков мощности между перегруженными и недогруженными линиями.

Способность МУПК влиять на перераспределение потоков мощности в линиях электропередачи, а также возможность изменения параметров и режимов работы данных устройств в темпе процесса (в режиме реального времени) позволяют рассматривать их в качестве эффективного технического инструмента как для существующих, так и для перспективных интеллектуальных электрических сетей.

II. Требования к устойчивости энергосистем

Для рассмотрения результатов применения устройств продольной компенсации (УПК) нужно обратить внимание на параметры устойчивости и коэффициентов, с помощью которых возможно определять степень статической устойчивости рассматриваемых участков сети. Статическую устойчивость можно определить как способность системы восстанавливать после малого возмущения исходный режим работы, или близкий к исходному, если возмущающее воздействие не снято.

При анализе статической устойчивости энергосистемы 110/10 кВ используются следующие оценочные показатели устойчивости [6]:

- 1) минимальный коэффициент запаса статической аperiodической устойчивости по активной мощности в контролируемых сечениях (K_P);
- 2) минимальный коэффициент запаса статической устойчивости по напряжению в узлах нагрузки (K_U).

В данной работе рассмотрено влияние УПК на коэффициент запаса статической устойчивости по напряжению в узлах нагрузки. Значения коэффициента запаса статической устойчивости в различных режимах работы в соответствии с [6] указаны в табл. 1.

Таблица 1.
Значения коэффициентов устойчивости

Table 1.
Stability coefficients

№	Электроэнергетический режим ЭС	K_U, min
1	Нормальный	0,15
2	Послеаварийный	0,10
3	Вынужденный	0,10

Коэффициент запаса статической устойчивости по напряжению в узлах нагрузки (K_U) определяется:

$$K_U = \frac{U - U_{\text{кр}}}{U_{\text{кр}}}, \quad (1)$$

где U – напряжение в узле нагрузки в рассматриваемом режиме, кВ;
 $U_{\text{кр}}$ – критическое напряжение в узле нагрузки, кВ.

Критическое напряжение в узлах нагрузки соответствует границе статической устойчивости электродвигательной нагрузки и определяется на основании фактических данных, предоставленных потребителем электрической энергии. При отсутствии данных критическое напряжение следует принимать равным [6]:

$$U_{\text{кр}} = 0,7 \cdot U_{\text{ном}}, \quad (2)$$

где $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение электрической сети, кВ.

Исходя из ГОСТ 32144-2013 о нормах качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [7], предназначенного для регулирования напряжения в точках передачи электрической энергии пользователям электрических сетей низкого, среднего и высокого напряжения систем электроснабжения общего назначения переменного тока частотой 50 Гц, положительные и отрицательные отклонения напряжения в точке передачи электрической энергии не должны превышать 10 % номинального или согласованного значения напряжения в течение 100 % времени интервала в одну неделю.

Таким образом, для сети 110 кВ минимальное и максимальное значения напряжений соответствуют:

$$U_{\text{min}} = U_{\text{ном}} \cdot 0,9 = 110 \cdot 0,9 = 99 \text{ кВ}, \quad (3)$$

$$U_{\text{max}} = U_{\text{ном}} \cdot 1,1 = 110 \cdot 1,1 = 121 \text{ кВ}. \quad (4)$$

В сети 110 кВ $U_{кр}$ равно:

$$U_{кр} = 0,7 \cdot 110 = 77 \text{ кВ}. \quad (5)$$

Поскольку минимальное значение K_u в нормальном режиме равно 0,15, напряжение в сети 110 кВ, при котором достигается данная величина, вычисляется из формулы (1):

$$U = K_U \cdot U_{кр} + U_{кр} = 0,15 \cdot 77 + 77 = 88,55 \text{ кВ}.$$

Получив критическое напряжение по статической устойчивости узла нагрузки, следует рассчитать K_u для допустимого минимального, максимального и для номинального напряжений, определяемый выше по нормам качества электроэнергии:

$$K_{U \min} = \frac{99 - 77}{77} = 0,286, \quad (6)$$

$$K_{U \max} = \frac{121 - 77}{77} = 0,571, \quad (7)$$

$$K_{U \text{ном}} = \frac{110 - 77}{77} = 0,429. \quad (8)$$

Таким образом, имеется диапазон изменения K_U , относительно которого будут сравниваться полученные значения в рассматриваемых режимах работы УПК.

III. Малогабаритные устройства продольной компенсации

МУПК основано на технологии *Smart Wire* (умный провод) [8] и обеспечивают управляемое воздействие на реактивную составляющую сопротивления ЛЭП.

Основными эффектами от применения МУПК являются:

- 1) перераспределение мощности между отдельными параллельно работающими линиями или сечениями;
- 2) повышение пропускной способности;
- 3) повышение устойчивости и надежности работы;
- 4) уменьшение потерь энергии.

Массогабаритные характеристики МУПК позволяют размещать их на линиях электрических передач. При этом управляемые элементы распределяются вдоль всего маршрута размещения. Таким образом, появляется возможность различной компоновки устройств компенсации реактивной мощности по всему рассматриваемому участку электрической сети.

Размещение МУПК на проводах позволяет не использовать высоковольтную изоляцию ввиду значительного удаления от поверхности земли, что влияет на стоимость устройств. Одним из главных преимуществ является конструктивное исполнение, позволяющее без разрыва проводов монтировать устройства на воздушные линии, а значит, возможно применение не только на новых ЛЭП, но и на работающих участках электрических сетей. Также важным пунктом является высокая мобильность устройств и их демонтаж [8].

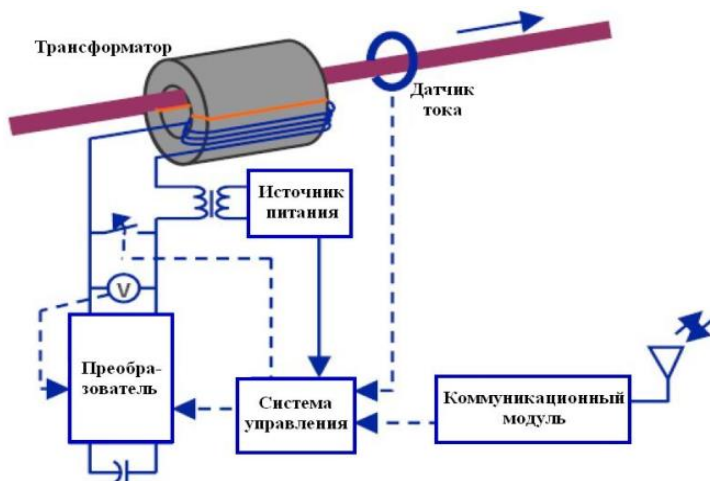


Рис. 1. Обобщенная структура МУПК

Fig. 1. Generalized structure of the small-sized longitudinal compensation devices

Подключение емкости к вторичной обмотке приводит к образованию колебательного контура, вторым элементом которого является индуктивность намагничивания силового трансформатора. В зависимости от соотношения емкости, приведенной к первичной обмотке, и индуктивности намагничивания трансформатора, могут наблюдаться два разных влияния на выходное реактивное сопротивление контура.

IV. Моделирование применения УПК в сети 110 кВ

Для рассмотрения эффектов от применения МУПК в программном комплексе *PSCAD* произведено моделирование эквивалентного по принципу влияния на электрические параметры системы устройства продольной компенсации (УПК). Модель электрической сети с УПК представлена на рис. 2.

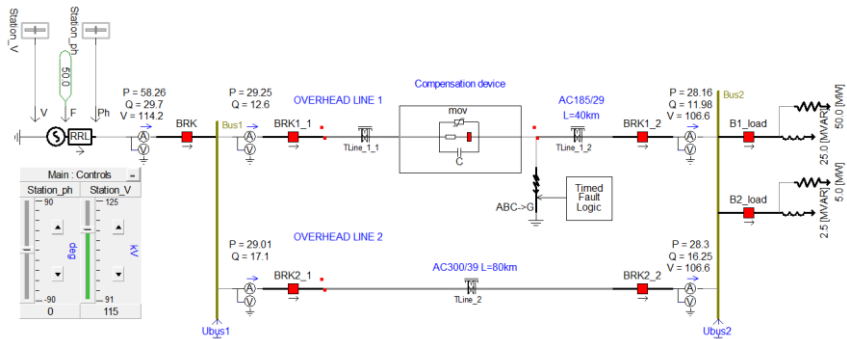


Рис. 2. Электрическая сеть с УПК

Fig. 2. Electric network with longitudinal compensation device

Параметры элементов имитационной модели представлены в табл. 2.

Таблица 2.

Параметры элементов имитационной модели

Table 2.

Parameters of elements of the simulation model

Параметр	Ед. изм.	Значение	
<i>Источник</i>			
Базовое напряжение	кВ	115	
Импеданс	Ом	2,66 ∠ 88°	
<i>Нагрузка</i>			
		<i>P</i>	<i>Q</i>
Нагрузка-1 (B1_load)	МВт, Мвар	50	25
Нагрузка-2 (B2_load)	МВт, Мвар	5	2,5
Нагрузка-3 (B3_load)	МВт, Мвар	5	2,5
<i>Воздушные линии электропередачи</i>			
		ВЛ-1	ВЛ-2
Марка и сечение провода	-	185/29	300/39
Удельное активное сопротивление	Ом/км	0,1591	0,0958
Среднегеометрическое расстояние между фазами	м	13,572	13,572
Диаметр провода	мм	18,8	21,6
Удельное реактивное сопротивление	Ом/км	0,472	0,464
Удельная емкостная проводимость	мкСм/км	2,399	2,446
Длина ЛЭП	км	80	80

Продолжение табл. 2.
Table 2 (continued).

Полное активное сопротивление линии	Ом	12,728	7,664
Полное индуктивное сопротивление ВЛ	Ом	37,780	37,083
Полная емкостная проводимость линии	мкСм	191,928	195,662

При имитационном моделировании в *PSCAD* рассмотрен метод защиты УПК с помощью варистора и токоограничивающей ветви (рис. 3). Проверка работы будет осуществлена с помощью моделирования короткого замыкания на линии, где установлено устройство компенсации.

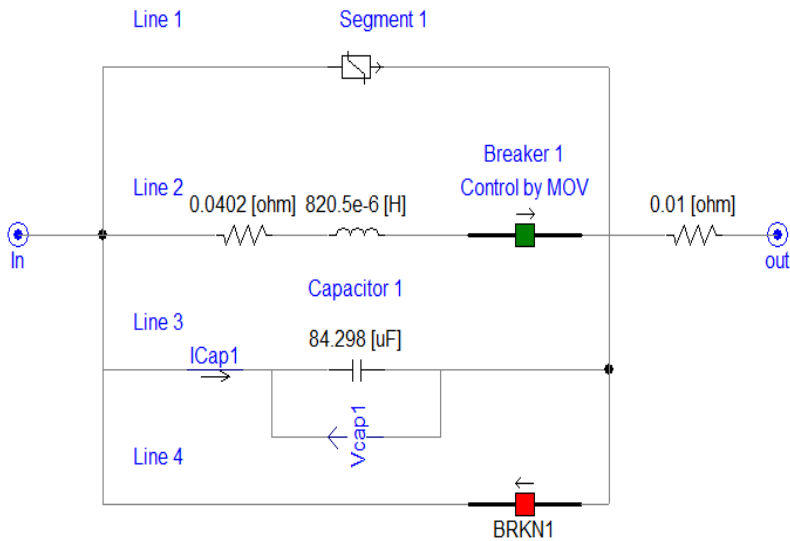


Рис. 3. Модель УПК

Fig. 3. Model of the longitudinal compensation device

Модель УПК состоит из четырех ветвей, включающих в себя варистор, конденсатор, токоограничивающую ветвь и ветвь для режима отключения УПК из работы [4]. Главным элементом является конденсатор. Его емкость подбирается в зависимости от сопротивления линии и нужной компенсации. Данные представлены в табл. 3.

Таблица 3.
 Параметры УПК при различном проценте
 изменения индуктивного сопротивления ВЛ

Table 3.
 Parameters of the longitudinal compensation device with a different percentage
 of change in the inductive resistance of the overhead line

$k_{\text{сопр}}, \%$	Вводимое $X_c, \text{ Ом}$	$C, \text{ мкФ}$
0	0	0
20	7,552	421,491
40	15,104	210,745
60	22,656	140,497
80	30,208	105,373
100	37,76	84,298

У. Методика расчета емкости УПК

Для моделирования УПК на воздушных линиях нужно рассчитать емкость конденсаторной батареи, которая приводит к изменению индуктивной составляющей сопротивления воздушной линии. Сопротивление ВЛ состоит из активной и индуктивной составляющих. В табл. 2 рассчитаны параметры для ВЛ-1 и ВЛ-2.

УПК способно изменять реактивное сопротивление ВЛ в соответствии с выражением:

$$X_{\text{ВЛ}} = X_L - X_c. \quad (9)$$

где X_L – индуктивное сопротивление ВЛ, X_c – емкостное сопротивление, вносимое УПК.

Таким образом, с помощью УПК можно менять реактивное сопротивление ВЛ, что влияет на снижение потерь напряжения на участке ВЛ:

$$\Delta U = \frac{P \cdot R + Q \cdot (X_L - X_c)}{U_{\text{ном}}}, \quad (10)$$

где P – активная мощность, Q – реактивная мощность, R – активное сопротивление ВЛ, $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение.

Находим нужное емкостное сопротивление в зависимости от того, на сколько процентов нужно снижать индуктивное сопротивление ВЛ:

$$X_c = k_{\text{сопр}} \cdot X_L, \quad (11)$$

где $k_{\text{сопр}}$ – коэффициент сопротивления, зависит от процента снижения

индуктивной составляющей сопротивления ВЛ.

Коэффициент сопротивления выбирается в зависимости от того, на какую величину нужно снижать индуктивное сопротивление ВЛ.

Далее определяется емкость конденсатора:

$$C = \frac{10^6}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot X_c} \cdot \quad (12)$$

После этого полученные емкости вводятся в устройство УПК.

Таким образом, для получения итогового сопротивления ВЛ при включении УПК, нужно из индуктивного сопротивления ВЛ (табл. 2) вычесть вводимое емкостное сопротивление, как это показано в (9).

VI. Работа УПК при включенной одной ВЛ-1 110 кВ

Рассмотрим режим при работе одной ВЛ 110 кВ (рис. 2). Емкость УПК выбирается в зависимости от сопротивления ЛЭП. Обычно конденсаторы применяются для компенсации от 25 до 75 % индуктивного сопротивления линии электропередачи [9]. При моделировании произведены изменения сопротивления от 20 до 100 %.

Произведен расчет сети без применения УПК для рассмотрения начальных значений напряжения, мощностей и токов без воздействия конденсаторов. При нормальном режиме работы без УПК ток в линии составляет 308 А, напряжение на узле нагрузки 98,07 кВ, что ниже порога по допустимому минимальному напряжению в соответствии с [7]. Соответственно, нужно повысить напряжение на конце передачи с помощью УПК.

Результаты расчетов режима работы ВЛ при включении УПК приведены в табл. 4-7. В табл. 4 приведено изменение тока в линии при изменении индуктивного сопротивления ВЛ-1, при этом провод АС 185/29 имеет длительно-допустимый ток 510 А. При уменьшении индуктивного сопротивления ВЛ-1 за счет внедрения УПК ток повышается, соответственно, процент загрузки по току повышается на 6,08 %. При внедрении УПК на 100 % наблюдается увеличение среднеквадратичного значения напряжения с 98,07 до 107,5 кВ, что способствовало уменьшению снижения напряжения ниже установленных в [7] значений при дополнительной загрузке сети (табл. 5). При внедрении УПК на 20 % уже имеет место увеличение напряжения с 98,07 кВ до 100,1 кВ, что входит в допустимые значения по [7]. Также увеличен коэффициент запаса статической устойчивости по напряжению при максимальной работе УПК с 0,274 до 0,396 (на 30,8 %). При том, что минимальное значение коэффициента при допустимых уровнях напряжения (99 кВ) согласно (6) составляет 0,286. Исходя из данных табл. 6, можно сделать вывод, что передаваемая активная мощность увеличивается с уменьшением индуктивного сопротивления.

Таблица 4.
Изменение тока линии электропередачи 110 кВ при работе УПК

Table 4.
Change in the current of the 110 kV power transmission line during the operation of the longitudinal compensation device

$X_{ВЛ-1}$, Ом	Вводимое сопротивление УПК X_c , %	Ток ЛЭП, А	Процент загрузки по току, %
37,76	0	308	60,39
30,208	20	315	61,76
22,656	40	321	62,94
15,104	60	327	64,12
7,552	80	333	65,29
0	100	339	66,47

Таблица 5.
Изменение напряжения в узле нагрузки 110 кВ при работе УПК

Table 5.
Voltage change at the 110 kV load node during the operation of the longitudinal compensation device

$X_{ВЛ-1}$, Ом	Вводимое сопротивление УПК X_c , %	Напряжение, кВ	K_U
37,76	0	98,07	0,274
30,208	20	100,1	0,300
22,656	40	102	0,325
15,104	60	103,9	0,349
7,552	80	105,7	0,373
0	100	107,5	0,396

Таблица 6.
Параметры активной мощности при применении УПК

Table 6.
Active power parameters when using longitudinal compensation device

Изменение емкостного сопротивления X_c , %	Начало ВЛ-1			Конец ВЛ-1		
	P без УПК, МВт	P с УПК, МВт	ΔP , МВт	P без УПК, МВт	P с УПК, МВт	ΔP , МВт
0	51,57	51,57	0	47,76	47,76	0
20	51,57	53,64	2,07	47,76	49,7	1,94
40	51,57	55,71	4,14	47,76	51,61	3,85
60	51,57	57,78	6,21	47,76	53,53	5,77

Продолжение табл. 6.
Table 6 (continued).

Изменение емкостного сопротивления X_C , %	Начало ВЛ-1			Конец ВЛ-1		
	P без УПК, МВт	P с УПК, МВт	ΔP , МВт	P без УПК, МВт	P с УПК, МВт	ΔP , МВт
80	51,57	59,84	8,27	47,76	55,44	7,68
100	51,57	61,86	10,29	47,76	57,31	9,55

При снижении индуктивного сопротивления наблюдается повышение передачи активной мощности по концу ВЛ-1, что благоприятно сказывается как на потребителе, так и на устойчивости узла нагрузки. Процент увеличения активной нагрузки при УПК 20 % равен 3,9 % (1,94 МВт), при УПК 100 % равен 16,66 % (9,55 МВт).

Таблица 7.
Параметры реактивной мощности при применении УПК

Table 7.
Reactive power parameters when using longitudinal compensation device

Изменение емкостного сопротивления X_C , %	Начало электропередачи			Конец электропередачи		
	Q без УПК, Мвар	Q с УПК, Мвар	ΔQ , Мвар	Q без УПК, Мвар	Q с УПК, Мвар	ΔQ , Мвар
0	32,61	32,61	0	23,87	23,87	0
20	32,61	31,69	-0,92	23,87	24,84	0,97
40	32,61	30,58	-2,03	23,87	25,8	1,93
60	32,61	29,3	-3,31	23,87	26,76	2,89
80	32,61	27,83	-4,78	23,87	27,71	3,84
100	32,61	26,17	-6,44	23,87	28,65	4,78

Исходя из данных табл. 7, можно сделать вывод, что реактивная мощность повышается в конце линии на 4,78 Мвар, что составляет 16,66 %, но при этом наблюдается снижение в начале электропередачи на 6,44 Мвар, составляет 24,6 %, следовательно, линией потребляется меньше реактивной мощности.

Таким образом, при работе ВЛ-1 с УПК повышается передаваемая активная мощность и увеличивается уровень напряжения в конце передачи, что способствует улучшению коэффициента запаса статической устойчивости по напряжению.

VIII. Работа УПК при включенных двух параллельных ВЛ-1 и ВЛ-2 110 кВ

Рассмотрим режим при работе двух параллельных ВЛ-1 с проводом АС 185/29 и ВЛ-2 с проводом АС 300/39. УПК устанавливается на ВЛ-1.

Таблица 8.
Изменение тока в ВЛ-1 и ВЛ-2 110 кВ при работе УПК в ВЛ-1

Table 8.
Change in current in 110 kV overhead lines 1 and 2 during operation of the longitudinal compensation device installed in overhead line 1

$X_{ВЛ-1}, \text{ Ом}$	Вводимое сопротивление УПК $X_c, \%$	Ток ВЛ-1, А	Процент загрузки по току ВЛ-1, %	Ток ВЛ-2, А	Процент загрузки по току ВЛ-2, %
37,76	0	161	31,57	170	23,94
30,2	20	179	35,10	154	21,69
22,65	40	200	39,22	136	19,15
15,1	60	227	44,51	116	16,34
7,552	80	261	51,18	98	13,80
0	100	303	59,41	97	13,66

Таблица 9.
Изменение напряжения в узле нагрузки 110 кВ при работе УПК в ВЛ-1

Table 9.
Voltage changes in the 110 kV load node during the operation of the longitudinal compensation device in the overhead line 1

$X_{ВЛ-1}, \text{ Ом}$	Вводимое сопротивление УПК $X_c, \%$	Напряжение, кВ	K_U
37,76	0	106,7	0,386
30,2	20	107,1	0,391
22,65	40	107,4	0,395
15,1	60	107,8	0,400
7,552	80	107,9	0,401
0	100	107,9	0,401

Как видно из табл. 8, при уменьшении индуктивного сопротивления ВЛ-1 за счет внедрения УПК на 100 %, ток повышается с 161 до 303 А (с 31,57 до 59,41 % загрузки по току), а в ВЛ-2 наблюдается снижение с 170 до 97 А (с 23,94 до 13,66 % загрузки по току). При применении УПК на участке с двумя параллельными ВЛ изменение напряжения на конце электропередачи незначительно (табл. 9). Уровень напряжения на конце электропередачи при работе двух ВЛ-1 и ВЛ-2 (106,7 кВ) выше, чем при работе одной ВЛ-1 (98,07 кВ) на 8,63 кВ, что уже предотвращает снижение нап-

ряжения до недопустимых значений. Изменение коэффициента запаса статической устойчивости также является незначительным: с 0,386 до 0,401.

Рассмотрим изменение передаваемой мощности (табл. 10). При изменении сопротивления ВЛ-1 с помощью УПК наблюдается переток мощности между параллельными ВЛ-1 и ВЛ-2. Данные результаты нужно применять в сетевых районах, где наблюдается превышение загрузки одной из ВЛ. Для этого с помощью УПК можно изменить сопротивление ВЛ и изменить переток мощности, чтобы разгрузить перегруженную ВЛ.

Таблица 10.
Параметры активной и реактивной мощности при УПК в ВЛ-1

Table 10.
Parameters of active and reactive power at the longitudinal compensation device in the overhead line 1

Изменение емкостного сопротивления X_c , %	Активная мощность (P), МВт			Реактивная мощность (Q), Мвар		
	ВЛ-1	ВЛ-2	Δ	ВЛ-1	ВЛ-2	Δ
0	28,16	28,3	0,14	11,98	16,25	4,27
20	31,65	25,22	-6,43	12,33	16,1	3,77
40	35,96	21,3	-14,66	12,43	16,2	3,77
60	41,33	16,27	-25,06	12,11	16,69	4,58
80	48,02	9,741	-38,279	10,96	17,92	6,96
100	56,19	1,304	-54,886	8,184	20,56	12,376

VIII. Моделирование устройства защиты УПК от короткого замыкания

Последовательные конденсаторы подвергаются воздействию широкого диапазона токов, что может привести к возникновению больших напряжений на конденсаторах. При коротких замыканиях ток и напряжение на выводах конденсаторов резко возрастают. Во избежание пробоя конденсаторов они должны быть защищены специальным оборудованием. Таким образом, для предотвращения выхода из работы УПК важно обратить внимание на вопрос защиты конденсатора от перенапряжений при аварийных ситуациях в сетевом районе.

Модель *PSCAD* предусматривает защиту УПК от перенапряжений с помощью варистора (рис. 3). На ВЛ-1 смоделировано короткое замыкание в момент времени 2 с (рис. 4). Это приведет к увеличению напряжения на конденсаторе. Устройство защиты становится активным, когда напряжение конденсатора пытается превысить защитный уровень. В ответ варистор ограничит напряжение конденсатора на защитном уровне и не позволит ему возрасти.

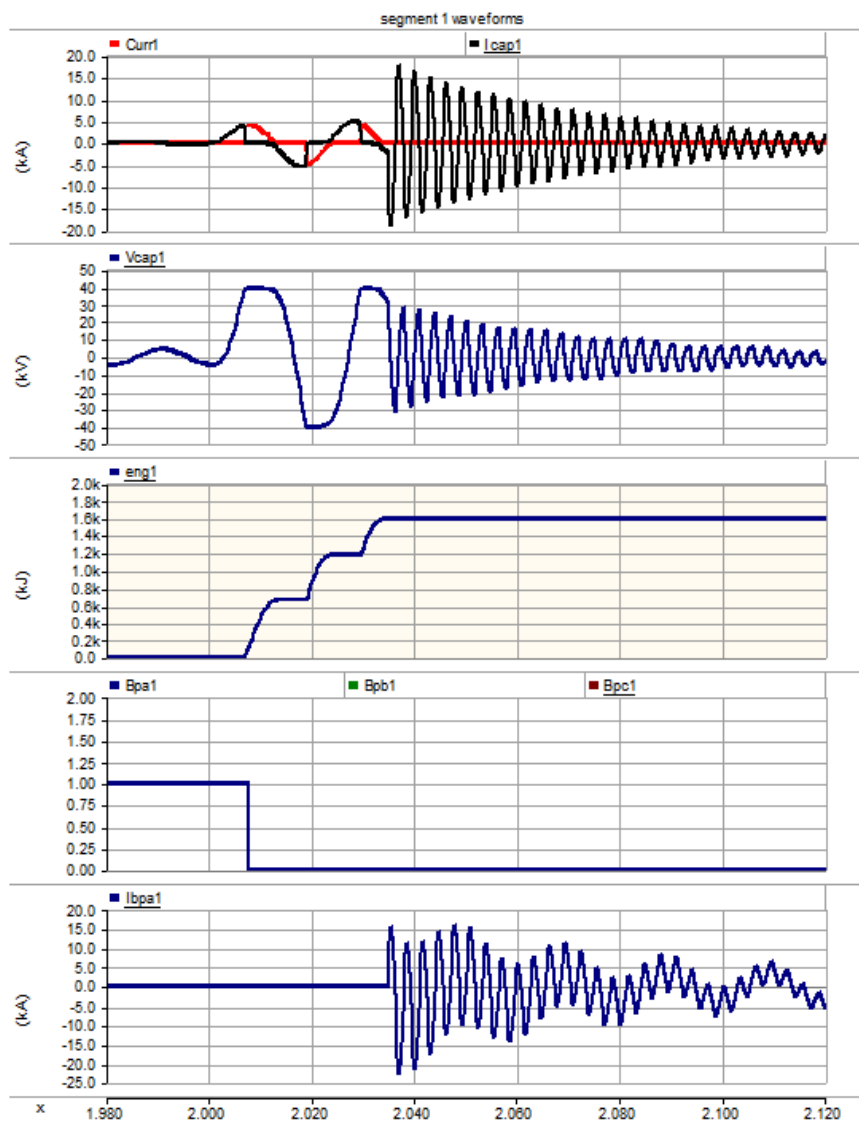


Рис. 4. Осциллограммы при работе защиты во время КЗ

Fig. 4. Oscillograms of protection operation during short circuit

При превышении напряжения на конденсаторе (V_{cap1}) варистор начинает менять свою вольтамперную характеристику и подавать ток в противофазе для уменьшения тока через конденсатор. Когда один из сигналов энергии или тока превышает допустимое значение на варисторе (*engal* и *curral*), в работу включается выключатель второй цепи, который перенаправляет ток КЗ от варистора. На графиках момент включения в работу выключателя второй ветви показан как *Bpa1* (рис. 4). Катушка индуктивности ограничивает выбросы высокочастотных токов, а резистор обеспечивает дополнительное демпфирование.

Напряжение на конденсаторе (V_{cap1}) ограничивается до тех пор, пока напряжение превышает допустимое значение. Как только оно перестает превышать допустимую границу, варистор перестает ограничивать ток (график *Curr1*). На V_{cap1} наблюдается затухание напряжения до нормальных значений. После того как выполнено ограничение перенапряжения, наблюдается высокий ток на I_{cap1} (ток через выключатель второй линии), имеющий затухающий характер. Вместе с тем затухает напряжение, которое было ограничено ранее.

Таким образом, задача защиты конденсатора от перенапряжения выполняется.

IX. Заключение

Можно выделить следующие ключевые моменты в использовании УПК на имитационной модели PSCAD с двумя воздушными линиями и одним узлом нагрузки.

1. При внедрении УПК на 100 % в электрическую систему с работой одной ВЛ-1, наблюдаются:

- увеличение активной передаваемой мощности с 47,76 до 57,31 МВт, что составляет увеличение на 16,66 %;
- напряжение узла нагрузки увеличилось с 98,07 до 107,5 кВ;
- снижение реактивной мощности в начале ВЛ-1 на 6,44 Мвар, что составляет 24,6 %;
- повышение коэффициента статической устойчивости по напряжению с 0,274 до 0,396.

2. Данные при применении УПК при одной воздушной линии показывают увеличение передаваемой мощности, повышение напряжения на узле нагрузки, значительное уменьшение потребляемой реактивной мощности электропередачей и улучшение статической устойчивости, что подтверждает теоретические данные по основным преимуществам УПК.

3. Рассматривая применение УПК на участке с двумя ВЛ-1 и ВЛ-2 при установке компенсации на ВЛ-1, необходимо отметить, что изменения передаваемой мощности не столь значительны, как при одной ВЛ-1.

Изменяя сопротивление одной из ВЛ, мы наблюдаем переток мощ-

ности от одной к другой линии. Данный метод помогает разгружать перегруженные ВЛ и регулировать потоки мощности в сетевом районе. Например, при превышении загрузки ВЛ можно наблюдать зависимость перетока мощности, а также величины тока, проходящего по двум ВЛ

Данные по току до применения УПК показывают, что ток на первой ВЛ составляет 161 А, на второй – 170 А. Если нужно разгрузить ВЛ-2, тогда, благодаря работе УПК на 100 %, ток на ВЛ-1 возможно увеличить до 303 А, а на второй линии – уменьшать до 97 А. Следовательно, есть возможность изменять переток мощности в линиях, не допуская при этом перегрузки одной и недогрузки второй ВЛ.

УПК влияет на параллельные ВЛ по большей мере тем, что способствует регулированию перетоков мощности между линиями передачи. Такое свойство полезно, если определенные линии загружены достаточно сильно, по сравнению с другими. К примеру, согласно практике ведения режимов АО «СО ЕЭС» для ЛЭП, нагрузка которых более чем 75 % от максимально допустимых значений токов в нормальном режиме, требуется дополнительный контроль.

© Лоскутов А. А., 2021

© Лоскутов А. Б., 2021

© Шальнов Ю. С., 2021

Поступила в редакцию 27.08.2021

Received 27.08.2021

Библиографический список

- [1] Панфилов Д.И., Шакарян Ю.Г., Асташев М.Г., Рашитов П.А., Антонов А.В. Малогабаритные устройства продольной компенсации для воздушных линий электропередачи // *Электротехника*. 2017. № 7. С. 78-82.
- [2] Асташев М.Г., Панфилов Д.И., Рашитов П.А., Рожков А.Н. Применение двухтактного преобразователя в малогабаритном устройстве распределенной продольной компенсации для воздушных линий электропередачи // *Известия РАН. Энергетика*. 2016. № 6. С. 56-67.
- [3] Astashev M.G., Panfilov D.I., Rashitov P.A., Rozhkov A.N., Seregin D.A. Automated control unit of power flow in intellectual electricity distribution network // in proc. Scientific-Practical Conference “Research and Development – 2016”, Dec. 14-15, 2016, Moscow, Russia. Springer, 2017. P. 159-164. DOI: 10.1007/978-3-319-62870-7_17
- [4] Лачугин В.Ф., Панфилов Д.И., Асташев М.Г., Мурачев А.С., Платонов П.С. Малогабаритные устройства продольной компенсации и оценка их влияния на параметры срабатывания устройств релейной защиты ВЛ 220 кВ // *Известия РАН. Энергетика*. 2018. № 2. С. 26-35.

- [5] Панфилов Д.И., Асташев М.Г. Устройство продольной компенсации для линий электропередачи, Пат. 2683784 RU, заявл. 06.06.18; опубл. 02.04.19. – Бюл. № 10.
- [6] Требования к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок "Методические указания по устойчивости энергосистем". Утв. приказом Минэнерго России № 630 от 03.08.2018.
- [7] ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.
- [8] Панфилов Д.И., Асташев М.Г., Лачугин В.Ф. Исследование и разработка опытного образца малогабаритного устройства распределенной продольной компенсации для ЛЭП 220 кВ с выбором и обоснованием пилотного объекта внедрения. М.: ОАО «Энергетический Институт им. Г.М. Кржижановского», 2016.
- [9] PSCAD Cookbook. Series Compensation Study. Canada: Manitoba Hydro International Ltd, 2018.
- [10] Dhaked D.K., Lalwani M. A comprehensive review on a D-FACTS controller: enhanced power flow controller (EPFC) // International Journal of Advances in Engineering & Technology. 2017. Vol. 10. Is. 1. Pp. 84-92.
- [11] Laufenberg M. D-FACTS devices in PowerWorld Simulator. Power World Corporation, 2014.

References

- [1] D.I. Panfilov, M.G. Astashev, Y.G. Shakaryan, A.V. Antonov and P.A. Rashitov, "Small devices for longitudinal compensation in overhead power lines", *Russian Electrical Engineering*, vol. 88, no. 7, pp. 471-474, 2017.
- [2] M.G. Astashev, D.I. Panfilov, P.A. Rashitov and A.N. Rozhkov, "Primenenie dvuhstaktnogo preobrazovatelya v malogabaritnom ustrojstve raspredelyonnoj prodol'noj kompensacii dlya vozdushnyh linij elektroperedachi [Application of a push-pull converter in a small-sized device for distributed longitudinal compensation for overhead power lines]", *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, no. 4, pp. 56-67, 2016 (in Russian).
- [3] M.G. Astashev, D.I. Panfilov, P.A. Rashitov, A.N. Rozhkov and D.A. Seregin, "Automated control unit of power flow in intellectual electricity distribution network", in proc. *Scientific-Practical Conference "Research and Development – 2016"*, Dec. 14-15, 2016, Moscow, Russia, pp. 159-164. DOI: 10.1007/978-3-319-62870-7_17
- [4] V.F. Lachugin, D.I. Panfilov, M.G. Astashev, A.S. Murachev and P.S. Platonov, "Distributed static series compensators (DSSC) and impact assessment on the relay protection settings for overhead line 220 kV", *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, no. 2, pp. 26-35, 2018 (in Russian).
- [5] D.I. Panfilov and M.G. Astashev, "Device of longitudinal compensation for electrical transmission lines". Patent RU 2683784, Apr. 02, 2019.
- [6] Trebovaniya k obespecheniyu nadezhnosti elektroenergeticheskikh sistem, nadezhnosti i bezopasnosti ob"ektov elektroenergetiki i energopriniimayushchih ustanovok

- “Metodicheskie ukazaniya po ustojchivosti energosistem” [Requirements for ensuring the reliability of electric power systems, reliability and safety of electric power facilities and power receiving installations “Guidelines for the sustainability of power systems”.]. Approved by order of the Ministry of Energy of Russia no. 630 dated Aug. 03, 2018 (in Russian).
- [7] Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems, GOST 32144-2013, July 2014.
- [8] D.I. Panfilov, M.G. Astashev and V.F. Lachugin, *Issledovanie i razrabotka opytnogo obrazca malogabaritnogo ustrojstva raspredelennoj prodol'noj kompensacii dlya LEP 220 kV s vyborom i obosnovaniem pilotnogo ob'ekta vnedreniya* [Research and development of a prototype of a small-sized device for distributed longitudinal compensation for 220 kV transmission lines with the selection and justification of a pilot implementation object]. Moscow: Stock Company G.M. Khrzhizhanovskiy Power Engineering Institute, 2016 (in Russian).
- [9] *PSCAD Cookbook. Series Compensation Study*. Canada: Manitoba Hydro International Ltd., 2018.
- [10] D.K. Dhaked and M. Lalwani, “A comprehensive review on a D-FACTS controller: enhanced power flow controller (EPFC)”, *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, vol. 10, is. 1, pp. 84-92, Feb. 2017.
- [11] M. Laufenberg, *D-FACTS devices in Power World Simulator*. Power World Corporation, 2014.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Лоскутов Антон Алексеевич, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Лоскутов Алексей Борисович, доктор технических наук, профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Шальнов Юрий Сергеевич, магистрант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Loskutov Anton Alekseyevich, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Loskutov Aleksey Borisovich, D. Sci. (Eng.), professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Shal'nov Yuriy Sergeyeovich, master of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

УДК 621.316.722

DOI 10.46960/2658-6754_2021_3_23

ПЕРЕКЛЮЧАЕМАЯ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩАЯ УСТАНОВКА НА ПОСТУ СЕКЦИОНИРОВАНИЯ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

Л.А. Герман

филиал Самарского государственного университета путей сообщения
в Нижнем Новгороде
Нижний Новгород, Россия
e-mail: lagerman@mail.ru

В.П. Гончаренко

ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО»
Санкт-Петербург, Россия
e-mail: vpg@nfenergo.ru

А.А. Карabanов

ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО»
Санкт-Петербург, Россия
e-mail: karabanov@nfenergo.ru

А.В. Ковтун

ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО»
Санкт-Петербург, Россия
e-mail: kovtun@nfenergo.ru

В настоящее время для повышения пропускной способности на постах секционирования тяговой сети устанавливают статические генераторы реактивной мощности (СГРМ), которые имеют недостатки: повышенные потери мощности и завышенную стоимость.

Целью данной работы является усовершенствование установки СГРМ, а именно: снижение потери мощности в системе тягового электроснабжения с одновременным снижением капитальных затрат на установку. С этой целью уменьшают мощность регулируемой СГРМ, а избыточную мощность заменяют на параллельно установленную нерегулируемую установку емкостной компенсации и фильтрации такой же мощности с резонансными фильтрами на 150 Гц или на 150 и 250 Гц, образуя комплексную систему регулируемой установки компенсации и фильтрации. Измеряют напряжения на тяговых шинах подстанций и поста секционирования и, в зависимости от потерь напряжения до поста секционирования, реализуют режимы «стабилизации напряжения» или «минимума потерь мощности» в тяговой сети.

Ключевые слова: поперечная компенсация реактивной мощности, пропускная способность, переключаемая фильтрокомпенсирующая установка.

Для цитирования: Герман, Л.А. Переключаемая фильтрокомпенсирующая установка на посту секционирования контактной сети / Л.А. Герман, В.П. Гончренко, А.А. Карабанов, А.В. Ковтун // Интеллектуальная электротехника. 2021. № 3. С. 23-36. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_3_23

SWITCHABLE COMPENSATION AND FILTRATION SYSTEM ON TRACK SECTIONING CABIN

L.A. German

Branch of the Samara State University of Railway Transport in Nizhny Novgorod
Nizhny Novgorod, Russia
e-mail: lagerman@mail.ru

V.P. Goncharenko

NIIEFA-ENERGO, LLC
Saint Petersburg, Russia
e-mail: vpg@nfenergo.ru

A.A. Karabanov

NIIEFA-ENERGO, LLC
Saint Petersburg, Russia
e-mail: karabanov@nfenergo.ru

A.V. Kovtun

NIIEFA-ENERGO, LLC
Saint Petersburg, Russia
e-mail: kovtun@nfenergo.ru

Abstract. Currently, for the purpose of increasing throughput of railways, electrified with 25 kV AC, there are static VAR generators (SVGs) installed in the catenary section points. Such SVGs have several flaws, such as increased power loss and higher cost price.

The purpose of this article is the SVG enhancement, such as decreasing power losses in the traction network, as well as reducing its cost price. To achieve this, the power of the adjustable SVG is decreased by a certain value, and instead an unregulated filtering and compensating device is installed of the same power value, with resonance filters for 150 Hz and 250 Hz frequencies, thus forming a complex adjustable compensation and filtration system. The voltage at the substation and the catenary section points are measured, and depending of the voltage loss, several operation modes, such as “voltage stabilization” or “power loss minimization”, are possible.

Keywords: railway throughput, VAR compensation, switchable compensation and filtration system.

For citation: L.A. German, V.P. Goncharenko, A.A. Karabanov and A.V. Kovtun, "Switchable compensation and filtration system on track sectioning cabin", *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 23-36, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_3_23

1. Постановка задачи

В последние годы для повышения пропускной способности железной дороги на посту секционирования включают регулируемую установку поперечной емкостной компенсации (КУ) [1-3]. В [4, 5] представлены статический генератор реактивной мощности (СГРМ) и его модернизированный вариант, обеспечивающий пропуск тяжеловесных и скоростных поездов в соответствии с заданным графиком движения. Однако, на наш взгляд, возможен другой вариант применения установок поперечной емкостной компенсации для повышения пропускной способности железной дороги: включение на посту секционирования Переключаемой фильтрокомпенсирующей установки (ФКУ), хорошо зарекомендовавшей себя на консольном участке тяговой сети Сергач-Шумерля Горьковской ж.д. в течение уже многих лет. В связи с тем, что изменилась система экономического анализа принимаемых решений, рыночные методы ведения национальной экономики заставляют более тщательно оценивать решения по инвестициям [6]. Далее рассмотрим технические характеристики Переключаемой ФКУ и ее технико-экономические преимущества.

Необходимость регулирования мощности установки на ПС определяется тем, что при увеличении ее номинальной мощности свыше 3 Мвар напряжение на ПС превышает установленное 29 кВ, и приходится ее аварийно отключать. Для реализации регулирования мощности КУ предложен новый класс регулируемых установок ФКУ, сформированных из последовательно соединенных индуктивно-емкостных секций [5]. Регулирование мощности установки выполняется путем шунтирования (расшунтирования) секций (рис. 1). В частности, если в трехсекционной ФКУ [5] зашунтировать коммутационными аппаратами К1 и К2 секции С2-Л2 и С3-Л3, сопротивление ФКУ уменьшается и будет определяться одной секцией С1-Л1, при этом ток и генерируемая мощность ФКУ увеличиваются. Переключаемые ФКУ представляют по сути своей регулируемые многоступенчатые установки [4].

Уточним некоторые технические решения переключаемой ФКУ. При этом будем соблюдать основные принципы управления систем тягового электроснабжения [7]:

- работа конденсаторов большую часть времени на пониженном напряжении, что существенно повышает их надежность;

- возможность формировать всю установку ФКУ из сколь угодно малых мощностей;
- возможность формировать секции КУ на пониженное напряжение (например, на 23-25 кВ), что позволяет осуществить форсированный режим ФКУ;
- возможность использования для регулирования мощности ФКУ коммутационных аппаратов на пониженное напряжение (в частности, для КУ, включаемых на шины 27,5 кВ, можно использовать выключатели на 10 кВ).

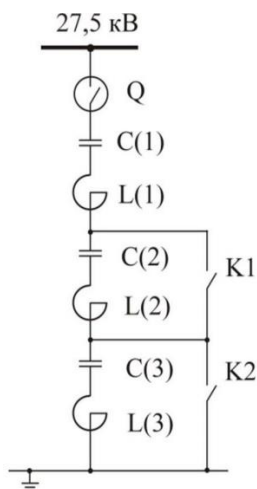


Рис. 1. ФКУ с последовательно соединенными индуктивно-емкостными секциями

Fig. 1. Compensation and filtration system with series-connected inductive-capacitive sections

Рассматриваемая регулируемая ФКУ решает следующие задачи:

- при снижении тяговой нагрузки и повышении напряжения на шинах ФКУ до недопустимого значения 29 кВ переключением ФКУ на минимальную мощность, вплоть до отключения всей установки нормализуется напряжение в тяговой сети и соответственно на шинах ФКУ;
- при изменении нагрузки от минимального значения до максимальной мощность ФКУ регулируется по заданному алгоритму: по алгоритму стабилизации напряжения на шинах КУ или по алгоритму минимизации потерь электроэнергии и т.д.;

- при снижении напряжения на шинах ФКУ до 23-24 кВ вводится режим форсированного режима, когда за счет снижения последовательно соединенных конденсаторов повышается ток, а, следовательно, и мощность КУ.

Переключаемая ФКУ решает еще одну важную задачу. По отраслевым нормативам ее мощность выбирается по условию соблюдения пропускной способности. Однако для соблюдения требований по компенсации реактивной мощности и снижения активных потерь электроэнергии требуемая мощность в 1,5-2 раза меньше. Поэтому практически большую часть времени работает ФКУ пониженной мощности, и только при проходе тяжеловесных поездов включается ФКУ повышенной мощности. Таким образом, переключаемая ФКУ выполняет два указанных условия по мощности ФКУ.

Практически значима двухсекционная переключаемая ФКУ, разберем два варианта ее исполнения.

II. Переключаемая ФКУ с вакуумным выключателем 10 кВ

На Горьковской ж.д. разработана и более семи лет успешно используется в тяговой сети переменного тока переключаемая ФКУ с последовательным соединением секций [8]. Схема переключаемой ФКУ в настоящее время работает на тяговой подстанции Шумерля и подключена на консоль контактной сети системы 2х25 кВ участка Сергач – Шумерля (рис. 2).

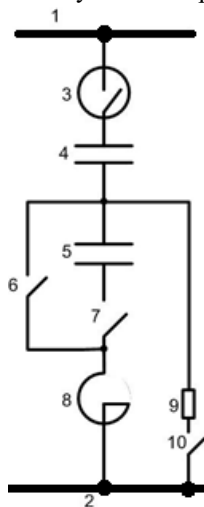


Рис. 2. Переключаемая ФКУ с вакуумными выключателями

Fig. 2. Switchable compensation and filtration system with vacuum switches

Переключения секций выполняет вакуумный выключатель ВВВ-10 кВ. Обычно в работе две последовательно включенные секции, а при увеличении нагрузки в тяговой сети и снижении напряжения в конце до 24-25 кВ отключается (шунтируется) вторая (дополнительная) секция, увеличивается ток и мощность установки и, следовательно, повышается напряжение на посту секционирования и в контактной сети. Для надежной работы вакуумного выключателя и соблюдения его заводского ресурса суточное число переключений ограничивают до 5-7 раз (максимальное – до 10-14).

В предлагаемой схеме ФКУ на рис. 2 приняты следующие обозначения: 1 – шины 27,5 кВ; 2 – рельсы; 3 – первый выключатель; 4 и 5 – первая и вторая секции конденсаторной батареи ФКУ; 6 – четвертый выключатель; 7 – третий выключатель; 8 – фильтровый реактор; 9 – пусковой резистор; 10 – второй выключатель. Схема показана с одним реактором на две ступени.

Главные аспекты предложенного технического решения следующие.

1. Пусковой резистор включается параллельно реактору при коммутации ФКУ, т.е. при включении (отключении) ФКУ.

2. При отключении второй секции конденсаторной батареи третий выключатель ее отключает, а не шунтирует.

3. Схема построена так, чтобы перенапряжения при коммутации ФКУ с помощью вакуумных выключателей не превышали допустимых норм на конденсаторы.

Рассмотрим все возможные схемные варианты состояния ФКУ:

Вариант А. Покажем последовательность включения ФКУ пониженной мощности с первой (4) и второй (5) секциями (исходная позиция – выключатели 3, 6, 7, 10 – отключены).

1. Включить выключатель 7.
2. Включить выключатель 10.
3. Включить выключатель 3.
4. Отключить выключатель 10.

Вариант Б. Последовательность переключения на большую мощность ФКУ, т.е. отключение второй секции 5 после включения ФКУ по п. А.

1. Включить выключатель 10.
2. Отключить выключатель 7.
3. Включить выключатель 6.
4. Отключить выключатель 10.

Вариант В. Переключение ФКУ с большой мощности на меньшую, т.е. подключить вторую секцию 5 после выполнения операций по п. Б.

1. Включить выключатель 10.

2. Отключить выключатель 6.
3. Включить выключатель 7.
4. Отключить выключатель 10.

Вариант Г. Отключение ФКУ. Исходная позиция по п. В (включены выключатели 3, 7, отключены выключатели 10 и 6).

1. Включить выключатель 10.
2. Отключить выключатель 3.
3. Отключить выключатель 7.

Все проверочные расчеты и запись осциллограмм по определению коммутационных перенапряжений на оборудовании (рис. 3) выполнены для следующих параметров конденсаторов первой и второй секций конденсаторной батареи, реактора и пускового резистора. Принимаем, что в схеме все выключатели несинхронизированные. В качестве пускового резистора применен бетэловый резистор, сопротивление 80 (60) Ом [4]. Применены конденсаторы КЭК-2-1,05-60. В первой секции 4 конденсаторной батареи 32 последовательно включенных рядов конденсаторов, всего 96 конденсаторов). Во второй секции 5-12 последовательно включенных конденсаторов, всего 36 конденсаторов. Включен фильтровый реактор 8 ФРОМ-3200- 35, использована отпайка на 107 мГн. Длительность коммутационных переключений (т.е. отключение-включение ФКУ и переключение второй секции 5) не превышает 0,5 с.

При снятии напряжения на шинах 27,5 кВ при любой причине следует отключить ФКУ. Рассмотрим все указанные варианты состояния ФКУ с точки зрения перенапряжений на элементах схемы по осциллограмме, зафиксированной на переключаемой ФКУ на подстанции Шумерля. Начало переключения (включается резистор 9 выключателем 10) – отметка времени 0. Отметка времени 120 мс – отключение выключателя 7 и быстрый разряд конденсаторов секции С2 за счет подключенных трансформаторов напряжения (на рис. 3 – не показаны), и далее на отметке времени 190 мс – включение выключателя 6. Окончание переключения – отключается резистор 9 на отметке времени 500 мс.

1. Включение ФКУ по п. А происходит при параллельном соединении пускового резистора с реактором и в соответствии с [4] и с учетом влияния тяговой нагрузки перенапряжения будут превосходить 10 %. Осциллограмма (рис. 3) подтверждает спокойный без перенапряжений процесс включения ФКУ.

2. Аналогично без перенапряжений происходит и процесс включения второй секции 5 в п. Б (для подключения пускового резистора 9), так как в этом случае резистор 60 Ом шунтирует цепочку реактора 8 с последовательно соединенной второй секцией 5 конденсаторной батареи.

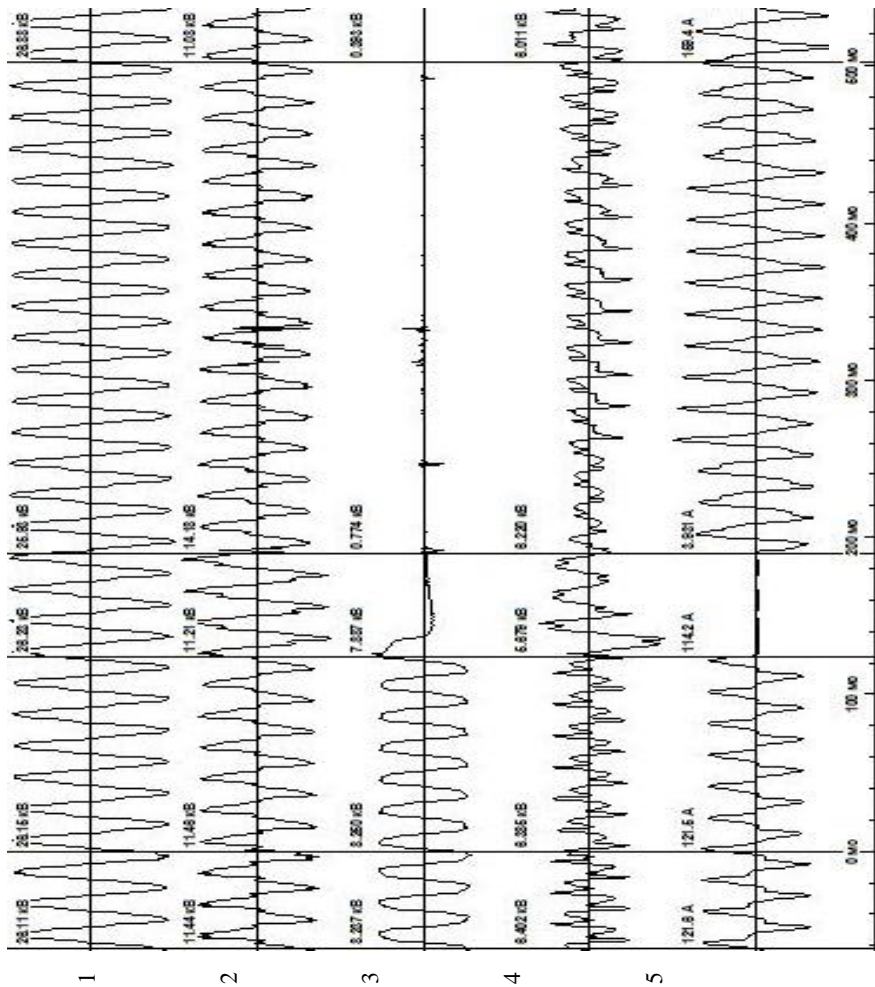


Рис. 3. Процесс переключения секции C2 в ФКУ:

- 1 – напряжение шин КУ; 2 – напряжение в точке 0 соединения C1 и C2;
3 – напряжение на секции C2; 4 – напряжение на реакторе; 5 – ток реактора

Fig. 3. The process of switching section C2 in compensation and filtration system:
1 – compensation unit bus voltage; 2 – voltage at point 0 of the connection of C1 and C2;
3 – voltage on section C2; 4 – voltage across the reactor; 5 – reactor current

3. В п. В отключение второй секции 5 вакуумным выключателем 7 происходит надежно при включенном пусковом резисторе 9 выключателем 10.

4. Наконец, в п. Г вакуумный выключатель 3 надежно без перенапряжений отключает ФКУ.

Таким образом, предлагаемое схемное решение обеспечивает переключения ФКУ без перенапряжений, что доказано на прилагаемой осциллограмме. Весь процесс переключения занимает 0,5 с, что допустимо по длительности работы резистора. Как видно по осциллограмме, процесс переключения происходит спокойно, без бросков тока и напряжения, что доказывает правильность принятого схемного решения. При переключении ток увеличился с 121,6 до 172,7 А, т.е. в 1,42 раза, а напряжение в контактной сети у ФКУ повысилось с 26,11 до 26,91 кВ, то есть на 800 В. Укажем, что при повышении тока ФКУ можно добиться большего повышения напряжения в контактной сети.

В основной секции С1 оставлены 32 ряда конденсаторов, как обычно в нерегулируемой ФКУ. Если бы уменьшить число рядов в С1, например, до 25-26, пришлось бы более часто переключать ступени ФКУ, что для работы с контактными вакуумными выключателями по условиям эксплуатации решено не делать. В настоящее время среднесуточное число переключений ступеней ФКУ 5-7 и не превышает 10-14 раз. Однако на участках, где требуется большее число переключений, переключаемое ФКУ выполняется с тиристорным ключом ТК (рис. 4). Однако авторы считают, что в связи со сравнительно небольшой стоимостью тиристорного ключа (не более 5 % от стоимости ФКУ), существенного упрощения схемы регулирования и повышения качества напряжения в тяговой сети целесообразно все переключаемые ФКУ оснащать тиристорными ключами.

III. Переключаемая ФКУ с тиристорным ключом.

Схема переключаемой ФКУ с тиристорным ключом на рис. 4 показана в общем виде с двумя индуктивно-конденсаторными секциями, которые обеспечивают во всех режимах нормативную настройку ФКУ на резонансную частоту 135-142 Гц [4]. На рис. 4 введены следующие обозначения: Q1 – головной выключатель 27,5 кВ; L1 и С1 первая секция из конденсатора С1 и реактора L1; С2 и L2 – вторая секция из конденсатора С2 и реактора L2; ТК – тиристорный ключ; R – демпфирующий резистор; Q2 – вакуумный выключатель 10 кВ; ТТ – трансформатор тока; БУ – блок управления тиристорным ключом.

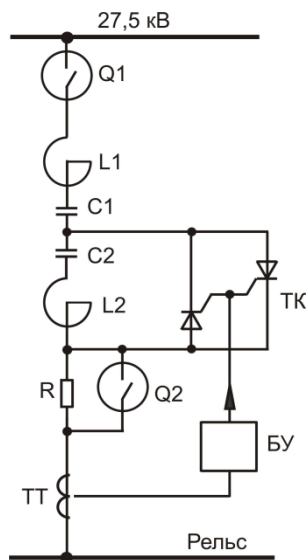


Рис. 4. Переключаемая ФКУ с тиристорным ключом

Fig. 4. Switchable compensation and filtration system with thyristor key

Если используется реактор ФРОМ-35 при мощности ФКУ до 5 Мвар, возможен вариант без L2, т.е. в этом случае реализуется переключаемая ФКУ с одним реактором. Такой вариант удобен в эксплуатации, так как тогда достаточно просто модернизировать существующие КУ с одним реактором в переключаемые. Конечно, в этой схеме при пониженной мощности (включены обе секции) будет соблюдаться нормативная настройка в 135-142 Гц, а при повышенной мощности резонансная настройка будет ниже 130 Гц, но это не будет ухудшать надежность установки.

Покажем процесс включения ФКУ на пониженную мощность (предварительно все выключатели отключены, тиристорный ключ отключен): включается Q1, а затем Q2. Переключение на повышенную мощность: включается ТК в нуль тока, т.е. остается в работе только секция C1-L1.

Итак, общий вывод по переключаемой ФКУ: если в качестве переключателя секций использовать вакуумный выключатель, схема должна быть выполнена по рис. 2, если использовать тиристорный ключ – реализуется схема по рис. 4.

IV. Обсуждение результатов

При переходе на повышенное напряжение (при шунтировании второй секции) возможны броски повышенного напряжения на токоприемнике электровоза. Для предотвращения этого предложено включение тиристора (т.е. шунтирование секции) производить постепенно, а именно: вводить фазовое регулирование, при этом в течение 0,3-0,5 с изменяется фаза на управляющем электроде тиристора от 100 до 0 электрических градусов. Указанное предотвращает резкое повышение напряжения на токоприемнике.

Существующие КУ на постах секционирования логично модернизировать в переключаемые ФКУ. Для этого следует смонтировать дополнительную вторую секцию и добавить переключатели. Для оценки, где переходить на тиристорные ключи в переключаемой ФКУ, следует провести проверку их работы на реальных участках. Но уже сейчас ясно, что на равнинных участках можно использовать в качестве переключателей вакуумные выключатели, суточное число переключений не будет превышать 10-14 раз. Однако, учитывая сравнительно малую стоимость ТК, существенное упрощение схемы и автоматики и улучшение качества напряжения в контактной сети целесообразно переходить на переключаемые ФКУ с тиристорным ключом [7].

Большинство КУ на существующих постах секционирования работают с мощностью 4-5 Мвар. Поэтому для повышения пропускной способности достаточно увеличить эту мощность в 1,3-1,6 раз, то есть до 5-8 Мвар, что реализуется переключаемыми ФКУ. Однако при необходимости большей мощности на посту секционирования, по всей видимости, целесообразно переходить на плавнорегулируемые установки компенсации, например, СГРМ.

Технико-экономические расчеты эффективности установок компенсации целесообразно выполнять по методикам [4, 9, 10].

V. Выводы

1. Предложен новый тип регулируемой ФКУ с последовательным соединением секций, отличающийся от традиционного с параллельным включением секций, и имеющий ряд технико-экономических преимуществ. Длительные эксплуатационные испытания на действующем участке контактной сети доказали надежность нового типа регулируемой ФКУ.

2. Целесообразно все существующие установки емкостной компенсации на постах секционирования перевести на переключаемые ФКУ мощностью до 6-8 Мвар с целью повышения пропускной способности железной дороги и экономичного режима тяговой сети.

Перевод на переключаемые ФКУ реализуется путем монтажа дополнительной индуктивно-конденсаторной секции и его переключателя на 10 кВ.

3. Переключатель может выполняться в виде вакуумного выключателя или тиристорного ключа. В связи со сравнительно небольшой стоимостью тиристорного ключа, существенного упрощения схемы регулирования мощности и повышения качества напряжения в тяговой сети целесообразно все переключаемые ФКУ оснащать тиристорными ключами.

4. При мощности ФКУ на посту секционирования более 8-10 Мвар целесообразно включение модернизированного варианта СГРМ по разработкам авторов [4].

© Герман Л.А., 2021

© Гончаренко В.П., 2021

© Карabanов А.А., 2021

© Ковтун А.В., 2021

Поступила в редакцию 29.07.2021

Received 29.07.2021

Библиографический список

- [1] Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
- [2] Тер-Оганов Э.В., Пышкин А.А. Электроснабжение железных дорог. Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2014. – 431 с.
- [3] Мамошин Р.Р. Повышение качества энергии на тяговых подстанциях переменного тока. М.: Транспорт, 1973. – 224 с.
- [4] Герман Л.А. Повышение пропускной способности железной дороги с установкой компенсации реактивной мощности // Вестник ВНИИЖТ. 2021. Т. 80. № 1. С. 35-44. DOI: 10.21780/2223-9731-2021-80-1-35-44
- [5] Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Герман В.Л. Автоматизация электроснабжения тяговой сети переменного тока. Ч. 2. Режимная автоматика. Н. Новгород: Самарский гос. ун-т путей сообщения в г. Нижний Новгород, 2020. – 192 с.
- [6] Ковалев И.Н. Электроэнергетические системы и сети. М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2015. – 363 с.
- [7] Жарков Ю.И., Овласюк В.Я., Сергеев Н.Г., Сухопрудский Н.Д., Шилов А.С. Автоматизация систем электроснабжения. М.: Транспорт, 1990. – 359 с.
- [8] Герман Л.А., Серебряков А.С., Гончаренко В.П., Якунин Д.В., Максимова А.А., Маралова В.А., Дулепов Д.Е. Установка ступенчатая поперечной емкостной компенсации, Пат. 2656368 RU, заявл. 01.07.2016, опубл. 05.06.2018. – Бюлл. № 16.
- [9] Карташов И.И., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г., Шаров Ю.В., Насыров Р.Р. Управление качеством электроэнергии. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 320 с.

- [10] Гапанович В.А. [и др]. Энергосбережение на железнодорожном транспорте. М.: Изд. Дом МИСиС, 2012. – 620 с.

References

- [1] K.G. Marquardt, *Elektrosnabzhenie elektrificirovannyh zheleznyh dorog [Electricity supply for electrified railways]*. Moscow: Transport, 1982 (in Russian).
- [2] E.V. Ter-Oganov and A.A. Pyshkin, *Elektrosnabzhenie zheleznyh dorog [Railroad power supply]*. Ekaterinburg: USURT, 2014 (in Russian).
- [3] R.R. Mamoshin, *Povyshenie kachestva energii na tyagovyh podstanciyah peremennogo toka [Improving power quality in AC traction substations]*. Moscow: Transport, 1973 (in Russian).
- [4] L.A. German, “Increasing railway capacity with the installation of reactive power compensation”, *VNIIZHT Scientific Journal*, vol. 80, no. 1, pp. 35-44, 2021. DOI: 10.21780/2223-9731-2021-80-1-35-44
- [5] L.A. German, K.S. Subkhanverdiev and V.L. German, *Avtomatizatsiya elektrosnabzheniya tyagovoy seti peremennogo toka. Chast' 2. Rezhimnaya avtomatika [Automation of AC traction power supply. Part 2. Regime automation]*. Nizhny Novgorod: SSTU Branch in Nizhny Novgorod, 2020 (in Russian).
- [6] I.N. Kovalev, *Elektroenergeticheskie sistemy i seti [Electric power systems and networks]*. Moscow: Federal State Budgetary Educational Institution "Educational and Methodical Center for Education in Railway Transport", 2015 (in Russian).
- [7] Yu.I. Zharkov, V.Ya. Ovlasyuk, N.G. Sergeev, N.D. Suhoprudskij and A.S. Shilov, *Avtomatizatsiya sistem elektrosnabzheniya [Automation of power supply systems]*. Moscow: Transport, 1990 (in Russian).
- [8] L.A. German, A.S. Serebryakov, V.P. Goncharenko, D.V. Yakunin, A.A. Maksimova, V.A. Maralova and D.E. Dulepov, “Stepwise transverse capacitive compensation device”, Patent RU 2656368. June 05, 2018 (in Russian).
- [9] I.I. Kartashov, V.N. Tul'skij, R.G. Shamonov, Yu.V. Sharov and P.P. Nasyrov, *Upravlenie kachestvom elektroenergii [Power quality management]*. Moscow: Publishing house MPEI, 2006 (in Russian).
- [10] V.A. Gapanovich et al, *Energoberezhenie na zheleznodorozhnom transporte [Energy saving in railway transport]*. Moscow: MISIS, 2012 (in Russian).

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

Герман Леонид Абрамович, доктор технических наук, профессор филиала Самарского государственного университета путей сообщения в Н. Новгороде, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Leonid A. German, D. Sci. (Eng.), professor of the Branch of the Samara State University of Railway Transport in N. Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Гончаренко Владимир Павлович, кандидат технических наук, заместитель генерального директора по специальным проектам ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Vladimir P. Goncharenko, Cand. Sci. (Eng.), deputy general director for special projects of the NIEFA-ENERGO LLC, Saint Petersburg, Russian Federation

Карабанов Артем Александрович, директор проектно-конструкторского управления ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Artem A. Karabanov, director of design and engineering department of the NIEFA-ENERGO LLC, Saint Petersburg, Russian Federation

Ковтун Алексей Владимирович, кандидат технических наук, заместитель директора по науке ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Aleksey V. Kovtun, Cand. Sci. (Eng.), deputy director for science of the NIEFA-ENERGO LLC, Saint Petersburg, Russian Federation

УДК 621.3.079

DOI 10.46960/2658-6754_2021_3_37

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОЙ ВИБРАЦИИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОСРЕДСТВОМ МКЭ-МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.И. Ермолаев

Институт проблем машиностроения Российской академии наук
Нижний Новгород, Россия
e-mail: acidwolfvx@rambler.ru

В.И. Ерофеев

Институт проблем машиностроения Российской академии наук
Нижний Новгород, Россия
e-mail: erof.vi@yandex.ru

А.С. Плехов

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия
ORCID: [0000-0002-6954-3295](https://orcid.org/0000-0002-6954-3295) e-mail: aplehov@mail.ru

Д.Ю. Титов

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия
ORCID: [0000-0001-7320-984X](https://orcid.org/0000-0001-7320-984X) e-mail: dm_titov@list.ru

Рассмотрены причины возникновения магнитных вибраций статоров асинхронных электродвигателей и приведено математическое описание процесса их возбуждения. Представлены зависимости, позволяющие определить взаимосвязь между волнами магнитной индукции в воздушном зазоре асинхронной машины, волнами радиальных магнитных сил, действующих на статор со стороны магнитного поля, и изгибными деформациями яра статора. С использованием этих зависимостей в среде мультифизического конечно-элементного проектирования была разработана модель асинхронного электродвигателя марки АИР180М4У3. Данная модель на основании заданной геометрии двигателя, свойств материалов и формы тока статорной обмотки позволяет исследовать одновременно протекающие взаимосвязанные электромагнитные, механические, акустические и тепловые процессы в разных элементах электрической машины с учетом вращения ротора под действием магнитных сил. Результаты моделирования позволили определить величину радиальной магнитной силы, действующей на статор, формы и частоты волн его деформации, необходимые при проектировании активных методов снижения магнитных вибраций путем изменения спектрального состава питающего напряжения.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, деформации статора, магнитные вибрации, магнитная индукция, метод конечных элементов, мультифизическое моделирование, радиальные магнитные силы.

Для цитирования: Ермолаев, А.И. Исследование магнитной вибрации в асинхронном электродвигателе посредством МКЭ-моделирования / А.И. Ермолаев, В.И. Ерофеев, А.С. Плехов, Д.Ю. Титов // Интеллектуальная электротехника. 2021. № 3. С. 37-56. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_3_37

STUDY OF MAGNETIC VIBRATION OCCURRING IN INDUCTION MOTOR USING FEM SIMULATION

A.I. Ermolaev

Mechanical Engineering Research Institute of RAS
Nizhny Novgorod, Russia
e-mail: acidwolfvx@rambler.ru

V.I. Erofeev

Mechanical Engineering Research Institute of RAS
Nizhny Novgorod, Russia
e-mail: erof.vi@yandex.ru

A.S. Plekhov

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia
ORCID: [0000-0002-6954-3295](https://orcid.org/0000-0002-6954-3295) e-mail: aplehov@mail.ru

D.Yu. Titov

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia
ORCID: [0000-0001-7320-984X](https://orcid.org/0000-0001-7320-984X) e-mail: dm_titov@list.ru

Abstract. The article discusses the reasons of the magnetic vibrations occurrence in the induction motors stators and provides a mathematical description of the process of their excitation. Dependencies are given that make it possible to determine the relationship between the magnetic field waves in the airgap of an induction motor, the radial magnetic forces waves acting on the stator and the bending deformations waves of the stator yoke. Using these dependencies in a multiphysics finite element software a model of an induction motor AIR180M4U3 was developed. This model based on the given engine geometry, material properties and the current shape in the stator winding, makes it possible to study simultaneously interconnected electromagnetic, mechanical, acoustic and thermal processes in different elements of an electric machine, taking into account the rotation of the rotor under the influence of magnetic forces. At the first stage of the study, graphs of the magnetic field in an induction motor in the time domain were ob-

tained taking into account the synchronous rotation of the rotor. At the second stage of the study, on the basis of the previously obtained values of the magnetic fields in the motor airgap, graphs of the radial magnetic forces acting on the stator were obtained, the stator deformations caused by them and the emitted acoustic noise were determined. At the third stage of the study, the eigenfrequencies of the stator oscillations, the modes (shapes) corresponding to these frequencies and the displacement spectrograms of the stator due to magnetic vibration, were determined. The simulation results made it possible to determine the magnitude of the radial magnetic force acting on the stator, the shape and frequency of its deformation waves, which are necessary in the design of active methods for reducing magnetic vibrations by changing the spectral composition of the supply voltage.

Keywords: finite element method, induction motor, magnetic vibrations, magnetic field, Maxwell forces, multiphysics simulation, radial magnetic forces, stator deformations.

For citation: A.I. Ermolaev, V.I. Erofeev, A.S. Plekhov and D.Yu. Titov, “Study of magnetic vibration occurring in induction motor using FEM simulation”, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 37-56, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_3_37

I. Введение

Магнитная вибрация является проблемой практически всех электрических машин средней и большой мощности [1-4]. Она приводит к множеству неблагоприятных явлений: изменению гармонического состава питающего тока, износу подшипников, акустическому шуму, увеличению потребляемой мощности и разрушению электродвигателей [2-4]. Наиболее сильно магнитная вибрация проявляется в асинхронных электродвигателях (АД), характеризующихся вращающимся магнитным полем относительно неподвижного статора машины. Волны радиальной магнитной силы вызывают в таких машинах периодическую деформацию статоров, проявляющуюся, прежде всего, в виде акустического шума. Известно, что амплитуда магнитных вибраций статора АД может превышать 0,3 мм [3].

Изучению магнитной вибрации и разработке методов и средств по борьбе с ними посвящено много работ как зарубежных, так и отечественных ученых. В 1970-1980 гг. И.Г. Шубов, Н.В. Астахов, В.С. Малышев, Н.Я. Овчаренко и др. заложили обширную фундаментальную базу по математическому описанию магнитных вибраций электрических машин, конструкционным способам их снижения [1, 4]. В 1990-2000 гг. в трудах таких исследователей, как D. Belkhat, V. Cassoret, R. Corton, K.C. Maliti, D. Roger, E. Leleu, P. Pellerey, были предложены способы активного снижения магнитной вибрации статора АД путем добавления к питающему напряжению дополнительной компенсационной гармоники [3, 6-8]. Совершенно иные подходы предлагают исследования последнего десятилетия: D. Franck, K. Nameyer, A.C. Binojkumar, B. Saritha, H.A. Доброскок [2,

9, 10]. В этих работах рассматривается управление магнитной вибрацией путем заданного изменения углов и напряжений в системе векторного управления асинхронным электроприводом.

Несмотря на многообразие существующих способов активного гашения магнитных вибраций, почти все они опираются на одну и ту же теоретическую базу. Магнитные поля, радиальные магнитные силы и деформации статора рассматриваются как волны определенной частоты, пространственного порядка и амплитуды; для достижения эффективного снижения магнитных вибраций нужно точно определить взаимосвязь параметров колебаний этих физических величин. Особые трудности возникают при определении взаимосвязи волн деформации статора с волнами магнитных сил, поскольку сердечник статора имеет сложную геометрическую форму, на каждую грань которой действует магнитная сила с различной амплитудой и направлением. Как правило, механический расчет осуществляется методом конечных элементов, а его результаты уже используются в другом пакете прикладных программ с более простым интерфейсом и настройками узлов (например, *Matlab Simulink*). Однако такой подход не позволяет учесть взаимовлияние всех мультифизических процессов друг на друга в процессе симуляции.

Целью данной статьи является разработка модели АД в среде мультифизического конечно-элементного проектирования для последующего исследования взаимосвязанных электромагнитных, механических и акустических процессов, связанных с возбуждением магнитных вибраций статора, с учетом синхронного вращения ротора под действием электромагнитного момента.

II. Возбуждение магнитных сил в асинхронном двигателе

Периодические радиальные магнитные силы в бездефектных АД, являющиеся основными источниками их вибрации [4, 11], вызваны действием магнитного поля B в зазоре АД на сталь статора [3, 4, 12]:

$$F_r(x, t) = \frac{B^2(x, t)}{2 \cdot \mu_0}, \quad (1)$$

где x – угловая координата воздушного зазора; t – время; μ_0 – магнитная постоянная.

Одним из направлений снижения виброактивности этих электрических машин является управление спектром магнитного поля в воздушном зазоре [3, 12]. Наиболее распространенным ввиду гибкости и простоты реализации является метод активного уменьшения вибраций АД, основанный на управлении током статора, при котором к основному питающему напряжению добавляется дополнительная компенсационная гармоника или несколько гармоник, формируемых ШИМ. Задача компенсационной

гармоники заключается в подавлении одной из гармоник магнитного поля, порождаемых питающим напряжением, вызывающей наиболее интенсивные вибрации статора АД. Сущность этого метода описана в работах [6-8].

Вибровозмущающая сила, порождаемая магнитным полем в воздушном зазоре АД при его питании от преобразователя частоты (ПЧ) с учетом компенсационной гармоники B^i , будет равна:

$$F_r(x, t) = \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \left(B_1(x, t) + B^i(x, t) + \sum_{g=2}^{\infty} B_g(x, t) \right)^2, \quad (2)$$

где g – номер гармоники индукции магнитного поля; $B_1(x, t)$ – первая гармоника магнитного поля в зазоре АД; $B^i(x, t)$ – вводимая i -я гармоника магнитного поля; $B_g(x, t)$ – гармоники магнитного поля высшего порядка, обусловленные зубчатостью ротора, неравномерностью зазора и т.д.

Поскольку вводимый ток имеет малые амплитудные значения (не более 15 % от амплитуды питающего тока [2, 6, 7]), амплитуды гармоник вибровозмущающих сил, определяемые амплитудами индукции магнитного поля в воздушном зазоре со значением $(B_m^i)^2 / 4 \cdot \mu_0$ и $B_m^i \cdot \Sigma B_{mg} / 2 \cdot \mu_0$ пренебрежительно малы. Значительное влияние на возбуждение вибрации статора АД оказывают всего две гармоники вибровозмущающей силы $F_r^i(x, t)$, порожденные взаимодействием основной и компенсационной гармоник магнитного поля. Эти гармоники описываются уравнениями вида:

$$F_r^i(x, t) = \frac{B_m^i \cdot B_{m1}}{2 \cdot \mu_0} \cdot \left(\cos \left[2 \cdot Z_p \cdot x - (\omega^i + \omega_1) \cdot t - (\varphi^i + \varphi_1) \right] + \right. \\ \left. + \cos \left[-(\omega^i - \omega_1) \cdot t - (\varphi^i - \varphi_1) \right] \right), \quad (3)$$

где B_{m1} – амплитуда 1-й гармоники магнитного поля в зазоре АД; B_m^i – амплитуда компенсационной гармоники; Z_p – число пар полюсов АД; ω_1 – угловая частота магнитного поля в зазоре; φ_1 – начальная фаза магнитного поля в зазоре АД; ω^i – частота вводимой гармоники магнитного поля; φ^i – начальная фаза вводимой гармоники магнитного поля.

Данные гармоники вибровозмущающей силы имеют порядки пространственных колебаний $2 \cdot Z_p$ и 0 соответственно. Чтобы аналитически определить наиболее выраженную гармонику вибровозмущающей силы, необходимо знать ее основные параметры, а именно: частоту, амплитуду и начальную фазу:

$$F_r(x, t) = F_m \cdot \cos(r \cdot x - \omega \cdot t - \varphi), \quad (4)$$

где F_m – амплитуда вибровозмущающей силы, r – порядок пространственных колебаний, ω – частота колебаний вибровозмущающей силы, φ – начальная фаза вибровозмущающей силы.

Гармоника с порядком пространственных колебаний 0, согласно [2, 4], останется и будет вызывать вибрации, но с амплитудой, много меньшей по сравнению с силой (4).

Порядок пространственных колебаний $r = 0$, обусловленный интерференцией двух гармоник индукции магнитного поля в зазоре АД с одинаковыми пространственными периодами (модами), подразумевает равномерную радиальную деформацию статора вдоль всего воздушного зазора. Радиальные силы второго порядка ($r = 2$) и выше вызывают изгибные деформации статора (рис. 1).

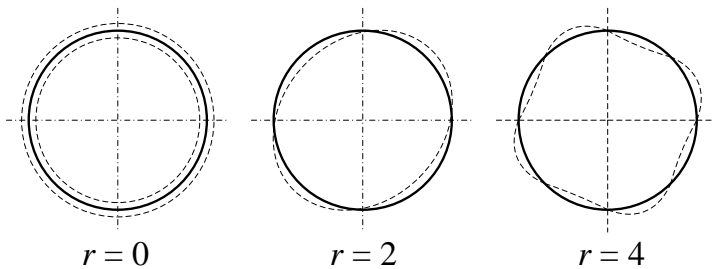


Рис. 1. Формы колебаний ярма статора

Fig. 1. Mode numbers and shapes of deformation of the stator yoke

III. Расчет магнитных вибраций статора асинхронного двигателя

Вибровозмущающие силы одного гармонического состава вызывают вибрации статора АД другого гармонического состава [3, 4]. Это связано с тем, что статор АД с позиции механики обладает своей амплитудно-частотной характеристикой с несколькими собственными частотами. Следовательно, спектральный состав радиальных магнитных сил будет существенно отличаться от гармонического состава вибраций статора АД.

При пространственных колебаниях порядка $r = 2$ и более статор претерпевает деформации сложной пространственной формы r -угольника с собственной частотой, равной [4]:

$$\omega_r = \frac{r(r^2 - 1)}{\sqrt{r^2 + 1}} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot h^3}{12 \cdot m \cdot R_{\text{ст}}^4}}. \quad (5)$$

где E – модуль упругости ярма статора; h – высота спинки статора; $R_{ст}$ – внешний радиус статора; m – приведенная масса ярма статора, определяемая по формуле:

$$m = \frac{m_{ст}}{2 \cdot \pi \cdot R_{ст} \cdot l_t}, \quad (6)$$

где $m_{ст}$ – масса стали статора, l_t – длина статора.

Анализ (5) позволяет сделать вывод о том, что наибольшей амплитудой характеризуются колебания с порядком $r = 2$, так как их частота ниже, чем у прочих форм колебаний [2, 4]. Вместе с тем, в случае питания АД от ПЧ значительное влияние на виброактивность статора оказывают и колебания порядка $r = 2 \cdot Z_p = 4$.

Механический импеданс z_ω статора на частоте ω возбуждающих сил будет определяться следующим образом:

$$z_\omega = \omega \cdot m - \frac{1}{\omega \cdot \lambda_{ст}} = \omega \cdot m - \frac{E \cdot h}{R_{ст}^2 \cdot \omega}, \quad (7)$$

где $\lambda_{ст}$ – механическая податливость статора.

Поскольку вибрации наибольшей интенсивности возникают вследствие взаимодействия первой и высших гармоник магнитного поля в воздушном зазоре АД, пространственно-временное распределение вибровозмущающих сил вдоль воздушного зазора будет иметь следующий вид:

$$F_r(x, t) = \sum_{g=1}^{\infty} F_{rgm} \cdot \cos\left((Z_p \pm Z_p) \cdot x - 2(1 \pm g)\omega_0 t - (\varphi_{12} \pm \varphi_{12g})\right), \quad (8)$$

где F_{rgm} – амплитуда g -й гармоники радиальной магнитной силы, ω_0 – частота питающей сети; φ_{12} – фаза 1-й гармоники тока намагничивания; φ_{12g} – фаза g -й гармоники тока намагничивания.

Амплитудные значения гармоник радиальной вибровозмущающей силы F_{rgm} могут быть определены из соотношения:

$$F_{rgm} = \frac{B_\delta^2 \cdot R \cdot I_{12g}}{2 \cdot \mu_0 \cdot R_{ст} \cdot I_{12}}, \quad (9)$$

где R – внутренний радиус статора; I_{12} – амплитуда 1-й гармоники тока намагничивания согласно Т-образной схеме замещения I_{12g} – амплитуда g -й гармоники тока намагничивания.

С использованием полученных значений F_{rgm} можно определить значения виброскоростей статора, вызванных магнитной вибрацией:

$$\dot{y} = \frac{F_{rgm} \cdot R}{z_{ст} \cdot R_{ст}}. \quad (10)$$

IV. Мультифизическая конечно-элементная модель двигателя

Приведенная выше теория, хотя и позволяет достаточно точно описать процессы возбуждения магнитной вибрации статоров АД, характеризуется большим количеством допущений и ограничений. К таковым относятся: равномерность воздушного зазора, постоянство скорости вращения ротора, равномерность зубчатости стали статора и ротора, периодичность и равномерность питающего напряжения на обмотках статора. Учет одного из этих факторов приводит к существенному усложнению математических выражений, описывающих процессы возбуждения магнитных вибраций, и зачастую требует введения дополнительных ограничений, например, учета лишь двух-трех гармоник питающего тока при описании волн магнитной индукции с учетом двусторонней зубчатости [2, 4]. Кроме того, поскольку описание магнитной индукции осуществляется методом гармонических проводимостей, в уравнении делается допущение постоянства ширины воздушного зазора во времени при расчете функции магнитной проводимости, тогда как под действием магнитных сил статор подвержен изгибным деформациям, влияющим на магнитное поле и магнитную проводимость [1,10].

Современные программные среды мультифизического конечно-элементного моделирования, такие как *Ansys*, *COMSOL*, *FEATool*, Логос позволяют учесть большую часть интересующих исследователя факторов без необходимости самостоятельно составлять и решать громоздкие и сложные для восприятия уравнения. Более того, эти программные среды позволяют учитывать изменения, происходящие на одном уровне физики, при симуляции процессов других областей физики. Таким образом, все исследуемые процессы являются взаимосвязанными и взаимодействующими.

Объектом исследования был выбран асинхронный двигатель АИР180М4У3 мощностью 30 кВт и синхронной скоростью вращения 1500 об/мин. Таким образом, АД относится к машинам средней мощности (20-250 кВт), а волны радиальных магнитных сил, действующих на статор, имеют пространственный порядок $r = 4$. Некоторые геометрические и технические характеристики приведены в табл. 1 [11, 13].

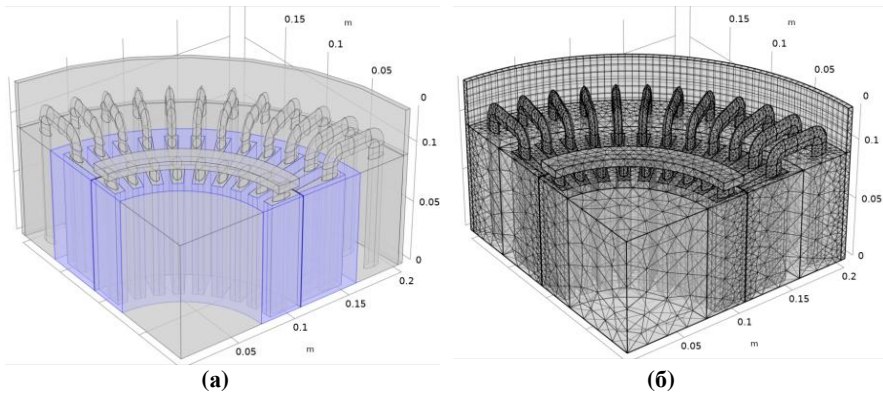
Стоит отметить, что с целью упрощения модели и повышения схожести расчетов число пазов ротора было уменьшено с 39 до 36, статор-

ная обмотка в каждом пазе представлена отдельной гомогенной многовитковой катушкой, другой конец которой замыкается снаружи статора. В противном случае несимметричность переплетающихся обмоток потребовала бы отрисовки геометрии всего двигателя, что повысило бы сложность задачи в связи с многократным увеличением числа степеней свободы сетки МКЭ-модели. Роторная обмотка представлена сплошным медным проводником, представляющим собой беличью клетку. Геометрия модели АД марки АИР180М4У3 и расчетная сетка приведены на рис. 2.

Таблица 1.
Геометрические и технические параметры двигателя АИР180М4У3

Table 1.
Geometric and technical parameters of AIR180M4U3

№	Физ. величина	Значение	Ед. изм.
1	Питающее напряжение	380	В
2	Питающий ток	57	А
3	Число пар полюсов	2	–
4	Диаметр сердечника статора внешний	0,313	м
5	Диаметр сердечника статора внутренний	0,211	м
6	Длина сердечников статора и ротора	0,185	м
7	Ширина воздушного зазора	0,0006	м
8	Высота спинки статора	0,01	м
9	Высота паза статора	0,041	м
10	Высота паза ротора	0,025	м
11	Ширина паза статора (внутр./внешн.)	3,2 / 9	мм
12	Ширина паза ротора (внутр./внешн.)	11 / 8	мм
13	Число пазов статора	48	–
14	Число пазов ротора	36	–
15	Число проводников в одной обмотке	17	–



**Рис. 2. Расчетная модель двигателя AIR180M4U3:
геометрия модели (а); расчетная сетка (б)**

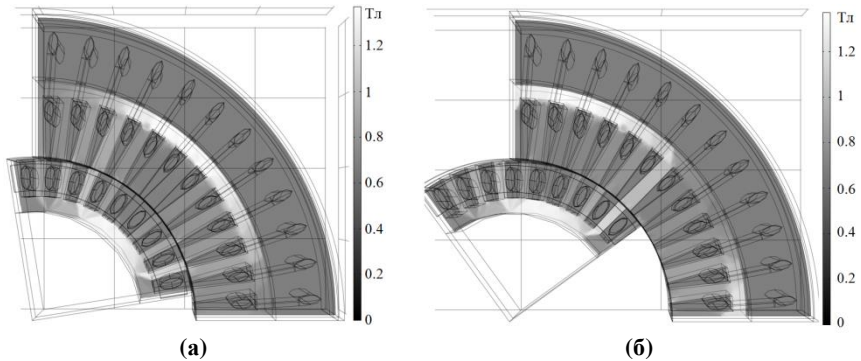
**Fig. 2. A computational model of AIR180M4U3 motor:
geometry (a); computational grid (b)**

На рис. 2,а видно, что на внешней границе модели и в области воздушного зазора сетка имеет распределение «*Swept*», что необходимо для решения задач с тождественной парой на границе между подвижной и неподвижной частями модели, описывающей процессы в роторе и статоре соответственно. Отдельная сетка была наложена на боковые границы модели с целью достижения ее симметрии и выполнения расчетов таким образом, как будто геометрия всего двигателя отрисована полностью.

IV. Моделирование электромагнитных процессов

С использованием разработанной мультифизической конечно-элементной модели было проведено исследование возбуждения магнитного поля токами в обмотках АД с учетом вращения ротора и двусторонней зубчатости. Питающий ток статора имеет идеальную синусоидальную форму. Полученные в процессе исследования графики приведены на рис. 3.

Из результатов моделирования следует, что волны магнитной индукции имеют пространственный порядок $r = 2$, вращаются с синхронной частотой $\omega_1 = 157$ рад/с вдоль воздушного зазора, а в процессе вращения амплитуда колеблется в интервале 1,3-1,5 Тл, что вызвано периодичностью питающего тока и влиянием двусторонней зубчатости.

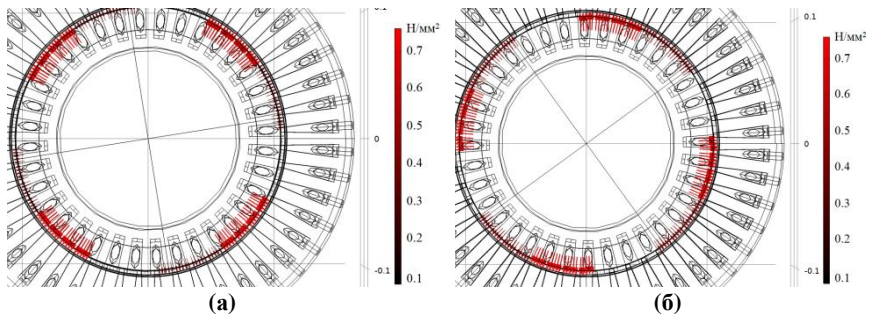


**Рис. 3. Магнитная индукция в AIR180M4U3:
 $t = 1$ мс (а); $t = 4$ мс (б)**

**Fig. 3. Magnetic flux density in AIR180M4U3 motor:
 $t = 1$ ms (a); $t = 4$ ms (b)**

V. Моделирование механоакустических процессов

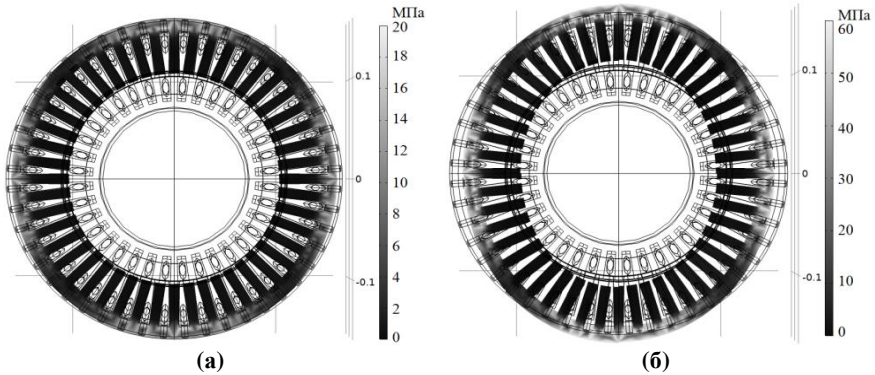
С использованием полученных результатов исследования магнитных полей в АД и (1) были получены графики распределения радиальных магнитных сил, действующих на статор. При расчетах сделано предположение, что магнитные силы действуют на зубцы статора, поскольку именно в воздушном зазоре магнитное поле ориентировано по нормали [4]. Пространственное распределение радиальных магнитных сил, действующих на статор, приведено на рис. 4.



**Рис. 4. Радиальные магнитные силы в AIR180M4U3:
 $t = 1$ мс (а); $t = 4$ мс (б)**

**Fig. 4. Radial magnetic (Maxwell) forces in AIR180M4U3 motor:
 $t = 1$ ms (a); $t = 4$ ms (b)**

Результаты расчета пространственно-временных распределений действующих магнитных сил позволили определить поля механических напряжений по фон Мизесу, вызванных действием магнитных сил на статор, деформаций и излучаемого шума во временной области. На рис. 5 представлены графики механических напряжений и деформаций стального сердечника статора при действии магнитных сил (рис. 4).



**Рис. 5. Напряжения по фон Мизесу в стали статора AIR180M4У3:
 $t = 1$ мс (а); $t = 4$ мс (б)**

**Fig. 5. Von Mises stress in the stator core of AIR180M4U3 motor:
 $t = 1$ ms (a); $t = 4$ ms (b)**

Из графиков напряжений (рис. 5) следует, что в стали статора при действии магнитной силы с порядком $r = 4$ доминирует форма колебаний с порядком $r = 2$ и амплитудой 0,03 мм. При этом волны деформаций на частоте вибровозмущающей силы практически неподвижны, тогда как сами магнитные силы «вращаются» синхронно с магнитным полем.

В процессе своей периодической деформации сталь статора является сильным источником шума, преимущественно в диапазоне от 100 до 4000 Гц. Полученные в ходе моделирования графики, демонстрирующие излучаемые двигателем поля звуковых давлений, вызванные его магнитной вибрацией, представлены на рис. 6. Излучаемое двигателем звуковое давление p достигает амплитуды 5 Па, что соответствует уровню шума $L_p = 108$ дБ (относительно порога 20 мкПа). При расчете использовалось известное выражение [14, 15]:

$$L_p = 20 \lg \frac{p}{20 \cdot 10^{-6}}. \quad (11)$$

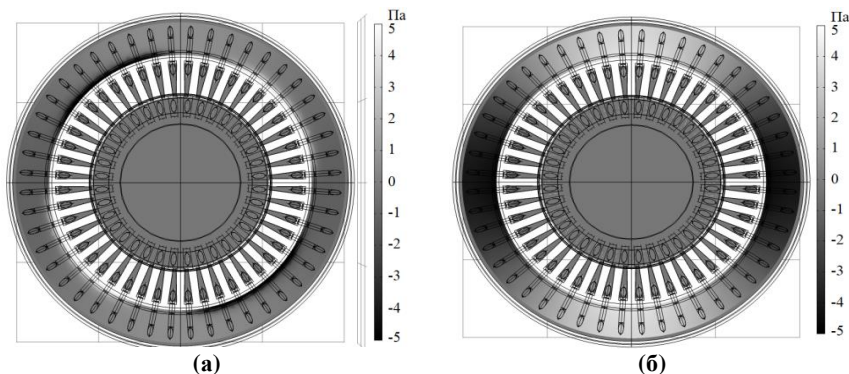


Рис. 6. Звуковое давление, излучаемое АИР180М4У3:
 $t = 1$ мс (а); $t = 4$ мс (б)

Fig. 6. Acoustic radiation pressure of AIR180M4U3 motor:
 $t = 1$ ms (a); $t = 4$ ms (b)

VI. Частотный анализ стали статора двигателя

На предыдущих этапах магнитная вибрация статора АД АИР180М4У3 возбуждалась полем с частотой 50 Гц, индуцируемым токами идеальной синусоидальной формы. На практике основной шум излучается высшими гармониками тока на более высоких частотах (свыше 500 Гц). В этом же частотном диапазоне находятся собственные частоты колебаний статоров. Поскольку магнитные силы, действующие вблизи этих частот, способны вызывать существенные амплитуды деформаций статора, а, следовательно, и вибрации, при разработке системы активного гашения магнитной вибрации нужно уделить особое внимание гармоникам питающего тока, порождающим магнитные силы (8) с этой частотой.

Частотный анализ модели статора АД АИР180М4У3 позволил определить основные формы его колебаний с учетом действия силы согласно рис. 4. Внешний вид форм колебаний статора приведен на рис. 7. Результаты частотного анализа подтверждают, что доминирующей формой колебаний является форма с порядком $r = 2$ (рис. 7,а). Ее превалирование над другими модами подкрепляется близостью частоты магнитной силы ($f = 100$ Гц) к собственной частоте $f_1 = 165$ Гц. Вторая мода с частотой $f_2 = 571$ Гц характеризуется пространственным порядком $r = 4$ и отличается неравномерной деформацией вдоль оси. Третья мода имеет пространственный порядок $r = 6$ и частоту $f_3 = 1556$ Гц, а четвертая – $r = 8$ и $f_4 = 1764$ Гц.

Согласно (8), магнитные вибрации на этих частотах могут возбудить гармоники тока $f_{g3} = 200$ Гц, $f_{g5} = 600$ Гц, $f_{g15} = 1600$ Гц, $f_{g17} = 1600$ Гц (частота третьей гармоники указана для формы колебаний $r = 0$).

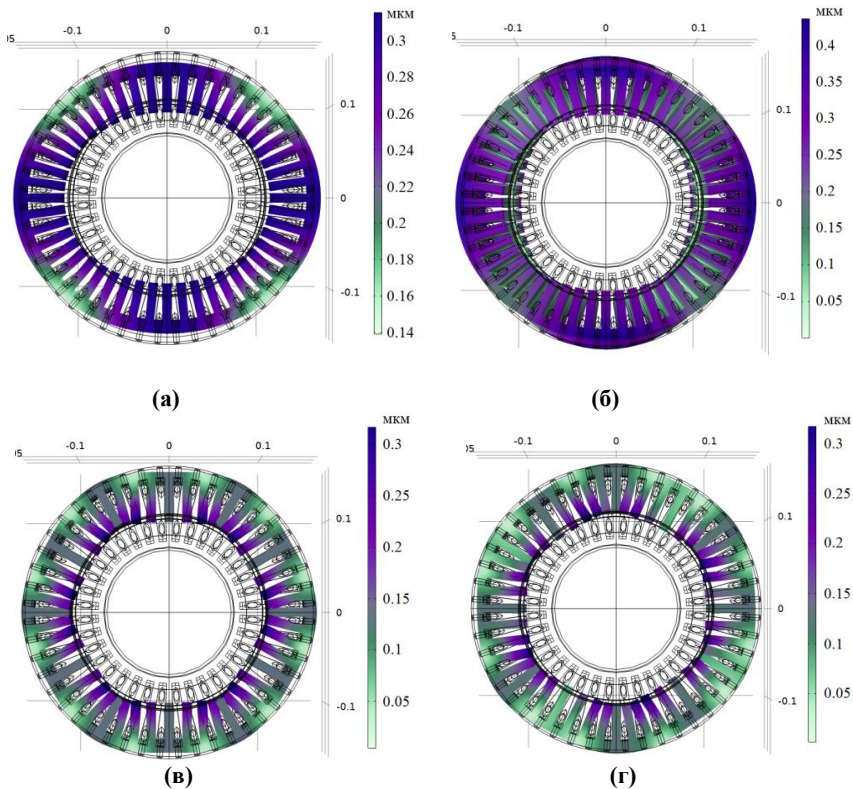
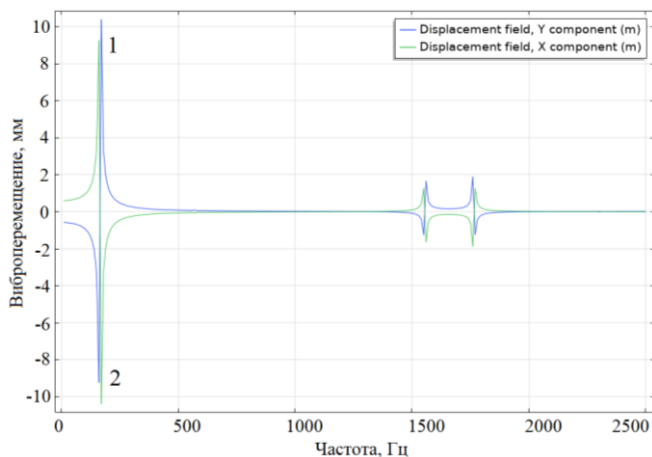


Рис. 7. Формы колебаний статора АИР180М4У3 на разных частотах:
 $f = 165$ Гц (а); $f = 571$ Гц (б); $f = 1556$ Гц (в); $f = 1764$ Гц (г)

Fig. 7. Deformation modes of the AIR180M4U3 at different frequencies:
 $f = 165$ Hz (a); $f = 571$ Hz (b); $f = 1556$ Hz (c); $f = 1764$ Hz (d)

В результате частотного анализа были получены спектры виброперемещений точек, расположенных на внешней стороне сердечника статора на пересечении координатных осей. Спектрограммы представлены на рис. 8 (амплитуды колебаний автоматически увеличены программой). Из анализа спектрограммы следует, что колебания статора на частоте $f_1 = 165$ Гц характеризуются значительно большей амплитудой, чем на других ча-

стотах. Примечательно, что амплитуда колебаний на частоте $f_2 = 571$ Гц на два порядка меньше, чем на первой моде.



**Рис. 8. Спектрограммы виброперемещений статора АИР180М4У3:
1 – по оси Y; 2 – по оси X**

**Fig. 8. Frequency responses of displacement of the stator
of AIR180M4U3 motor: 1 – at the Y axis; 2 – at the X axis**

VII. Моделирование прочих процессов в двигателе

Помимо исследования процесса возбуждения магнитных вибраций, разработанная программа позволяет изучать и другие процессы в двигателе: электрические потери в стали и обмотках, пульсации электромагнитного момента, нагрев обмоток и т.д. Более того, программа позволяет рассчитывать многие технические параметры: потребляемая мощность, активное и реактивное сопротивление обмоток, их индуктивность и т.д. На рис. 9 приведены результаты расчета потерь в обмотках электродвигателя, а на рис. 10 – диаграмма пульсаций электромагнитного момента в процессе работы АД. Эти возможности программы будут более подробно раскрыты в будущих исследованиях.

VIII. Заключение

В программной среде мультифизического конечно-элементного проектирования была разработана модель, позволяющая исследовать электромагнитные, механоакустические и энергетические процессы в асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором. При вычислениях учитывается взаимосвязанность и взаимовлияние процессов, происходящих на разных уровнях физики.

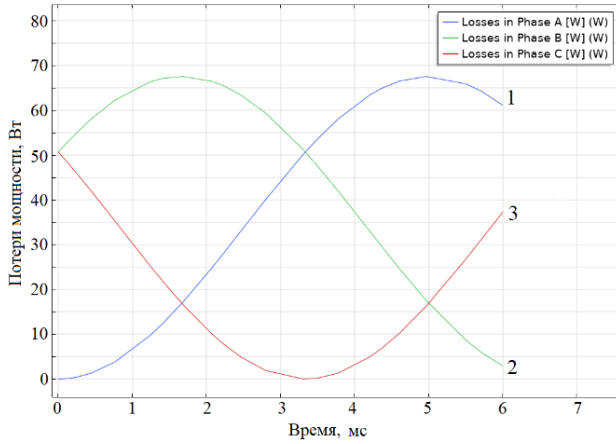


Рис. 9. Потери в обмотках статора AIR180M4У3:
1 – в фазе А; 2 – в фазе В; 3 – в фазе С

Fig. 9. Losses in the stator winding of AIR180M4U3:
1 – in the phase A; 2 – in the phase B; 2 – in the phase C

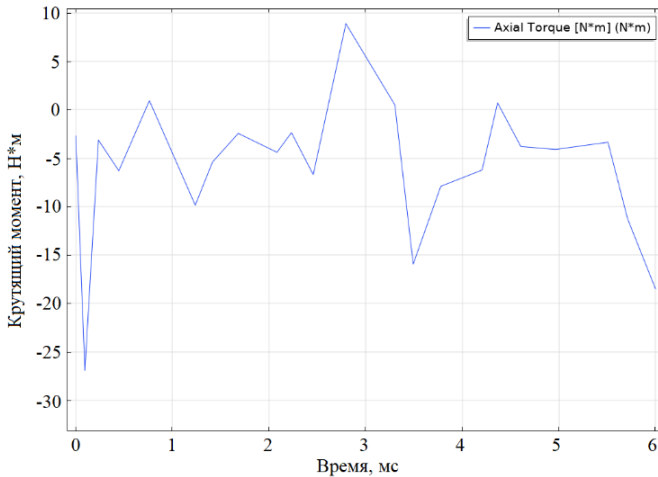


Рис. 10. Электромагнитный момент AIR180M4У3

Fig. 10. Electromagnetic torque of AIR180M4U3

В результате моделирования процессов в двигателе марки AIR180M4У3 были получены графики, показывающие пространственно-

временные распределения физических переменных, имеющих отношение к возбуждению магнитного шума и вибрации: магнитного поля, радиальной магнитной силы, деформации статора, излучаемого звукового давления. Было установлено, что вибрация статора происходит с порядком $r = 2$, а не $r = 4$, как должно следовать из теории. Колебания статора происходят без вращения синхронно с магнитным полем. Частотный анализ позволил выявить основные формы свободных колебаний статора двигателя АИР180М4У3 и соответствующие им частоты. Было подтверждено, что наибольшей амплитудой характеризуется первая мода с частотой $f_1 = 165$ Гц и $r = 2$, вторая мода ($f_2 = 571$ Гц, $r = 4$) меньше практически в 100 раз, третья и четвертая – меньше первой в 6 раз.

В будущем планируется использовать разработанную программу при исследовании влияния гармонического состава питающего тока на процессы возбуждения магнитных вибраций статоров асинхронных электродвигателей.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект № 20-19-00372).

© Ермолаев А.И., 2021

© Ерофеев В.И., 2021

© Плехов А.С., 2021

© Титов Д.Ю., 2021

Поступила в редакцию 29.06.2021

Received 29.06.2021

Библиографический список

- [1] Астахов Н.В., Малышев В.С., Овчаренко Н.Я. Математическое моделирование вибраций асинхронных машин. Кишинев: Штиинца, 1987. – 145 с.
- [2] Доброскок Н.С. Алгоритмические методы снижения шумов и вибраций в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе: дис. канд. техн. наук, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», С.-Пб., 2014. – 162 с.
- [3] Maliti K.C. Modelling and analysis of magnetic noise in squirrel-cage induction motors: doctoral dissertation. Stockholm, 2000. – 209 p.
- [4] Шубов И.Г. Шум и вибрация электрических машин. Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 208 с.
- [5] Leleu E., Espanet C., Miraoui A., Siala S. Analytical modelling of electromagnetic origin vibrations in an induction machine supplied by high power PWM inverter // in proc. IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, Nov. 6-10, 2006, Paris, France. IEEE, 2007, pp. 836-843. DOI: 10.1109/IECON.2006.347731.
- [6] Belkhatay D., Roger D., Brudny J.F. Active reduction of magnetic noise in asynchronous machine controlled by stator current harmonics // in proc. 1997 Eighth In-

- ternational Conference on Electrical Machines and Drives (Conf. Publ. No. 444), Sept. 1-3, 1997, Cambridge, UK. IET, 1997, pp. 400-405. DOI: 10.1049/cp:19971107.
- [7] Cassoret B., Corton R., Roger D., Brudny J.-F. Magnetic noise reduction of induction machines / B. Cassoret, // IEEE Transactions on Power Electronics. 2003. Vol. 18. No. 2. P. 570-579. DOI: 10.1109/TPEL.2003.809341.
- [8] Pellerey P., Favennec G., Lanfranchi V., Friedrich G. Active reduction of electrical machines magnetic noise by the control of low frequency current harmonics // in proc. IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Oct. 25-28, 2012, Montreal, QC, Canada. IEEE, 2012, pp. 1654-1659. DOI: 10.1109/IECON.2012.6388727.
- [9] Binojkumar A.C., Saritha B., Narayanan G. Acoustic noise characterization of space-vector modulated induction motor drives – an experimental approach // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2015. Vol. 62. No. 6. P. 3362-3371. DOI: 10.1109/TIE.2014.2374557.
- [10] Franck D., van der Giet M., Hameyer K. Active reduction of audible noise exciting radial force-density waves in induction motors // in proc. 2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), May 15-18, 2011, Niagara Falls, ON, Canada. IEEE, 2011, pp. 1213-1218. DOI: 10.1109/IEMDC.2011.5994776.
- [11] Копылов И.П. Электрические машины. М.: Энергоатомиздат, 1986. – 360 с.
- [12] Shahaj A. Mitigation of vibration in large electrical machines: BEng(Hons) thesis. University of Nottingham, Nottingham, 2010. – 424 p.
- [13] Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболенская Е.А. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1982. – 504 с.
- [14] ГОСТ 8.417-2002. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Единицы величин. Введ. 2003-09-01. ФГУП "ВНИИМ им. Д.И. Менделеева", 2003. – 40 с.
- [15] ГОСТ Р МЭК 60027-3-2016. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Обозначения буквенные, применяемые в электротехнике. Часть 3. Логарифмические и относительные величины и единицы измерений, Введ. 2017-02-01. М.: Стандартинформ, 2019. – 26 с.

References

- [1] N.V. Astakhov, V.S. Malyshev and N.Y. Ovcharenko, *Matematicheskoe modelirovanie vibracij asinhronnyh mashin [Mathematical modeling of vibrations of asynchronous machines]*. Chisinau: Shtiintsa, 1987 (in Russian).
- [2] N.S. Dobroskok, "Algoritmicheskie metody snizheniya shumov i vibracij v chastotno-reguliruemom asinhronnom elektroprivode [Algorithmic methods of noise and vibration reduction in a frequency-controlled induction electric drive]", Cand. of Tech. S. thesis, ETU "LETI", Saint-Peterburg, Russia, 2014 (in Russian).
- [3] K.C. Maliti, *Modeling and analysis of magnetic noise in squirrel-cage induction motors: doctoral dissertation*. Stockholm, 2000.
- [4] I.G. Shubov, *Shum i vibraciya elektricheskikh mashin [Noise and vibration of electrical machines]*. Leningrad: Energoatomizdat, 1986 (in Russian).
- [5] E. Leleu, C. Espanet, A. Miraoui and S. Siala, "Analytical modelling of electromagnetic origin vibrations in an induction machine supplied by high power PWM in-

- verter”, in proc. *IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, Nov. 6-10, 2006, Paris, France, 2007, pp. 836-843. DOI: 10.1109/IECON.2006.347731.
- [6] D. Belkhat, D. Roger and J.F. Brudny, “Active reduction of magnetic noise in asynchronous machine controlled by stator current harmonics”, in proc. *1997 Eighth International Conference on Electrical Machines and Drives (Conf. Publ. No. 444)*, Sept. 1-3, 1997, Cambridge, UK, pp. 400-405. DOI: 10.1049/cp:19971107.
- [7] Cassoret, B., R. Corton, D. Roger and J.-F. Brudny, “Magnetic noise reduction of induction machines”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 18, no. 2, pp. 570-579, March 2003. DOI: 10.1109/TPEL.2003.809341.
- [8] P. Pellerey, G. Favennec, V. Lanfranchi and G. Friedrich, “Active reduction of electrical machines magnetic noise by the control of low frequency current harmonics”, in proc. *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Oct. 25-28, 2012, Montreal, QC, Canada, 2012, pp. 1654-1659. DOI: 10.1109/IECON.2012.6388727.
- [9] A.C. Binoj Kumar, B. Saritha and G. Narayanan, “Acoustic noise characterization of space-vector modulated induction motor drives – an experimental approach”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 6, pp. 3362-3371, June 2015. DOI: 10.1109/TIE.2014.2374557.
- [10] D. Franck, M. van der Giet and K. Hameyer, “Active reduction of audible noise exciting radial force-density waves in induction motors”, in proc. *2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, May 15-18, 2011, Niagara Falls, ON, Canada, 2011, pp. 1213-1218. DOI: 10.1109/IEMDC.2011.5994776.
- [11] I.P. Kopylov, [*Elektricheskie mashiny*] *Electric machines*. Moscow: Energoatomizdat, 1986 (in Russian).
- [12] A. Shahaj, “Mitigation of vibration in large electrical machines”, BEng(Hons) thesis, University of Nottingham, Nottingham, 2010.
- [13] A.E. Kravchik, M.M. Shlaf, V.I. Afonin and E.A. Sobolenskaja, *Asinkhronnye dvigateli serii 4A: Spravochnik [Induction motors series 4A: Handbook]*. Moscow, Energoatomizdat, 1982 (in Russian).
- [14] State system for ensuring the uniformity of measurements. Units of quantities, GOST 8.417-2002, Sept. 2003.
- [15] State system for ensuring the uniformity of measurements. Letter designations used in electrical engineering. Part 3. Logarithmic and relative quantities and units, GOST R IEC 60027-3-2016, Feb. 2017.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

Ермолаев Артем Игоревич, кандидат технических наук, научный сотрудник Института проблем машиностроения Российской академии наук, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Artem I. Ermolaev, Cand. Sci. (Eng.), researcher of the Mechanical Engineering Research Institute of RAS, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Ерофеев Владимир Иванович, доктор физико-математических наук, директор Института проблем машиностроения Российской академии наук, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Vladimir I. Erofeev, Doc. Sci. (Phys.-Math.), director of the Mechanical Engineering Research Institute of RAS, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Плехов Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Alexandr S. Plekhov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Титов Дмитрий Юрьевич, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Dmitriy Yu. Titov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

УДК 621.311

DOI 10.46960/2658-6754_2021_3_57

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВТОРЕНИЯ ТЕХАССКОГО СЦЕНАРИЯ В РОССИЙСКИХ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ, СОДЕРЖАЩИХ ЗНАЧИТЕЛЬНУЮ ДОЛЮ ВИЭ

О.Н. КузнецовНациональный исследовательский университет «МЭИ»
Москва, Россия

ORCID: 0000-0002-6847-4718 e-mail: kuznetsovon@mpei.ru

Д.А. АверьяновНациональный исследовательский университет «МЭИ»
Москва, Россия

ORCID: 0000-0002-0836-3135 e-mail: averianov_98@mail.ru

Проведен анализ возможности повторения тexasского сценария системной аварии в российских энергосистемах, содержащих значительную долю ВИЭ. Рассмотрена российская энергосистема, которая по совокупности параметров наиболее приближена к тexasской по доле возобновляемых источников энергии, состава генерации и межсистемным связям. Выбранная энергосистема рассматривалась в двух вариантах: существующем и перспективном, последний из которых был определен путем изучения схемы и программы развития данной энергосистемы. На основании этой информации были созданы два вышеописанных варианта модели и изучена возможность повторения аварии по тexasскому сценарию. Сделано заключение о возможности возникновения аналогичной аварии и определены условия реализации данного сценария развития событий.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, межсистемные связи, системные аварии, устойчивость, энергообъединения.

Для цитирования: Кузнецов, О.Н. Анализ возможности повторения тexasского сценария в российских энергосистемах, содержащих значительную долю ВИЭ / О.Н. Кузнецов, Д.А. Аверьянов // Интеллектуальная Электротехника. 2021. № 3. С. 57-74. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_3_57

ANALYSIS OF POSSIBILITY OF REPEATING TEXAS SCENARIO IN RUSSIAN POWER SYSTEMS CONTAINING A SIGNIFICANT SHARE OF RENEWABLE ENERGY SOURCES

O.N. Kuznetsov

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
Moscow, Russia

ORCID: 0000-0002-6847-4718 e-mail: kuznetsovon@mpei.ru

D.A. Averyanov

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
Moscow, Russia

ORCID: 0000-0002-0836-3135 e-mail: averianov_98@mail.ru

Abstract. The article analyzes the possibility of repeating the Texas system accident in Russian power systems containing a significant share of renewable energy sources. Within the framework of the work, the Russian energy system was considered, which, according to the set of parameters, is the closest to the Texas one in terms of the number of renewable energy sources, the composition of generation and intersystem connections with other energy systems. The selected power system was considered in two versions: in its current state and in its future version, which was determined by studying the scheme and program of development of this power system. Based on this information, two variants of the model described above were created and the possibility of a repeat of the accident in the Texas scenario was studied. On the basis of the conducted research, a conclusion is made about the possibility of a similar accident and the conditions under which this scenario is possible are determined.

Keywords: interconnection line, power interconnections, renewable energy, stability, system crashes.

For citation: O.N. Kuznetsov and D.A. Averyanov, “Analysis of possibility of repeating Texas scenario in Russian energy systems containing a significant share of renewable energy sources”, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 57-74, 2021.

DOI: 10.46960/2658-6754_2021_3_57

I. Введение

Тема устойчивой и надежной работы энергосистем со значительной долей ВИЭ на данный момент является актуальной в связи с темпами внедрения ВИЭ в энергосистемы [1], которая в целом достаточно хорошо освещена во множестве научных работ. Больше количество исследований затрагивает вопрос каскадного отключения ВИЭ, по сути акцентируя внимание на увеличении их доли в современных энергосистемах и оказании ими все более значительного влияния на безопасность энергосистемы. В [2] изучаются возможности снижения рисков каскадных сбоев в следствии увеличения доли ветроэлектростанций (ВЭС) в энергосистеме. В данной работе предложена каскадная модель отказа, которая учитывает характеристики ветроэнергетики: структура ВЭС, случайность мощности, которую выдает ВЭС, управление ветряной турбиной и реакция на ее отключение после короткого замыкания. Чтобы определить ключевые факторы отключения, используется дерево решений для анализа результатов, полученных из этой модели отключения. В [3] изучается влияние тепловых воздействий на риск отключения ВЭС в энергосистеме.

На основе анализа публикаций по теме исследования был сделан вывод о том, что исследования по данной тематике не проводились. Таким образом, исследование возможности повторения техасского сценария системной аварии в российских энергосистемах является актуальной задачей.

II. Постановка задачи

Одним из направлений развития современной электроэнергетики является увеличение доли ВИЭ в энергосистемах развитых стран, в том числе, в России [4]. Оно приводит к целому спектру проблем, связанных с ухудшением устойчивости и надежности электроснабжения потребителей. Ключевой особенностью ВИЭ в плане надежности является нестабильность и непредсказуемость характеристик энергоносителя в определенный период. По этой причине ВИЭ не могут гарантировать выработку определенного количества мощности в заданный момент времени. Стоит также отметить, что практика показывает фактическую беззащитность ВИЭ перед природными катаклизмами, нарушающими их работу. Примером служит недавняя авария в Техасе 15 февраля 2021 г. Несмотря на то, что она произошла не только из-за нарушения работы ВИЭ, а по стечению целого ряда обстоятельств, данная авария достаточно показательна.

В данной статье изучена возможность возникновения аналогичных аварий в энергосистеме Крыма. Для изучения вопроса рассматривались режимы работы существующей и перспективной энергосистем Черноморского РДУ.

III. Описание аварии, произошедшей в энергосистеме Техаса

11 февраля 2021 г. США накрыл арктический шторм. Наиболее тяжелые последствия шторма наблюдались в Техасе [5]. Температура в этом штате зимой обычно держится около нуля. По этой причине падение температуры в некоторых местах до -20°C стало настоящей катастрофой. Рис. 1 иллюстрирует отклонение температуры от нормы.



Рис. 1. График отклонения температуры от нормы в штате Техас

Fig. 1. Temperature deviation graph from the norm in the state of Texas

Инфраструктура штата оказалась неготовой к такому падению температуры, вследствие чего около 12 млн чел. столкнулись с проблемой нехватки питьевой воды, а около 3 млн домохозяйств остались без тепла и электричества.

Одной из основных причин стало то, что более 60 % домохозяйств Техаса отапливается за счет электричества, и только оставшиеся 40 % – за счет газа. Также немаловажным является факт, что в таком теплом регионе дома просто не рассчитаны на такие морозы. Это привело к тому, что потребление электроэнергии выросло до 70 ГВт, что более чем в полтора раза превышает средний уровень потребления в 40 ГВт. При этом, увеличиваясь и приближаясь к прогнозируемому максимуму потребления в 67 ГВт, пик спроса превысил этот показатель, составив более 76 ГВт. После преодоления спросом отметки в 67 ГВт последовало частичное отключение энергосистемы. В результате были выведены из строя около 45 ГВт установленных мощностей. Из этих 45 ГВт на ВЭС приходилось около 16 ГВт. Это чуть более половины всей установленной мощности ВЭС в штате. Остальные 28 ГВт пришлось на газовые, угольные и атомные электростанции. Доля солнечных электростанций (СЭС) не так значительна, как доля ветряных, однако стоит отметить, что вырабатываемая ими мощность также резко упала. Компенсация колебаний мощности ВИЭ осуществляется с помощью электростанций, работающих на газе, однако в

этот раз с ним возникли проблемы. Первая заключалась в неподготовленности нефтегазовой структуры штата к такому похолоданию. Результатом этого стало сокращение объемов добычи газа на 30-50 % из-за замерзания конденсата в трубах и остановках компрессоров, оставшихся без электроэнергии. Вторая проблема заключалась в отсутствии значительных запасов газа в хранилищах.

На фоне сложившейся ситуации губернатор Техаса ввел временный запрет на экспорт газа. Вместе с тем, поставки газа на нужды отопления обладали повышенным приоритетом, что также усугубило ситуацию для электростанций. Интересен и факт выхода из строя одного из блоков атомной электростанции (АЭС) вследствие ложного срабатывания автоматики. Причиной его оказалось перемерзание датчика давления питательной воды в турбине. Данный отказ произошел из-за того, что турбины АЭС располагаются на площадке под открытым небом, т.е. не имеют машинного зала. По экономическим соображениям, это приемлемо для региона, где средняя температура зимой держится около нуля, однако данное решение показало всю свою несостоятельность в условиях аномальных морозов.

Подводя итог, можно констатировать, что вследствие катаклизма энергосистема Техаса потеряла до 50 % мощностей ТЭС, до 50 % мощностей ВЭС и 25 % мощностей АЭС. Для более четкого понимания картины на рис. 2 приведена диаграмма, показывающая долю производства электроэнергии источниками разных типов энергоносителей.

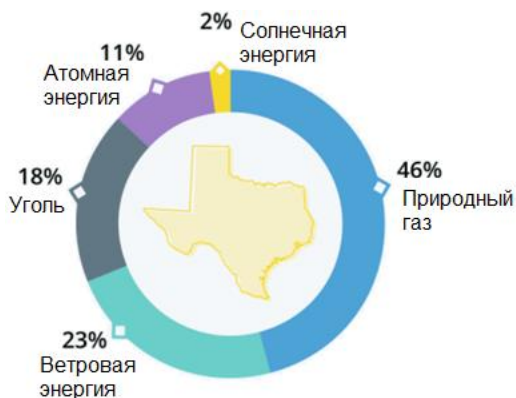


Рис. 2. Диаграмма производства электроэнергии электростанциями различных типов энергоносителя

Fig. 2. Diagram of electricity production by power plants of various types of energy carrier

Закончив обзор проблем, связанных с генерацией в энергосистеме Техаса, можно выделить и ряд других аспектов, повлиявших на ситуацию, например, системные проблемы. Главная из них – слабая связь энергосистемы Техаса с соседними Восточной, Западной и Мексиканской. В связи с этим, соседние энергосистемы не смогли принять на себя часть нагрузки Техаса. Также можно отметить достаточно свободное регулирование рынка энергетики этого штата, которое не обяывает поставщиков держать достаточное количество резервных мощностей. При этом резервные генераторы ориентированы на работу летом, когда имеет место максимальное потребление электроэнергии и по этой причине не защищены от холодов.

IV. Обоснование выбора рассматриваемой энергосистемы

Для исследования по ряду причин была выбрана энергосистема Крыма.

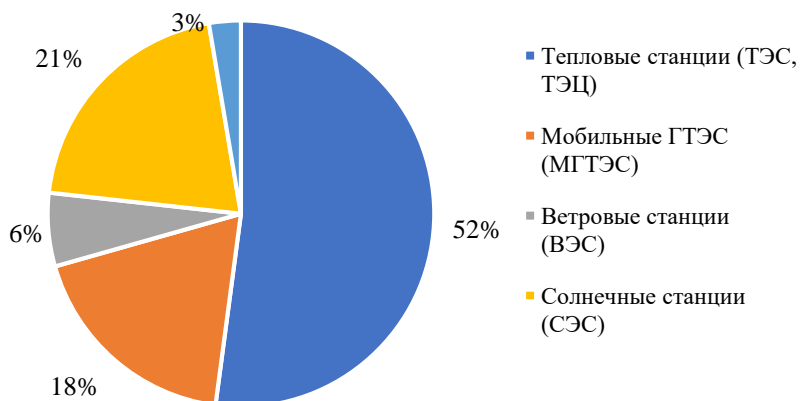


Рис. 3. Структура установленных мощностей электростанций энергосистемы Республики Крым

Fig. 3. Structure of installed capacities of power plants of the power system of the Republic of Crimea

Первым и самым важным аспектом является процент установленной мощности ВИЭ в энергосистеме Крыма как уникального региона России [6]. 5 % потребности в электроэнергии покрывается здесь благодаря ветряным и солнечным электростанциям. Первые из них, работающие на возобновляемых источниках энергии, построены в 2010-2012 гг.: СЭС Родниковое, СЭС Охотниково, СЭС Перово, СЭС Митяево, общей мощностью 227,3 МВт.

По состоянию на 2020 год в республике Крым 7 ВЭС и 4 СЭС. Их суммарная установленная мощность равна 385,554 МВт. По официальным данным, на 01.01.2020 установленная мощность ВИЭ в крымской энергосистеме составляла 27 % от общей установленной мощности всех крымских электростанций (рис. 3). Таким образом, возобновляемая энергетика получила значительное распространение в регионе. Также следует отметить наметившуюся положительную динамику в развитии ВИЭ в Крыму. В соответствии с [1], до 2023 г. возможно создание целого ряда новых ВЭС и СЭС. Введение данных электростанций позволит:

- вытеснить часть органического топлива, ослабив зависимость от внешних его поставок;
- понизить себестоимость производства электроэнергии;
- уменьшить объемы дотаций на энергоснабжение малых населенных пунктов;
- снизить негативное влияние на природную среду, связанное с выработкой электроэнергии.

В планах программы развития крымского региона предусмотрено создание шести ВЭС суммарной установленной мощностью 512 МВт и одной СЭС с установленной мощностью 110 МВт.

Из этого следует, что доля ВИЭ в Крыму среди всей генерации будет неуклонно расти, благодаря чему в настоящее время и в ближайшем будущем Крым станет ведущим регионом России по части использования ВИЭ.

Второй причиной является тот факт, что крымская энергосистема, как и энергосистема Техаса, значительно зависит от электростанций, работающих на природном газе. Из рис. 3 видно, что 73 % электрических станций – тепловые, большая часть которых – газо-мазутные или газовые. Исключением являются мобильные газотурбинные электростанции, которые работают на дизельном топливе. Также стоит отметить, что Крым и Техас, имея большую часть генерации, работающей на природном газе, полностью покрывают свое потребление газа с помощью предприятий по его добычи находящихся на территории региона. Оба региона самодостаточны в плане энергетических ресурсов. Еще одной причиной выбора крымской энергосистемы служит то, что Крым является южным регионом, как и Техас, однако стоит отметить, что зимы в Крыму более холодные.

V. Описание использованной расчетной модели

Крымская энергосистема имеет сложную структуру и разветвленную сеть линий электропередачи различных классов напряжений. С целью уменьшения трудоемкости в рамках данного исследования принимались во внимание линии 220 кВ и выше, нагрузки на шинах низшего напряжения (НН) ПС 220 и 330 кВ. Линии 110 кВ учитывались только в случае

Для проведения исследования было создано три модели с различным составом генерации и объемом нагрузки: схема крымской энергосистемы по состоянию на 2019 год, схема крымской энергосистемы по состоянию на 2024 год в соответствии с базовым прогнозом и схема крымской энергосистемы по состоянию на 2024 год в соответствии с умеренно-оптимистичным прогнозом. На рис. 6 приведена динамика максимумов для умеренно-оптимистического и базового вариантов прогноза максимума нагрузки энергосистемы Республики Крым.

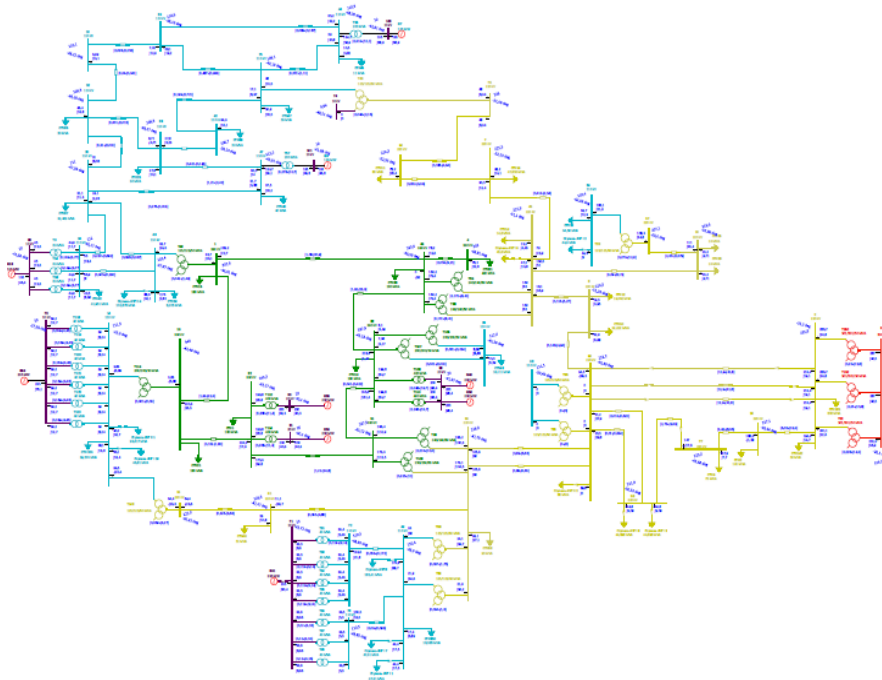


Рис. 5. Модель энергосистемы Республики Крым в ПВК ETAP

Fig. 5. Model of the power system of the Republic of Crimea in ETAP

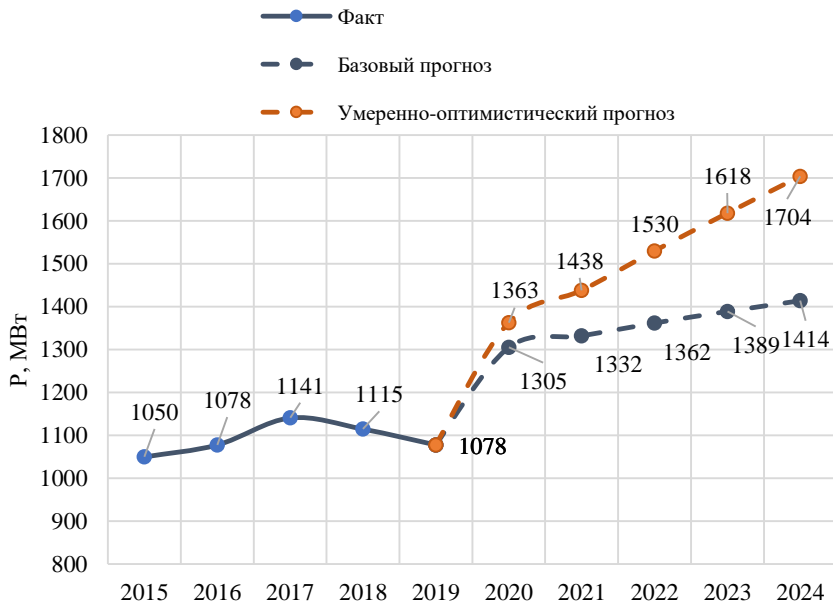


Рис. 6. Умеренно-оптимистический и базовый варианты прогноза максимума нагрузки энергосистемы Республики Крым

Fig. 6. Moderately optimistic and basic versions of the forecast of the maximum load of the power system of the Republic of Crimea

Также модели различаются составом генерации, который приведен в табл. 1.

VI. Описание режимов работы рассматриваемых энергосистем

В рамках исследования был рассмотрен один режим работы для всех трех вариантов энергосистемы.

Речь идет о режиме работы энергосистемы при аномально низких температурах окружающей среды в регионе. По факту рассматривался режим, который может протекать в крымской энергосистеме при падении температуры на 20° относительно нормы. В Техасе падение температура упала до нуля фаренгейтов (-18°), при нормальной температуре в 10° в это время года. Средняя температура в Крыму в январе (самый холодный месяц) равняется 1° тепла за последние 20 лет [12]. В связи с этим для данного режима примем, что температура в регионе опустится до -25°C .

Таблица 1.
Установленная мощность электростанций, входящих в состав генерации, энергосистемы Республики Крым и г. Севастополь для рассматриваемых вариантов сети

Table 1.
Installed capacity of power plants that are part of the generation, power system of the Republic of Crimea and the city of Sevastopol for the considered network options

№ п/п	Наименование показателей	2020 г.	Базовый прогноз 2024 г.	Умеренно-оптимистичский прогноз 2024 г.
1	2	3	4	5
	Установленная мощность электростанций энергосистемы Республики Крым	1442,77	1522,77	1838,27
1	Симферопольская ТЭЦ	86	86	122
2	Камыш-Бурунская ТЭЦ	30	0	0
3	Сакская ТЭЦ	145,317	145,317	145,317
4	Таврическая ТЭС	490,208	490,208	490,208
5	Симферопольская МГТЭС	135	135	135
6	Западно-Крымская МГТЭС	131,8	131,8	131,8
7	Сакская ВЭС	20,828	20,828	20,828
8	Тархангутская ВЭС	22,453	22,453	22,453
9	Донузлавская ВЭС	6,77	6,77	6,77
10	Судакская ВЭС	3,76	3,76	3,76
11	Пресноводненская ВЭС	7,39	7,39	7,39
12	Останинская ВЭС	24,55	24,55	24,55
13	Степная ВЭС	0	0	180
14	Восточная ВЭС	0	0	75
15	Присивашская ВЭС	0	0	25
16	Восточно-Крымская (Акташская) ВЭС	2,813	2,813	2,813
17	Зольненская ВЭС	0	0	0
18	СЭС Николаевка	69,7	69,7	69,7
19	СЭС Перово (ПС 110 кВ Таврия)	105,578	105,578	105,578
20	СЭС Охотниково	82,653	82,653	82,653
21	СЭС Митяево (ПС 110 кВ Митяево)	31,55	31,55	31,55
22	СЭС Родниковое (ПС 110 кВ Родниковая)	7,5	7,5	7,5
23	СЭС Владиславовка	0	110	110

Продолжение табл. 1.
Table 1 (continued).

№ п/п	Наименование показателей	2020 г.	Базовый прогноз 2024 г.	Умеренно-оптимистический прогноз 2024 г.
	Установленная мощность электростанций энергорайона г. Севастополь	663,639	663,639	663,639
24	ТЭЦ Крымский содовый завод	20,4	20,4	20,4
25	ТЭЦ Крымский Титан	18	18	18
26	Севастопольская ТЭЦ	34,5	34,5	34,5
27	Балаклавская ТЭС	496,799	496,799	496,799
28	Севастопольская МГТЭС	129,3	129,3	129,3
29	С. Энерджи – Севастополь	3,04	3,04	3,04
	Установленная мощность электростанций энергосистемы Республики Крым и г. Севастополь	2105,909	2185,908	2501,909

В связи с такой низкой температурой ВИЭ должны испытывать проблемы с функционированием. Основная проблема для СЭС будет заключаться в выпадении осадков. При выпадении их большого количества поверхности фотоэлементов могут быть просто засыпаны снегом и перестать функционировать. В расчетах будет считаться, что все СЭС региона полностью выведены из строя. В случае ВЭС, скорее всего, возникнут проблемы с обледенением и процент вышедших из строя ВЭС можно принять, как в Техасе, до 75 %.

Важным вопросом остается работоспособность тепловых электростанций в регионе. Главное отличие, прежде всего, заключается в том, что на электростанциях и хранилищах газа всегда есть запасы газа. По этой причине логично предположить, что проблем с отключением тепловых электростанций не будет. Соответственно, примем, что все ТЭС будут работать, за исключением одного наиболее мощного блока, который отключен по причине ремонта/резерва.

Последний и немаловажный параметр, который необходимо определить – нагрузка. В Техасе большой рост нагрузки был в первую очередь связан с тем, что 60 % домохозяйств отапливались с помощью электричества. В Крыму же ситуация иная. По состоянию на 2015 г., уровень газификации республики составил 73 %. В городах и поселках городского типа обеспеченность населения природным газом – 84,9 %, в селах – 47,7 % [13]. В апреле 2016 г. была утверждена первая программа газификации

населенный пунктов Республики Крым, а в декабре 2017 г. – вторая. Поэтому логично предположить, что на данный момент уровень газификации еще выше. Тогда повышения нагрузки более чем в 1,5 раза, как это было в Техасе, произойти не должно. Несмотря на повышение расхода газа, отключения электростанций также не должно произойти по причине того, что, помимо собственного газа, в Крым также был проложен газопровод, который пущен в эксплуатацию в 2016 г. [14]. Однако, несмотря на это, при понижении температуры в регионе должна возрасти нагрузка на электрическую сеть. Это произойдет по двум основным причинам: будет включено дополнительное электрическое отопление, и большая часть людей будет проводить время в помещениях, а не на улице, включая больше бытовых приборов.

VII. Анализ полученных режимов

В работе было рассмотрено множество режимов для каждого из трех вариантов энергосистемы. Вычислить точное значение увеличения нагрузки относительно пика потребления в рассматриваемом режиме является трудновыполнимой задачей по причине отсутствия большого количества необходимых данных в открытом доступе и сложностью самого расчета. Поэтому для каждого из трех вариантов была построена зависимость перетока активной мощности по межсистемной связи энергосистемы Крыма с энергосистемой Краснодарского края от доли увеличения нагрузки относительно уровня максимума нагрузки энергосистемы каждого варианта в процентах (рис. 7).

Более подробно полученные режимные данные представлены в табл. 2. Обозначения, используемые в табл. 2: 1 – максимум нагрузки энергосистемы Крыма, МВт; 2 – переток по межсистемной связи; 3 – доля увеличения нагрузки, МВт; 4 – доля увеличения нагрузки, %.

Из полученных данных видно, что при текущем состоянии и уровнях нагрузки крымской энергосистемы повторение аварии аналогичной в Техасе невозможно при отсутствии каких-либо дополнительных аварий или отказов. При этом следует заметить, что даже при практически полном отключении ВИЭ энергосистема Крыма может покрыть увеличение максимума нагрузки на 35 %.

При рассмотрении режима на 2024 г. в соответствии с базовым прогнозом видно, что отключение потребителей будет наблюдаться только при увеличении максимума нагрузки свыше 55 %. Как уже было описано ранее с учетом структуры потребления, системы отопления и в целом большей подготовленности инфраструктуры к низким температурам, потребления выше 50 % маловероятно.

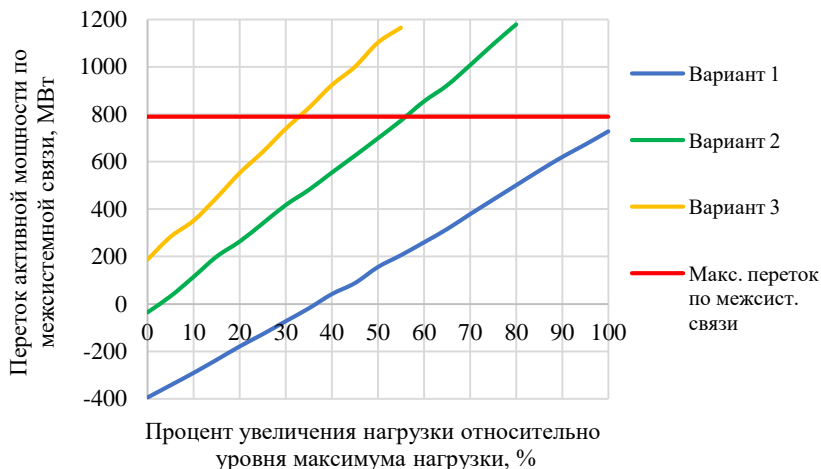


Рис. 7. Зависимость перетока активной мощности по межсистемной связи от доли увеличения нагрузки Крымской энергосистемы

Fig. 7. Dependence of the active power flow through the intersystem communication on the share of the increase in the load of the Crimean power system

В последнем рассмотренном режиме максимальное увеличение нагрузки чуть менее 35 %. В данном случае уже могут возникнуть проблемы с электроснабжением потребителей, однако, несмотря на это, очевидно, что даже при такой нагрузке система имеет большой запас по мощности для покрытия нагрузки.

VIII. Заключение

Проведено исследование возможности возникновения аварии вследствие резкого уменьшения температуры в энергосистеме Крыма, которая была бы аналогична недавней аварии в штате Техас. Получены следующие выводы.

1. В настоящее время для энергосистемы Крыма возникновение аналогичной аварии невозможно, так как с учетом текущего максимума нагрузки энергосистема избыточна, имея также сильную межсистемную связь с энергосистемой Краснодарского края.

2. В будущем, если исходить из базового и условно-оптимистичного прогноза на 2024 г., аналогичная авария гипотетически может произойти только в случае увеличения нагрузки до уровня, обозначенного в данном прогнозе.

Благодарим всех представителей ООО «ЕТАР СИСТЕМС» (ETAP SYSTEMS Russia) за проведенные консультации, занятия, видеоуроки и предоставленные учебные материалы на русском языке.

© Кузнецов О.Н., 2021

© Аверьянов Д.А., 2021

Поступила в редакцию 03.09.2021

Received 03.09.2021

Библиографический список

- [1] Схема и программа развития электроэнергетики республики Крым на 2020-2024 годы. Утв. расп. Главы Республики Крым №187-рг от 28 апреля 2020 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://mtop.rk.gov.ru/ru/structure/764> (дата обращения 11.06.2021).
- [2] Yuxin Z., Xuemin Z., Shengwei M., Deming X., Shuai W., Rui S., Blackout risk analysis and control of power system integrated with wind farm // 2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC), May 28-30, 2016, Yinchuan, China. IEEE, 2016. P. 876-882. DOI: 10.1109/CCDC.2016.7531107
- [3] Henneaux P., Labeau P., Maun J., Blackout probabilistic risk assessment and thermal effects: impacts of changes in generation // IEEE Transactions on Power Systems. 2013. Т. 28. № 4. P. 4722-4731. DOI: 10.1109/TPWRS.2013.2263851
- [4] Ветер энергоперемен // Атомный эксперт. 2018. № 6. [Электронный ресурс]. URL: https://atomicexpert.com/novawind_gosatom (дата обращения 12.03.2021).
- [5] Блэкаут в Техасе. Как нефтегазовый штат остался без топлива, электричества и одной АЭС // Хабр [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/post/543494/> (дата обращения 14.03.2021)
- [6] Основные характеристики российской электроэнергетики // Официальный сайт Министерства энергетики Российской Федерации. [Электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/532> (дата обращения 12.03.2021).
- [7] Карапетян И.Г., Файбисович Д.Л., Шапиро И.М. Справочник по проектированию электрических сетей, 2-е изд. М.: НИЦ ЭНАС, 2005. – 320 с.
- [8] Симонов А.В. [и др.]. Схема и программа развития электроэнергетики Республики Крым на 2019-2023. Заключительный отчет о НИР. 106-2.2/1. М.: АО «НТЦ ЕЭС (Московское отделение), 2018. – 210 с.
- [9] Об утверждении схемы и программы развития электроэнергетики Ростовской области на 2020-2024 годы. Утв. расп. губернатора Ростовской области № 91 от 30 апреля 2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.donland.ru/documents/12002/> (дата обращения 11.04.2021).
- [10] Безруких П.П., Грибков С.В. XIII Международная научно-практическая конференция «Возобновляемая и малая энергетика '2016» // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2016. № 7 (175). С. 58-72.
- [11] ETAP 19.0 User Guide. Operation Technology, Inc., 2019.

- [12] Летопись погоды // Справочно-информационный портал «Погода и климат». [Электронный ресурс]. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/history.php?id=ru®ion=82> (дата обращения 18.03.2021).
- [13] По состоянию на июль 2020 года в Крыму газифицировано 75% населенных пунктов // Строй-Крым.рф [Электронный ресурс]. URL: <http://stroy-krim.org/encyclopedia/news/po-sostoyaniyu-na-iyul-2020-goda-v-krymu-gazificirovano-75-naselyonnyh-punktov> (дата обращения 15.03.2021).
- [14] Трухина В. Газопровод в Крым. «Краснодарский край - Крым» - магистральный газопровод протяженностью 400 км // FB.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://fb.ru/article/293159/gazoprovod-v-kryim-krasnodarskiy-kray--kryim---magistralnyiy-gazoprovod-protyaj-nnostyu-km> (дата обращения 15.03.2021).

References

- [1] Skhema i programma razvitiya elektroenergetiki respubliki Krym na 2020-2024 gody [Scheme and program for the development of the electric power industry of the republic of Crimea for 2020-2024]. Approved by the Order of the Head of the Republic of Crimea No. 187-rg dated Apr. 28, 2020. [Online]. Available at: <https://mtop.rk.gov.ru/ru/structure/764> [Accessed: June 28, 2021] (in Russian).
- [2] Z. Yuxin, Z. Xuemin, M. Shengwei, X. Deming, W. Shuai and S. Rui, "Blackout risk analysis and control of power system integrated with wind farm", in *proc. 2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, May 28-30, 2016, Yinchuan, China, pp. 876-882. DOI: 10.1109/CCDC.2016.7531107
- [3] P. Henneaux, P. Labeau and J. Maun, "Blackout probabilistic risk assessment and thermal effects: impacts of changes in generation", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 4, pp. 4722-4731, Nov. 2013. DOI: 10.1109/TPWRS.2013.2263851
- [4] "Veter energoperemen [The wind of energy changes]", *Atomnyj ekspert [Atomic expert]*, no. 6, Aug.-Sept. 2018. [Online]. Available at: https://atomicexpert.com/novawind_rosatom (in Russian).
- [5] Blekaut v Tekhase. Kak neftegazovyy shtat ostalsya bez topliva, elektrichestva i odnoj AES [Blackout in Texas. How the oil and gas state was left without fuel, electricity and one nuclear power plant]. [Online]. Available at: <https://habr.com/ru/post/543494> [Accessed: Mar. 14, 2021] (in Russian).
- [6] *Osnovnye harakteristiki Rossijskoj elektroenergetiki [Main characteristics of the Russian electric power industry]*, Ministry of Energy of Russian Federation. [Online]. Available at: <https://minenergo.gov.ru/node/532> [Accessed: Mar. 12, 2021] (in Russian).
- [7] I.G. Karapetyan, D.L. Faibisovich and I.M. Shapiro, *Spravochnik po proektirovaniyu elektricheskikh setej [Handbook for the design of electrical networks]*, 2nd ed. Moscow: NC ENAS, 2005 (in Russian).
- [8] A.V. Simonov et al., "Skhema i programma razvitiya elektroenergetiki Respubliki Krym na 2019-2023 [Scheme and program for the development of the electric power industry of the Republic of Crimea for 2019-2023]", JSC "STC UES (moacow branch), Moscow, Russia, Research report 106-2.2/1, 2018 (in Russian).
- [9] Ob utverzhdenii skhemy i programmy razvitiya elektroenergetiki Rostovskoy oblasti na 2020-2024 gody [About the approval of the scheme and the program of perspec-

- tive development of power industry of the Rostov region for 2020 - 2024]. Approved by the Order of the Governor of the Rostov Region No. 91 dated Apr. 30, 2020. [Online]. Available at: <https://mtop.rk.gov.ru/ru/structure/764> [Accessed: Apr. 11, 2021] (in Russian).
- [10] P.P. Bezrukih and S.V. Gribkov, "XIII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konfe-renciya «Vozobnovlyaemaya i malaya energetika '2016» [XIII International Scientific and Practical Conference "Renewable and Small Energy '2016"]", *Plumbing, Heating, Air-Conditioning*, no. 7 (175), pp. 58-72, 2016 (in Russian).
- [11] *ETAP 19.0 User Guide*. Operation Technology, Inc., 2019.
- [12] Letopis' pogody [Chronicle of the weather]. [Online]. Available at: <http://www.pogodaiklimat.ru/history.php?id=ru®ion=82> [Accessed: Mar. 18, 2021] (in Russian).
- [13] Po sostoyaniyu na iyul' 2020 goda v Krymu gazificirovano 75% naselyonnyh punktov [As of July 2020, 75% of settlements were gasified in Crimea]. [Online]. Available at: <http://stroy-krim.org/encyclopedia/news/po-sostoyaniyu-na-iyul-2020-goda-v-krymu-gazificirovano-75-naselyonnyh-punktov> [Accessed: Mar. 15, 2021] (in Russian).
- [14] Truhina V., "Gazoprovod v Krym. «Krasnodarskiy kraj - Krym» - magistral'nyj gazopro-vod protyazhyonnost'yu 400 km [Gas pipeline to Crimea. "Krasnodar Territory - Crimea" - main gas pipeline with a length of 400 km]". [Online]. Available at: <https://fb.ru/article/293159/gazoprovod-v-kryim-krasnodarskiy-kraj---kryim---magistralnyiy-gazoprovod-protyaj-nnostyu-km> [Accessed: Mar. 15, 2021] (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Кузнецов Олег Николаевич, кандидат технических наук, доцент Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация

Аверьянов Данила Андреевич, аспирант, Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация

Oleg N. Kuznetsov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia

Danila A. Averyanov, postgraduate student, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia

УДК 621.3

DOI 10.46960/2658-6754_2021_3_75

МОДЕЛИРОВАНИЕ СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ СО ВСТРОЕННОЙ СЕТЬЮ ПОСТОЯННОГО ТОКА В СРЕДЕ MATLAB

О.А. Бурмакин

Волжский государственный университет водного транспорта
Нижний Новгород, Россия
e-mail: boa_71@mail.ru

В.В. Гуляев

Волжский государственный университет водного транспорта
Нижний Новгород, Россия
e-mail: eovt@mail.ru

Ю.С. Малышев

Волжский государственный университет водного транспорта
Нижний Новгород, Россия
e-mail: malyuriyserg@yandex.ru

С.В. Попов

Волжский государственный университет водного транспорта
Нижний Новгород, Россия
e-mail: popovsev3@yandex.ru

Рассмотрена целесообразность применения встроенной сети постоянного тока в судовых электроэнергетических системах при работе возобновляемых источников энергии. Предложена имитационная модель для исследования работы систем со встроенной сетью постоянного тока и возобновляемыми источниками энергии. Показана необходимость включения буферного накопителя в сеть постоянного тока для улучшения качества переходных процессов в динамических режимах работы.

Ключевые слова: буферный накопитель, встроенная сеть постоянного тока, судовая электростанция, электрическая система.

Для цитирования: Бурмакин, О.А. Моделирование судовой электростанции со встроенной сетью постоянного тока в среде MATLAB / О.А. Бурмакин, В.В. Гуляев, Ю.С. Малышев, С.В. Попов // Интеллектуальная электротехника. 2021. № 3. С. 75-84. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_3_75

SIMULATION OF SHIP POWER PLANT WITH BUILT-IN DC NETWORK IN MATLAB

O.A. Burmakin

Volga State University of Water Transport
Nizhny Novgorod, Russia
e-mail: boa_71@mail.ru

V.V. Gulyaev

Volga State University of Water Transport
Nizhny Novgorod, Russia
e-mail: eovt@mail.ru

Yu.S. Malyshev

Volga State University of Water Transport
Nizhny Novgorod, Russia
e-mail: malyuriyserg@yandex.ru

S.V. Popov

Volga State University of Water Transport
Nizhny Novgorod, Russia
e-mail: popovsev3@yandex.ru

Abstract. The article considers the feasibility of using the built-in continuous current network in ship electric power systems when operating renewable energy sources. A simulation model is proposed for studying the operation of systems with an integrated DC network and renewable energy sources. The necessity of including a buffer storage device in a DC network to improve the quality of transients in dynamic operating modes is shown.

Keywords: buffer storage, built-in DC network, electrical system, ship power plant.

For citation: O.A. Burmakin, V.V. Gulyaev, Y.S. Malyshev, S.V. Popov, “Simulation of ship power plant with built-in DC network in Matlab”, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 75-84, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_3_75

I. Введение

Идея применения возобновляемых источников электрической энергии на флоте не нова. В настоящее время развитие технологий дало новый импульс традиционной и альтернативной энергетике. Применительно к судам целесообразно рассматривать ветроустановки, солнечные электростанции и валогенераторные установки переменной частоты вращения.

В период постоянного роста цен на нефтепродукты солнце и ветер являются актуальными энергоносителями для получения электроэнергии. Главным преимуществом возобновляемых источников представляется неограниченный ресурс и экологичность [1]. Поэтому исследования комбинированных систем генерирования энергии в составе судовой электроэнергетической системы (СЭЭС) являются перспективными [2]. В такие СЭЭС, кроме традиционных источников, могут входить альтернативные: ветро-генераторы и солнечные батареи.

В каждом отдельном случае следует руководствоваться наличием соответствующих ресурсов. Анализ энергоресурсов по солнечной и ветровой энергии России, нагрузочных режимов работы СЭЭС (судовых электроэнергетических систем), а также возможности установки альтернативных источников в зависимости от типа судна показал:

- 1) возможность обеспечения энергией альтернативными источниками ходового режима на сухогрузах и танкерах, а также ходовой режим судна-толкача при установке источников на наливной барже;
- 2) целесообразность применения энергии ветра в северных и восточных районах, а энергии солнца – в южных;
- 3) целесообразность установки в качестве ветродвигателя спиральных ветровых турбин вследствие их большей производительности и лучших эксплуатационных показателей [3];
- 4) наибольшую перспективность для применения на судах солнечных батарей конической формы, в силу их большего КПД и возможности устанавливаться на надстройке [4];
- 5) возможность применения валогенераторных установок переменной частоты вращения не только в ходовом режиме, но и на маневрах;
- 6) возможность обеспечения стояночного режима большинства типов судов с помощью источников альтернативной энергии.

Однако объединение таких различных источников в единую судовую электростанцию является проблематичным, так как для обеспечения бесперебойности электроснабжения судовых потребителей необходимо организовывать параллельную работу источников с различными выходными параметрами генерируемой электроэнергии.

II. Встроенная сеть постоянного тока в системе генерирования электроэнергии

Решение указанной проблемы заключается в организации встроенной сети постоянного тока в системе генерирования электроэнергии [5, 6]. Функциональная схема такой комбинированной СЭЭС представлена на рис. 1.

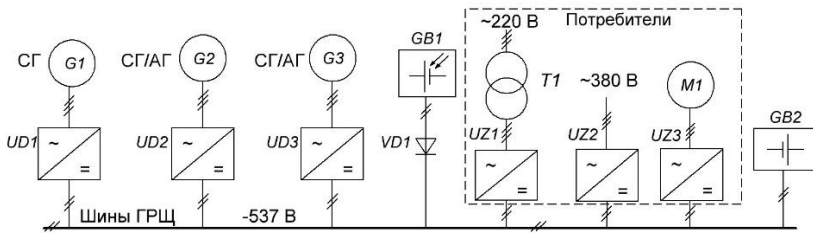


Рис. 1. Функциональная однолинейная схема

Fig. 1. Functional single-line scheme

Обозначения на рис. 1: $G1$ – синхронный дизель-генератор; $G2$ – синхронный или асинхронный ветрогенератор; $G3$ – синхронный или асинхронный валогенератор; $GB1$ – солнечная батарея; $GB2$ – аккумуляторная батарея; $UD1$ - $UD3$ выпрямители; $UZ1$, $UZ2$ – инверторы с постоянным значением частоты выходного напряжения; $UZ3$ – инвертор с регулируемым значением частоты выходного напряжения.

Задача поддержания постоянства напряжения и частоты на нагрузке решается за счет стабилизации величин напряжения в звене постоянного тока и выходной частоты инверторов.

Основные преимущества «встроенной» сети постоянного тока следующие [3]:

- возможности более рационального размещения электрооборудования;
- повышение эффективности работы приводных двигателей и снижение затрат на их обслуживание;
- улучшение динамических характеристик генераторных установок;
- возможности установки дополнительных альтернативных источников электроэнергии с включением на параллельную работу без выполнения процесса синхронизации;
- экономия топлива.

Для изучения особенностей режимов работы судовой электроэнергетической системы со встроенной сетью постоянного тока были проведены испытания на опытной установке, позволяющей выполнить параллельную работу различных источников через звено постоянного тока [4]. Разработанная установка позволила исследовать следующие режимы работы:

- ввод в параллельную работу, перевод нагрузки и вывод из работы одного из генераторов;
- распределение нагрузки между генераторами на базе синхронных и асинхронных машин.

Распределение нагрузки между синхронным и асинхронным генера-

торами, работающими через встроенную сеть постоянного тока, осуществлялось путем изменения тока возбуждения и скорости вращения соответственно.

III. Имитационная модель СЭЭС с возобновляемыми источниками электроэнергии

Для выявления дополнительных достоинств и недостатков при различных режимах, которые не может обеспечить опытная установка, была разработана имитационная модель СЭЭС с возобновляемыми источниками электроэнергии (рис. 2).

В модели использованы различные источники электроэнергии переменного тока, подключенные к сети постоянного тока через неуправляемые выпрямители, и источники постоянного тока, включенные непосредственно во встроенную сеть. Основным источником в модели является дизель-генератор, построенный на основе синхронной машины, остальные относятся к возобновляемым. Асинхронный генератор, подключенный на параллельную работу с СГ по звену постоянного тока, можно рассматривать как ветроэнергетическую или валогенераторную установку, так как закон изменения скорости вращения вала можно задавать. К встроенной сети постоянного тока включены: емкостной фильтр, солнечная батарея и буферный накопитель. Стабилизация напряжения и частоты генерируемой электроэнергии на нагрузке обеспечивается системой управления инвертором и системой поддержания напряжения в сети постоянного тока.

Имитационная модель позволяет исследовать работу перечисленных блоков в едином комплексе при изменении величины и характера нагрузки, при переводе нагрузки с одного источника на другой и т.д. Наличие буферного накопителя большой емкости приводит к улучшению качества переходных процессов при динамических режимах (рис. 3-5).

Из приведенных осциллограмм переходных процессов напряжения в сети постоянного тока видно, что при подключении на второй секунде нагрузки, вдвое превышающей номинальную мощность дизель-генератора, в цепь переменного тока, произошел провал напряжения в сети постоянного тока в связи с перегрузкой генератора. На четвертой секунде в звено постоянного тока подключается асинхронный генератор, что приводит к восстановлению напряжения (рис. 3).

Подобные провалы напряжения в сети могут возникать при пуске двигателей с потребляемой мощностью соизмеримой с мощностью генератора. Для исключения или уменьшения провала следует в звено постоянного тока подключить буферный накопитель в виде конденсатора большой емкости либо аккумуляторной батареи. Для оценки влияния буферного накопителя на параметры сети было проведено моделирование с подключением нагрузки той же величины.

постоянного тока (4 с) также не оказало значительного влияния на величину напряжения. Постоянство напряжения было достигнуто путем подбора емкости аккумуляторной батареи.

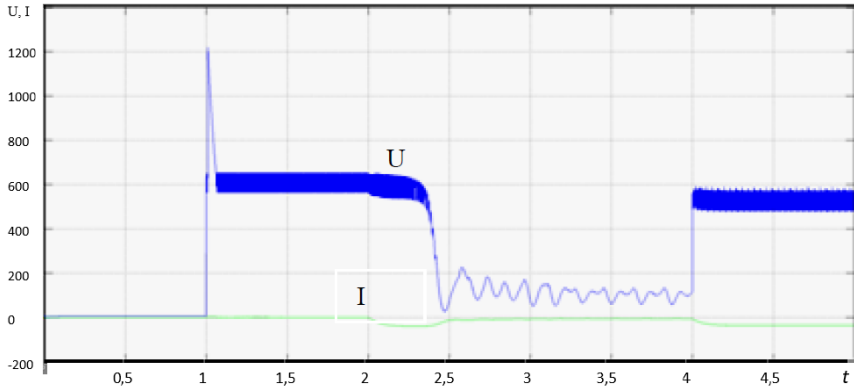


Рис. 3. Ток и напряжение в звене постоянного тока без буферного накопителя

Fig. 3. Current and voltage in the DC link without a buffer storage

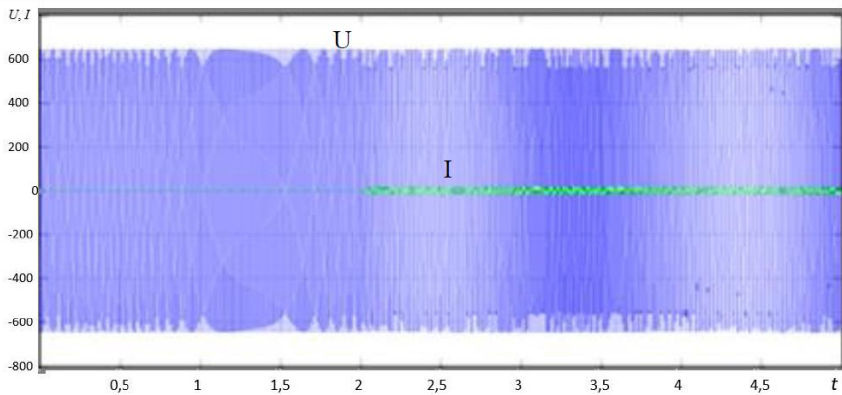


Рис. 4. Ток и напряжение синхронного генератора

Fig. 4. Current and voltage of the synchronous generator

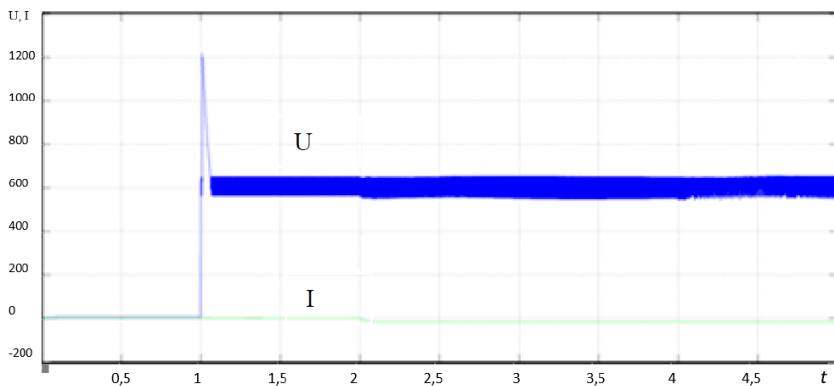


Рис. 5. Ток и напряжение в звене постоянного тока с буферным накопителем

Fig. 5. Current and voltage in a DC link with a buffer storage

IV. Заключение

Применение встроенной сети постоянного тока позволяет обеспечить длительную параллельную работу различных источников электроэнергии, а установка буферного накопителя достаточной емкости снижает влияние на сеть мощных потребителей.

Испытания показали возможность подключения источников электроэнергии, отличающихся по мощности, статизму и роду тока, без необходимости выполнения условий синхронизации и защиты от обратной мощности. Регулирование загрузки асинхронных генераторов изменением момента на валу приводного двигателя, осуществляется в диапазоне изменения частоты вращения менее 7 %, что приводит к экономии топлива. Важным достоинством подобных систем является более простая автоматизация и возможность подключения возобновляемых источников энергии.

© Бурмакин О.А., 2021

© Гуляев В.В., 2021

© Мальшев Ю.С., 2021

© Попов С.В., 2021

Поступила в редакцию 10.09.2021

Received 10.09.2021

Библиографический список

- [1] Бурмакин О.А., Малышев Ю.С., Варечкин Ю.В. Современные тенденции использования энергии ветра на судах // Труды 15-го Межд. науч.-пром. форума «Великие реки – 2013». Н. Новгород, Россия. 2013. Т. 2. С. 388-392.
- [2] Бурмакин О.А., Малышев Ю.С., Варечкин Ю.В. Возобновляемые источники энергии в судовой электроэнергетической системе // Вестник ВГАВТ. 2015. № 42. С. 263-268.
- [3] Hansen J.F., Lindtjørn J.O., Myklebust T.A., Vanska K. Onboard DC Grid. The newest design for marine power and propulsion systems // ABB review. 2012. No. 2. P. 28-33.
- [4] Бурмакин О.А., Малышев Ю.С., Попов С.В., Гуляев В.В. Исследование режимов работы судовой электроэнергетической системы двойного рода тока // Вестник Астраханского Государственного Технического Университета. Серия: Морская Техника и Технологии. 2019. № 1. С. 97-104.
DOI: 10.24143/2073-1574-2019-1-97-104
- [5] Бурмакин О.А., Малышев Ю.С. Комбинированная СЭЭС с применением возобновляемых источников энергии // Труды 16-го Межд. науч.-пром. форума «Великие реки - 2014». Н. Новгород, Россия. 2014. Т. 2. С. 199-202.
- [6] Иванчура В.И., Чубарь А.В., Пост С.С. Энергетические модели элементов автономных систем электропитания // Журнал Сибирского Федерального Университета. Серия: Техника и Технологии. 2012. Т. 5. № 2. С. 179-190.

References

- [1] O.A. Burmakin, Yu.S. Malyshev and Yu.V. Varechkin, "Sovremennye tendencii ispol'zovaniya energii vetra na sudah [Current trends in the use of wind energy on ships]", in proc. *15th Int. scient. and ind. forum "Velikie reki – 2013 [Great Rivers – 2013]"*, 2013, Nizhny Novgorod, Russia. Vol. 2, pp. 386-390 (in Russian).
- [2] O.A. Burmakin, Yu.S. Malyshev and Yu.V. Varechkin, "Renewable energy in ship electric power system", *Bulletin of VSAWT*, no. 42, pp. 263-268, 2015.
- [3] J.F. Hansen, J.O. Lindtjørn, T.A. Myklebust and K. Vanska, "Onboard DC Grid. The newest design for marine power and propulsion systems", *ABB review*, no. 2, pp. 28-33, 2012.
- [4] O.A. Burmakin, Yu.S. Malyshev, S.V. Popov and V.V. Gulyaev, "Analysis of the operation modes of the ship dual current system", *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*, no. 1, pp. 97-104, 2019. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-1-97-104
- [5] O.A. Burmakin and Yu.S. Malyshev, "Kombinirovannaya SEES s primeneniem vozobnovlyaemykh istochnikov energii [Combined marine electric power system with the use of renewable energy sources]", in proc. *16th Int. scient. and ind. forum "Velikie reki – 2014 [Great Rivers – 2014]"*, 2014, Nizhny Novgorod, Russia. Vol. 2, pp. 199-202 (in Russian).
- [6] V.I. Ivanchura, A.V. Chubar and S.S. Post, "Energy prototypes of units in autonomous power supply systems", *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technology*, vol. 5, no. 2, pp. 179-190, 2012.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

Бурмакин Олег Анатольевич, кандидат технических наук, доцент Волжского государственного университета водного транспорта, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Oleg A. Burmakin, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Гуляев Владимир Викторович, кандидат технических наук, доцент Волжского государственного университета водного транспорта, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Vladimir V. Gulyaev, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Мальшев Юрий Сергеевич, кандидат технических наук, доцент Волжского государственного университета водного транспорта, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Yuriy S. Malyshev, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Попов Сергей Васильевич, кандидат технических наук, доцент Волжского государственного университета водного транспорта, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Sergey V. Popov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation

УДК 628.931

DOI 10.46960/2658-6754_2021_3_85

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМ ОСВЕЩЕНИЯ РАСТЕНИЙ ДЛЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ФЕРМ С ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫМ ТАРИФОМ НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ

Д.А. Филатов

Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия
Нижний Новгород, Россия
e-mail: filatov230188@mail.ru

П.В. Терентьев

Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия
Нижний Новгород, Россия
e-mail: terentyevpv@inbox.ru

А.С. Полумордвинов

Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия
Нижний Новгород, Россия
e-mail: dekanat-312@yandex.ru

В настоящее время наиболее перспективными технологическими системами для выращивания растений в мире являются вертикальные фермы с контролируемой средой. Импульсом для их развития стало применение светодиодного освещения в светокультуре. Вертикальные фермы могут сделать производство продуктов питания эффективным и устойчивым. Получать урожай возможно круглый год без перебоев из-за изменения климата, сезона или неблагоприятных природных событий. Закрытые вертикальные фермы с контролируемой средой обеспечивают в 4-6 раз большую урожайность на единицу площади по сравнению с традиционными теплицами и требуют меньше воды при орошении растений. Однако технология вертикальных ферм требует в несколько раз большего количества энергии. В статье рассматриваются режимы работы систем освещения растений для вертикальных ферм при использовании дифференцированного тарифа с позиции экономической эффективности.

Ключевые слова: системы освещения растений, вертикальные фермы, дифференцированный тариф.

Для цитирования: Филатов, Д.А. Исследование режимов работы систем освещения растений для вертикальных ферм с дифференцированным тарифом на электроэнергию / Д.А. Филатов, П.В. Терентьев, А.С. Полумордвинов // Интеллектуальная электротехника. 2021. № 3. С. 85-94. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_3_85

STUDY OF OPERATING MODES OF PLANT LIGHTING SYSTEMS FOR VERTICAL FARMS WITH DIFFERENTIATED ELECTRICITY TARIFF

D.A. Filatov

Nizhny Novgorod State Agricultural Academy
Nizhny Novgorod, Russia
e-mail: filatov230188@mail.ru

P.V. Terentyev

Nizhny Novgorod State Agricultural Academy
Nizhny Novgorod, Russia
e-mail: terentyevpv@inbox.ru

A.S. Polumordvinov

Nizhny Novgorod State Agricultural Academy
Nizhny Novgorod, Russia
e-mail: dekanat-312@yandex.ru

Abstract. Currently, the most promising technological systems for growing plants in the world are vertical farms with a controlled environment. The impetus for their development was the use of LED-one lighting in photoculture. Vertical farms can make food production efficient and sustainable. It is possible to get a crop all year round without interruption due to climate change, season or adverse natural events. Indoor vertical farms with a controlled environment provide 4-6 times higher yields per unit area than traditional greenhouses and require less water when irrigating plants. However, vertical truss technology requires several times more energy. The article discusses the modes of operation of plant lighting systems for vertical farms when using a differentiated tariff from the standpoint of economic efficiency.

Keywords: plant lighting systems, vertical farms, differentiated tariff.

For citation: D.A. Filatov, P.V. Terentyev and A.S. Polumordvinov, "Study of operating modes of plant lighting systems for vertical farms with differentiated electricity tariff, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 85-94, 2021.

DOI: [10.46960/2658-6754_2021_3_85](https://doi.org/10.46960/2658-6754_2021_3_85)

I. Введение

Одной из ключевых проблем продолжающейся урбанизации во всем мире является транспортировка большого количества еды для обслуживания широких масс населения. Одним из решений является модель вертикальной фермы [1]. Данная технология нацелена на активное ее участие в продовольственной безопасности для постоянно растущего городского населения [2, 3]. Под вертикальными фермами понимают отдельные зда-

ния или сооружения на крышах старых и новых зданий с несколькими уровнями грядок с искусственным освещением [4, 5]. Данные фермы небольшого размера возникают по всему миру; многие города внедряют эту модель в новые и старые здания, в том числе, в склады, которые собственники перепрофилировали под сельскохозяйственную деятельность. Вертикальные фермы могут сделать производство продуктов питания эффективным и устойчивым. Получать урожай можно круглый год без перебоев из-за изменения климата, сезона или неблагоприятных природных событий (засуха или наводнение). Закрытые вертикальные фермы с контролируемой средой обеспечивают в 4-6 раз большую урожайность на единицу площади по сравнению с традиционными теплицами [6, 7] и требуют меньше воды при орошении растений [8]. В то же время технология вертикальных ферм требует в несколько раз большего количества энергии [9].

Наиболее эффективными источниками света являются светодиоды. Преимуществами светодиодных облучателей по сравнению с другими искусственными источниками света для использования в светокультуре являются возможность формирования более эффективного спектра излучения [10], гибкое управление [110], низкая зависимость электрических характеристик от отклонения питающего напряжения [12]. Важным параметром для эффективности вертикальных ферм является режим работы системы освещения.

Проведен анализ литературы по режимам работы систем освещения. В [13] установлено, что вес свежих листьев и корней собранного салата был выше при фотопериоде 16 ч/день в сравнении с фотопериодом 14 ч/день независимо от качества света. В [140] исследовались эффекты фотопериода (12, 15, 18 ч/день) при взаимодействии с концентрацией питательного раствора. Наибольшее количество листьев и масса растений были обнаружены у салата-латука при фотопериоде 18 ч/день. Однако уменьшение фотопериода способствовало снижению содержания нитратов и увеличению свободных аминокислот, растворимого белка и витамина С. В [150] исследовалось влияние фотопериода (12, 16, 18, 24 ч/день) на зеленом и красном салате. Наибольшая сырая масса получена при фотопериоде 16 ч/сутки как для красного, так и для зеленого салата. Недостаточное количество света привело к замедлению роста и заметному повышению содержания нитратов и нитритов у обоих сортов. В [16] увеличение времени облучения с 16 до 24 ч/сутки не привело к увеличению урожая микрозелени. На основании проведенного анализа можно говорить, что наиболее эффективным является фотопериод 16 ч/сутки.

В [140] исследовалось влияние света, обеспечиваемого различной интенсивностью света в сочетании с разными фотопериодами, на рост и морфогенез салата-латука (*Lactuca sativa L.*) в системе заводов закрытого типа. Рассматривались три разных фотопериода: 18/6 (1 цикл), 9/3 (2 цик-

ла) или 6/2 (3 цикла) (свет / темнота). Фотопериод 9/3 при световом потоке $290 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ показал наибольшую высоту растений и массу свежих побегов. В [18] сравнивались несколько вариантов работы системы освещения в режиме свет/темнота (16/8 один цикл (контроль), 8/4 – два цикла, 6/3 и 4/2 – три цикла, 4/2 – четыре цикла, 3/ 1,5 или 1/0,5 – шесть циклов, 2/1 – восемь циклов) для облучения салата. Вариант 8/4 увеличил сырую биомассу на 5,8 %, вариант 4/2 на 15,8 % по сравнению с контролем. Таким образом, периодическое освещение с четным количеством циклов может быть лучше непрерывного освещения.

Проанализированные исследования не рассматривают вопрос конкретных часов работы системы освещения в течение суток (утром, днем или ночью). Уточнение часов работы может позволить снизить затраты на потребляемую электроэнергию поскольку в разное время суток разная цена на электроэнергию.

Цель настоящего исследования – определение наиболее эффективного режима работы системы освещения при дифференцированном тарифе на электроэнергию в вертикальных фермах с контролируемой средой.

II. Материалы и методы

Для исследований использовалась вторая ценовая категория (II) для объемов покупки электрической энергии (мощности), учет которых осуществляется по зонам суток расчетного периода. Расчетный период включает три зоны суток. Расчетный период по трем зонам суток включает ночной период (23.00-7.00), полупиковый период (10.00-17.00 и 21.00-23.00), пиковый период (7.00-10.00 и 17.00-21.00). Затраты на электроэнергию по трем зонам суток определяются по выражению:

$$C_{II-II} = W_1 \cdot T_1 + W_2 \cdot T_2 + W_3 \cdot T_3 \quad (1)$$

где W_1, W_2, W_3 – объем потребленной электроэнергии за ночной, полупиковый и пиковый период, кВт·ч; T_1, T_2, T_3 – тариф (цена) на электроэнергию в ночной, полупиковый, пиковый период соответственно, руб. /кВт·ч.

Для расчетов использованы предельные уровни цен на электрическую энергию (мощность), поставляемую ПАО «ТНС энерго НН» потребителям с максимальной мощностью энергопринимающих устройств менее 670 кВт. Для упрощения расчетов принята мощность фермы 1 кВт, поскольку результаты можно масштабировать без их искажения.

III. Результаты и обсуждение

Наиболее эффективные режимы определялись для двух вариантов работы систем освещения. Первый вариант – непрерывный режим свет/темнота 16/8-часовой, второй прерывистый режим – 8/4-часовой (2 периода в сутки).

Для определения режима с самыми низкими затратами на электроэнергию каждый из них был рассмотрен в 24 возможных вариациях со смещением на один час, и была рассчитана конечная стоимость электроэнергии в сутки.

16/8-часовой режим освещения. В данном режиме растения непрерывно облучаются на протяжении 16 часов, затем идет 8-часовой перерыв. График с суточными затратами на электроэнергию представлен на рис. 1.

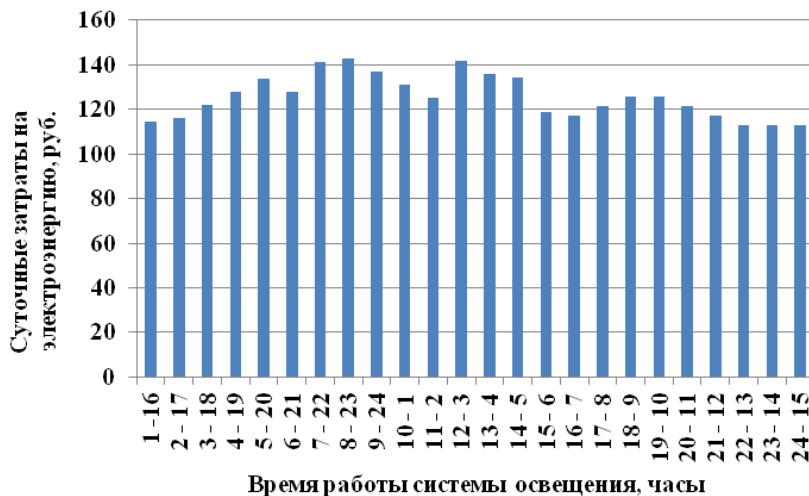


Рис. 1. Суточные затраты на электроэнергию при 16/8-часовом режиме освещения (1 период)

Fig. 1. Daily energy costs at 16/8 hours of lighting (1 period)

Из рис. 1 видно, что наиболее экономичными являются три последних режима, где освещение производится с 22⁰⁰ до 13⁰⁰ или с 23⁰⁰ до 14⁰⁰, или с 24⁰⁰ до 15⁰⁰.

8/4-часовой режим освещения (2 периода в сутки). При использовании данного режима растения облучаются в течение 8 часов, затем 4-часовой перерыв, затем снова облучаются на протяжении 8 часов, после идет 4-часовой перерыв. За сутки проходит 2 периода освещения. График с суточными затратами на электроэнергию представлен на рис. 2.

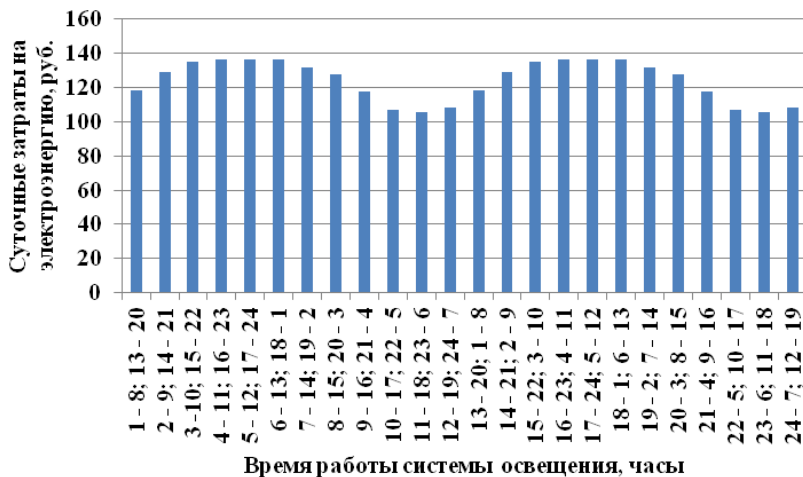


Рис. 2. Суточные затраты на электроэнергию при 8/4-часовом режиме освещения (2 периода)

Fig. 2. Daily energy costs at 8/4 hours of lighting (2 periods)

Из рис. 2 видно, что самым экономичным вариантом является режим, где освещение проводится с 23⁰⁰ до 6⁰⁰, затем с 11⁰⁰ до 18⁰⁰. Суточные затраты на электроэнергию в данном режиме составляют 105 руб. 63 коп. Данный период считаем контрольным. Режим с освещением с 11⁰⁰ до 18⁰⁰ и с 23⁰⁰ до 6⁰⁰ по стоимости электроэнергии оказался равным контрольному.

IV. Выводы

Проведенные исследования позволили определить наиболее эффективные режимы работы систем освещения растений для вертикальных ферм с дифференцированным тарифом на электроэнергию (на примере Нижегородской области Российской Федерации). Для непрерывного режима работы в течение 16 часов в сутки наиболее экономичными являются режимы 22⁰⁰-13⁰⁰ или 23⁰⁰-14⁰⁰ или 24⁰⁰-15⁰⁰. Для прерывистого режима свет/темнота 8/4 часа в сутки самым экономичным вариантом является режим 23⁰⁰-6⁰⁰, затем 11⁰⁰-18⁰⁰.

© Филатов Д.А., 2021

© Терентьев П.В., 2021

© Полумордвинов А.С. 2021

Поступила в редакцию 01.09.2021

Received 01.09.2021

Библиографический список

- [1] Al-Kodmany K. The vertical farm: A review of developments and implications for the vertical city // *Buildings*. 2018. № 8 (2). P. 24. DOI: 10.3390/buildings8020024
- [2] Thomaier S., Specht K., Henckel D., Dierich A., Siebert R., Freisinger U., Sawicka M. Farming in and on urban buildings: Present practice and specific novelties of zero-acreage farming (ZFarming) // *Renewable Agriculture and Food Systems*. 2015. № 30 (1). P. 43–54. DOI:10.1017/S1742170514000143
- [3] Despommier D. Farming up the city: The rise of urban vertical farms // *Trends in Biotechnology*. 2013. № 31 (7). P. 388–389. DOI: 10.1016/j.tibtech.2013.03.008
- [4] Toulaiatos D., Dodd I.C., McAinsh M. Vertical farming increases lettuce yield per unit area compared to conventional horizontal hydroponics // *Food and Energy Security*. 2016. № 5 (3). P. 184–191. DOI: 10.1002/fes3.83
- [5] Muller A., Ferré M., Engel S., Gattinger A., Holzkämper A., Huber R., Müller M., Six J. Can soil-less crop production be a sustainable option for soil conservation and future agriculture? // *Land Use Policy*. 2017. № 69 (3). P. 102–105. DOI: 10.1016/j.landusepol.2017.09.014
- [6] Abel C. The vertical garden city: Towards a new urban topology // *CTBUH Journal*. 2010. № 2. P. 20–30.
- [7] Eigenbrod C., Gruda N. Urban vegetable for food security in cities. A review // *Agronomy for Sustainable Development*. 2015. № 35. P. 483–498. DOI: 10.1007/s13593-014-0273-y
- [8] Saffikhani T., Abdullah A.M., Ossen D.R., Baharvand M. A review of energy characteristic of vertical greenery systems // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. № 40. P. 450–462. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.166
- [9] Barbosa G.L., Gadelha F.D.A., Kublik N., Proctor A., Reichelm L., Weissinger E., Wohlleb G.M., Halden, R.U. Comparison of land, water, and energy requirements of lettuce grown using hydroponic vs. conventional agricultural methods // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2015. № 12 (6). P. 6879–6891. DOI: 10.3390/ijerph120606879
- [10] Кондратьева Н.П., Филатов Д.А., Терентьев П.В., Аль-Хелю А.С. Сравнительная оценка основных характеристик натриевых и светодиодных тепличных облучателей // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. № 1. С. 50–54. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-1-50-54
- [11] Kondratieva N.P., Filatov D.A., Terentiev P.V. Study of operating modes of a controllable lighting system consisting of a triak dimmer and a LED light source with a controllable driver // *Light & Engineering*. 2020. Vol. 28. № 4. P. 84–90. DOI: 10.33383/2019-083
- [12] Kondratieva N.P., Filatov D.A., Terentiev P.V. Dependence of current harmonics of greenhouse irradiators on supply voltage // *Light & Engineering*. 2020. Vol. 28. № 2. P. 85–88. DOI: 10.33383/2019-024
- [13] Yan Z., He D., Niu G., Zhai H. Evaluation of growth and quality of hydroponic lettuce at harvest as affected by the light intensity, photoperiod and light quality at seedling stage // *Scientia Horticulturae*. 2019. T. 248. P. 138–144. DOI: 10.1016/j.scienta.2019.01.002

- [14] Song J., Huang H., Song S., Zhang Y., Su W., Liu H. Effects of photoperiod interacted with nutrient solution concentration on nutritional quality and antioxidant and mineral content in lettuce // *Agronomy*. 2020. № 10 (7). P. 920. DOI: 10.3390/agronomy10070920
- [15] Viršilė A., Brazaitytė A., Vaštakaitė- Kairienė V., Miliauskienė J., Jankauskienė J., Novičkovas A., Samuolienė G. Lighting intensity and photoperiod serves tailoring nitrate assimilation indices in red and green baby leaf lettuce // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2019. № 99. P. 6608–6619. DOI: 10.1002/jsfa.9948
- [16] Kong Y., Kamath D., Zheng Y. Blue versus red light can promote elongation growth independent of photoperiod: A study in four brassica microgreens species // *HortScience*. 2019. № 54 (11). P. 1955–1961. DOI: 10.21273/HORTSCI14286-19
- [17] Kang J.H., Kumar S.K., Sua Atulba S.L., Jeong B.R., Hwang S.J. Light intensity and photoperiod influence the growth and development of hydroponically grown leaf lettuce in a closed-type plant factory system // *Horticulture, Environment and Biotechnology*. 2013. № 54 (6). P. 501–509. DOI: 10.1007/s13580-013-0109-8
- [18] Chen X., Yang, Q. Effects of intermittent light exposure with red and blue light emitting diodes on growth and carbohydrate accumulation of lettuce // *Scientia Horticulturae*. 2018. № 234. P. 220–226. DOI: 10.1016/j.scienta.2018.02.055

References

- [1] K. Al-Kodmany, “The vertical farm: A review of developments and implications for the vertical city”, *Buildings*, no. 8 (2), p. 24, Feb. 2018. DOI: 10.3390/buildings8020024
- [2] S. Thomaier, K. Specht, D. Henckel, A. Dierich, R. Siebert, U. Freisinger and M. Sawicka, “Farming in and on urban buildings: present practice and specific novelities of zero-acreage farming (ZFarming)”, *Renewable Agriculture and Food Systems*, no. 30 (1), pp. 43–54, 2015. DOI:10.1017/S1742170514000143
- [3] D. Despommier, “Farming up the city: The rise of urban vertical farms”, *Trends in Biotechnology*, vol. 31, no. 7, pp. 388–389, June 2013. DOI: 10.1016/j.tibtech.2013.03.008
- [4] D. Toulaitos, I.C. Dodd and M. McAinsh, “Vertical farming increases lettuce yield per unit area compared to conventional horizontal hydroponics”, *Food and Energy Security*, no. 5 (3), pp. 184–191, June 2016. DOI: 10.1002/fes3.83
- [5] A. Muller, M. Ferré, S. Engel, A. Gattinger, A. Holzkämper, R. Huber, M. Müller and J. Six, “Can soil-less crop production be a sustainable option for soil conservation and future agriculture?”, *Land Use Policy*, vol. 69, no. 3, pp. 102–105, Dec. 2017. DOI: 10.1016/j.landusepol.2017.09.014
- [6] C. Abel, “The vertical garden city: Towards a new urban topology”, *CTBUH Journal*, no. 2, pp. 20–30, 2010.
- [7] C. Eigenbrod and N. Gruda, “Urban vegetable for food security in cities. A review”, *Agronomy for Sustainable Development*, no. 35, pp. 483–498, 2015. DOI: 10.1007/s13593-014-0273-y
- [8] T. Safikhani, A.M. Abdullah, D.R. Ossen, M. Baharvand, “A review of energy characteristic of vertical greenery systems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 40, pp. 450–462, Dec. 2014. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.166

- [9] G.L. Barbosa, F.D.A. Gadelha, N. Kublik, A. Proctor, L. Reichelm, E. Weissinger, G.M. Wohlleb and R.U. Halden, "Comparison of land, water, and energy requirements of lettuce grown using hydroponic vs. conventional agricultural methods", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, no. 12 (6), pp. 6879–6891, June 2015. DOI: 10.3390/ijerph120606879
- [10] N.P. Kondratieva, D.A. Filatov, P.V. Terentyev and A.S. Al-Helu, "Comparative assessment of sodium and led greenhouse irradiators main characteristics", *Agricultural Machinery and Technologies*, vol. 14, no.1, pp. 50-54, 2020. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-1-50-54
- [11] N.P. Kondratieva, D.A. Filatov and P.V. Terentiev, "Study of operating modes of a controllable lighting system consisting of a triak dimmer and a LED light source with a controllable driver", *Light & Engineering*, vol. 28, no. 4, pp. 84–90, 2020. DOI: 10.33383/2019-083
- [12] N.P. Kondratieva, D.A. Filatov and P.V. Terentiev, "Dependence of current harmonics of greenhouse irradiators on supply voltage", *Light & Engineering*, vol. 28, no. 2, pp. 85–88, 2020. DOI: 10.33383/2019-024
- [13] Z. Yan, D. He, G. Niu and H. Zhai, "Evaluation of growth and quality of hydroponic lettuce at harvest as affected by the light intensity, photoperiod and light quality at seedling stage", *Scientia Horticulturae*, vol. 248, pp. 138–144, Apr. 2019. DOI: 10.1016/j.scienta.2019.01.002
- [14] J. Song, H. Huang, S. Song, Y. Zhang, W. Su and H. Liu, "Effects of photoperiod interacted with nutrient solution concentration on nutritional quality and antioxidant and mineral content in lettuce", *Agronomy*, no. 10 (7), p. 920, June 2020. DOI: 10.3390/agronomy10070920
- [15] A. Viršilė, A. Brazaitytė, V. Vaštakaitė- Kairienė, J. Miliauskienė, J. Jankauskienė, A. Novičkovas and G. Samuolienė, "Lighting intensity and photoperiod serves tailoring nitrate assimilation indices in red and green baby leaf lettuce", *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 99 (14), pp. 6608-6619, July 2019. DOI:10.1002/jsfa.9948
- [16] Y. Kong, D. Kamath, and Y. Zheng, "Blue versus red light can promote elongation growth independent of photoperiod: A study in fourbrassica microgreens species", *HortScience*, vol. 54 (11), pp. 1955–1961, Nov. 2019. DOI: 10.21273/HORTSCI14286-19
- [17] J.H. Kang, S.K. Kumar, S.L. Sua Atulba, B.R. Jeong and S.J. Hwang, "Light intensity and photoperiod influence the growth and development of hydroponically grown leaf lettuce in a closed-type plant factory system", *Horticulture, Environment and Biotechnology*, vol. 54 (6), pp. 501-509, Dec. 2013. DOI: 10.1007/s13580-013-0109-8
- [18] X. Chen and Q. Yang, "Effects of intermittent light exposure with red and blue light emitting diodes on growth and carbohydrate accumulation of lettuce", *Scientia Horticulturae*, no. 234, pp. 220–226, Apr. 2018. DOI: 10.1016/j.scienta.2018.02.055

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

Филатов Дмитрий Алексеевич, кандидат технических наук, доцент Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Dmitriy A. Filatov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Терентьев Павел Валерьевич, кандидат технических наук, доцент Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Pavel V. Terentyev, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Полумордвинов Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Alexander S. Polumordvinov, master of the Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, Nizhny Novgorod, Russian Federation

УДК 004.946

DOI 10.46960/2658-6754_2021_3_95

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФОРМАТОВ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ ПРИ ПОДГОТОВКЕ КАДРОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ ПОСРЕДСТВОМ ИМИТАЦИОННОГО КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Е.Л. Рыжова

Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I
Санкт-Петербург, Россия

ORCID: 0000-0001-7984-2558 e-mail: elena-astanovskaja@rambler.ru

Показаны возможности использования технологий дополненной и виртуальной реальности при подготовке кадров по электротехническим специальностям. Технологии дополненной и виртуальной реальности в сочетании с традиционными методами обучения в сфере образования позволяют предоставить обучающимся непосредственный, а не теоретический опыт, уменьшая влияние искажений, мешающих восприятию информации. Цель исследования – обосновать реализацию мероприятий по внедрению интеграции технологий дополненной и виртуальной реальности при подготовке кадров по электротехническим специальностям, показать важность вопроса инноваций в коммуникации и использования инновационных технических средств, позволяющих наиболее эффективно передавать информацию целевой группе, привлекая внимание и получая обратную связь. Определены основные закономерности и отмечены наиболее важные меры по использованию новейших технических устройств, программного обеспечения и технологий, с помощью которых осуществляется инновационная коммуникация при помощи имитационного компьютерного моделирования компонентов электротехнических комплексов и систем. Применение технологий дополненной и виртуальной реальности как средства инновационной коммуникации с использованием имитационного компьютерного моделирования компонентов электротехнических комплексов и систем предполагает широкий спектр коммуникативных приемов и методов, что позволяет говорить о больших возможностях взаимодействия обучающихся с помощью этих технологий.

Ключевые слова: виртуальная реальность, иммерсивное обучение, имитационное компьютерное моделирование, инновационные коммуникации, информационные технологии, подготовка специалистов, VR-технологии.

Для цитирования: Рыжова, Е.Л. Использование форматов виртуальной реальности при подготовке кадров для электроэнергетической отрасли посредством имитационного компьютерного моделирования // Интеллектуальная электротехника. 2021. № 3. С. 95-106. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_3_95

THE USE OF VIRTUAL REALITY FORMATS IN TRAINING OF PERSONNEL FOR ELECTRIC POWER INDUSTRY THROUGH COMPUTER SIMULATION

E.L. Ryzhova

Petersburg state University of Railways of Emperor Alexander I
Saint Petersburg, Russian Federation

ORCID: 0000-0001-7984-2558 e-mail: elena-astanovskaja@rambler.ru

Abstract. For employees in the electric power industry, a technical mindset is necessary in order to conduct multi-stage mathematical calculations and analyze graphic materials in the form of diagrams and graphs. The qualification of engineers who manage technological processes directly affects the safety of production and cannot completely exclude the human factor. The augmented reality technology allows minimizing or eliminating the influence of the human factor. This article shows the possibilities of using augmented and virtual reality technologies in training of personnel in electrical engineering. Augmented and virtual reality technologies, combined with traditional teaching methods in education, can provide students with a direct, rather than theoretical experience, reducing the impact of distortions that interfere with the perception of information, and explaining phenomena and objects that are difficult to understand. The aim of the study is to justify the implementation of measures to introduce the integration of augmented and virtual reality technologies in the training of personnel in electrical engineering, to show the importance of the issue of innovations in communication and the use of innovative technical means that allow the most effective transmission of information to the target group, attracting attention and receiving feedback. The main regularities are determined and the most important measures for the use of the latest technical devices, software and technologies are identified, with the help of which innovative communication is carried out using simulation computer modeling of components of electrical complexes and systems. The use of augmented and virtual reality technologies as a means of innovative communication with the use of computer simulation of components of electrical complexes and systems involves a wide range of communication techniques and methods, which makes it possible to talk about great opportunities for student interaction with the help of these technologies.

Keywords: computer simulation, immersive learning, information technologies, innovative communications, training of specialists, virtual reality, VR technologies.

For citation: Ryzhova E.L. “The use of virtual reality formats in training of personnel for electric power industry through computer simulation”, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 95-106, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_3_95

I. Введение

Как показывают исследования, творческий характер труда в условиях современного производства проявляется в наибольшей мере в электротехнической промышленности, в том числе, в областях, связанных с про-

ектированием электротехнических комплексов и систем, а также силовой электроники. Внедрение в производство новых орудий труда, расширение и ввод новых средств механизации и автоматизации производства требуют высокой электротехнической вооруженности. Насыщение производства сложной техникой, внедрение новой технологии труда без повышения технического уровня специалистов, обслуживающих эту технику, не будут достаточно эффективны. Поэтому важное значение приобретает развитие творческой активности обучающихся, в частности, электротехнического профиля. Необходимо совершенствование форм и методов преподавания, которые должны быть направлены на развитие творческого мышления студентов, выработку у них умения практически использовать знания, полученные в процессе обучения. Выпускники вузов оказываются неспособными к инновациям в силу следующих проблем:

- в большинстве случаев у студентов отсутствует возможность индивидуализировать свое образовательное направление;
- значительная часть применяющихся в обучении технологий оказывается устаревшими по сравнению с теми, которые выпускник вуза видит на рынке.

Особое место в разработке отдельных вопросов методики преподавания электротехники занимают исследования по анализу опыта внедрения в процесс обучения технологий виртуальной реальности (*virtual reality* – *VR*). Представляется целесообразным в процессе подготовки кадров для электроэнергетической отрасли моделировать обучающимся ситуации, сопряженные с самостоятельным изучением некоторых вопросов дисциплины с последующим разбором и анализом полученной информации. Предполагается, что применение *VR*-технологий при формировании системы электротехнических знаний и умений наиболее интенсивно воздействует на творческую активность студентов, развитие способности к анализу, обобщению, синтезу электротехнических навыков с процессуальной стороной их получения. Для решения задачи перехода на инновационные механизмы современный инженер должен обладать широтой профессионального кругозора; для этого студенты должны не только знать новейшие мировые тенденции в своей профессиональной сфере, но и учиться находить применение им в своей будущей профессиональной деятельности [1].

В настоящее время большинство *AR* (*augmented reality* – дополненная реальность) и *VR* используются для создания графических презентаций без сложных информационных компонентов. Тем не менее, есть очень качественные технические решения – программное обеспечение, технические устройства, реализующие технологии дополненной и виртуальной реальности. Эксперты в области *VR*-технологий дают положительный прогноз развития технологий дополненной и виртуальной реальности в целом,

а также все более широкого их использования в сфере подготовки специалистов по электроэнергетическим специальностям [2].

II. Материалы и методы

Технологии виртуальной реальности (технологии VR) – это компьютерная система, используемая для создания искусственного мира, пользователь которого чувствует себя как в реальном мире, может в нем управлять и манипулировать его объектами [3]. Сама концепция дополненной реальности довольно проста и понятна. В очках виртуальной реальности проецируется подробная и запрограммированная реальность, внутри которой объекты подчиняются всем существующим законам физики [4, 5]. Самым впечатляющим результатом новых информационных технологий является способность человека, попавшего в виртуальный мир, действовать независимо – участвовать в действии не только в обычном пространстве, но и в совершенно реальном мире с точки зрения взгляда на человеческое восприятие.

Большинство «инновационных» современных учебных материалов и пособий не имеют визуальных улучшений или интерактивных функций, что заставляет учащихся скучать. Если при этом преподаватель не может интересно и необычно преподнести материал, обучающимся сложно погрузиться в учебный процесс: они не воспринимают информацию или не хотят чему-либо учиться. В зависимости от особенностей восприятия одним обучающимся привычнее и проще воспринимать текст «с листа». Тем, кому легче усваивать мультимедийный формат, технологии VR помогут сделать образовательный процесс действительно самым интересным и возбуждающим [6, 7].

Было предпринято множество попыток разработать различные учебные пособия и средства в сфере образования, с помощью которых человек мог получить представление о псевдореальности определенной искусственно созданной среды, в том числе, в сфере подготовки кадров для электроэнергетической отрасли – различные тренажеры для решения конкретных практических задач. Благодаря этим новым средствам обучения, эффективность подготовки специалистов техобслуживания электротехники и электроники различного уровня сложности повысилась, и, таким образом, тренажеры получили признание и доказали свою эффективность. При этом были выявлены и недостатки применения тренажеров, а именно: высокая стоимость оборудования тренажера и его большие габариты, необходимость постоянного контроля работоспособности программы и сопряженного оборудования, невозможность получения максимального эффекта имитации процессов при их моделировании [8, 9].

При анализе существующих форм подготовки специалистов, обслуживающих новейшие модели электрооборудования и имитирующих различные процессы и практические задачи, были выявлены причины ак-

тивного внедрения новых инновационных коммуникаций с использованием технологий дополненной и виртуальной реальности: усиление конкуренции, снижение эффективности традиционных технологий, коммуникативных методов, избирательное восприятие информационных сообщений целевыми группами [10]. В целях повышения эффективности обучения VR-технологии используются в программах современных информационных технологий иммерсивного обучения (*immersive education*), в которых процесс обучения происходит в виртуальных мирах и симуляторах.

Отметим следующие преимущества иммерсивного подхода.

1. Обучающийся не смотрит на изображение на экране, находясь в виртуальном пространстве, а непосредственно присутствует в VR.
2. То, что нельзя или чрезвычайно сложно отследить в реальном мире: объекты и процессы, виртуальное пространство делает возможным детально изучить.
3. Человек может полностью сосредоточиться на материале и лучше его усвоить, так как в виртуальном мире он практически не подвержен влиянию внешних раздражителей.
4. Сценарий процесса обучения в виртуальной реальности можно программировать и контролировать с высокой точностью, оттачивая навыки, экспериментируя без риска навредить себе и другим.

Для реализации данного проекта и проверки эффективности и целесообразности внедрения VR-технологий в сфере образования кадров для электроэнергетической отрасли была сформирована группа лиц, которая приняла участие в испытании данной программы на всех стадиях ее разработки: обучающиеся, а также специалисты разных сфер деятельности: психологи, программисты, визуализаторы. Компании-разработчики экспериментальных курсов провели опрос среди обучающихся, которым предлагалось ответить на ряд вопросов: определение степени ознакомления с учебными материалами, представленными с использованием технологии VR; отношение к обучению в формате виртуальной реальности; перечислите дисциплин, по которым предпочитают изучать предметы с использованием виртуальной реальности. Опрос показал следующие результаты: только 9,2 % респондентов испытывали трудности с усвоением материала с помощью VR-технологий; 98,5 % респондентов выразили желание продолжить процесс обучения в формате виртуальной реальности, при этом большинство из них предпочли технические науки в качестве дисциплин. Поэтому можно утверждать, что по результатам уже проведенных экспериментов эффективность обучения с использованием VR как минимум на 10 % выше, чем классический формат на тренажерах-имитаторах [11, 12].

III. Результаты исследования

Применение VR-технологий в сфере подготовки кадров для электроэнергетической отрасли позволяет полностью погрузиться в мир любой темы, помогая сосредоточиться на ее изучении с помощью элементов трехмерной визуализации и геймификации. Теория становится ясной, понятной и намного более интересной, что дополнительно способствует повышению вовлеченности и интереса к предмету, что является действенной мотивацией к обучению и кардинально меняет представление об образовательном процессе и повышает его эффективность. Основные достоинства применения VR-технологий при обучении:

- с помощью трехмерной графики можно подробно показать процессы, когда виртуальная реальность способна не только предоставить информацию о самом явлении, но и наглядно представить его с разным уровнем детализации;
- контроль управления скоростного поезда, операции на сердце, меры безопасности при выполнении особо опасной работы - вы можете погрузить обучающегося в любое из этих обстоятельств без малейшей угрозы его жизни;
- VR-технологии позволяют вовлечь учащегося в эксперимент или решить задачу в понятной форме, повлиять на их результат, полностью сосредоточиться на материале, ощущая свое присутствие в виртуальном мире, не отвлекаясь на внешние раздражители [13].

Внедрение новых инновационных инструментов коммуникации в сфере подготовки кадров для электроэнергетической отрасли предполагает, что формат обучения остается классическим. Лекция является основным элементом в структуре учебного процесса. При этом каждое занятие включает в себя несколько погружений в дополнительную реальность в нужные моменты, что позволит учащимся включиться в учебный процесс, наглядно проиллюстрировать изучаемый материал и закрепить его.

Образовательные курсы, разработанные с использованием технологий VR, могут быть адаптированы как для самостоятельного изучения материала, так и для дистанционного обучения, когда ученик, как и преподаватель, может посещать занятия удаленно. Во время урока обучающиеся смогут слушать лекции, общаться с преподавателем, взаимодействовать, принимая участие в совместных занятиях и выполняя групповые задания, а также осваивать материал самостоятельно. Учебный кабинет, оснащенный 360° видеокамерой, предлагает возможность транслировать занятия в режиме реального времени, что стирает границы обучения, которые существуют при видеоконференцсвязи.

Тем временем все больше российских компаний и учебных заведений страны применяет VR-технологии для подготовки специалистов. Се-

годня весь электротехнический персонал предприятий, проходя обучение, стажировку на действующем оборудовании под наставничеством специалиста цеха. Виртуальный тренажер, имитирующий работу действующего оборудования, позволит улучшить качество процесса обучения. Прежде всего, на подготовку специалиста будет требоваться значительно меньше времени, и одновременно появится больше возможностей отработать множество различных ситуаций, смоделированных в абсолютно безопасном для него режиме. В ходе обучения работники смогут отрабатывать действия на электротехническом оборудовании по заданным сценариям с визуализацией всех последствий возможных ошибок, а также проходить стажировку, сдавать экзамены, получать допуск к самостоятельной работе и приступать к выполнению своих обязанностей.

Преимуществ у VR-тренажера перед реальным оборудованием, безусловно, много. Благодаря ему человек получает возможность управлять моделью любого технологического процесса в виртуальной реальности. Причем все его действия может контролировать в реальном времени обучающий инструктор. При помощи VR-тренажера создается виртуальное пространство, которое представляет возможность управления действующим электротехническим оборудованием путем координации действий с визуальными, звуковыми и прочими эффектами. Такие технологии виртуальной реальности особенно необходимы там, где ошибки персонала в ходе обучения на действующем оборудовании могут привести к нештатным ситуациям, имеющим различные последствия.

Таких инновационных средств и методов обучения, особенно на сложно устроенных объектах электроэнергетики, например, атомных станциях, где тысячи единиц различного оборудования, которое нужно до винтика знать и грамотно им управлять, должно становиться с каждым днем все больше и больше. Именно поэтому внедряемые «умные технологии» направлены на то, чтобы подготовить человека к принятию правильных решений и совершению верных действий в самый короткий срок.

VR-технологии сегодня дают возможность полностью воссоздать реальную среду в цифровом пространстве – как визуальные образы, так и ощущения, что обеспечивает высокую эффективность в обучении. В случае работ на ЛЭП такие решения незаменимы и в контексте безопасности: в виртуальном мире риск травм отсутствует, специалисты могут получать практические навыки, не находясь на полигоне, в том числе на объектах, находящихся под напряжением. Чаще всего, процесс ремонта оборудования электротехнических комплексов и систем происходит в «боевых» условиях, когда оборудование реально выходит из строя. Стажеры, обучающиеся с использованием VR-курса, получают возможность практиковаться в безопасных условиях, не причиняя вреда ни себе, ни имуществу предприятия.

Но почему сегодня VR-технологии не приобрели массовый характер? Преподаватели могут столкнуться с проблемами: чрезмерное время загрузки приложений, плохая геолокация, трудности для обучающихся при работе с технологией VR. Широкое распространение и внедрение технологий виртуальной реальности создают тенденции, с которыми пользователи никогда не сталкивались раньше и которые нельзя игнорировать.

- Приобретение VR-оборудования пока обходится недешево, несмотря на широкое его распространение и снижение стоимости устройств, пока в игровой сфере. Бремя покупки устройства виртуальной реальности при дистанционном обучении лежит на пользователе, в противном случае устройством может быть его телефон. Но учреждения образования также должны закупить VR-комплексы для занятий, что также влечет за собой значительные издержки.

- Чтобы контент оставался интересным и наглядным в виде множества приложений для каждой темы занятия, его создание требует большой работы. Компаниям, разрабатывающим такие материалы, придется потратить много времени на их создание, поскольку они не смогут окупить затраты до того, как начнут серию комплексных курсов.

- Поскольку не все люди в равной степени воспринимают VR, возможны сложности адаптации к виртуальной реальности. У отдельных людей уже через несколько минут могут возникать головокружение, тошнота и дезориентация. Но в скором времени данная проблема будет практически решена полностью в большинстве современных устройств [14].

Рынок технологий дополненной и виртуальной реальности в нашей стране только зарождается, и до тех пор, пока устройства и технологии не будут улучшены до предельного уровня, возможные недостатки и трудности с применением виртуальной реальности в обучении кадров для электроэнергетической отрасли будут проявляться. Вместе с тем, перспективы формирования VR-технологий в области образования очень широки. Применение технологий дополненной и виртуальной реальности как инновационного средства коммуникации в образовании может значительно повысить эффективность и прогрессивность существующих коммуникативных методов обучения. Это подтверждают результаты, представленные в ходе анкетирования обучающихся, а также мнения экспертов из представителей профессиональных сообществ в области VR-технологий, которые отмечают, что их массовое внедрение уже близко и это будет следующим крупным прорывом как, например, интернет в свое время [15, 16].

IV. Заключение

В условиях перенасыщенности информационного пространства, когда все труднее становится доставлять информационные сообщения целевой аудитории, существует острая необходимость в коммуникационных инновациях. Чтобы удерживать внимание обучающихся, создавать эффект присутствия, вовлекать и погружать в информационное сообщение, все чаще требуются инновационные технологические решения, которые обеспечивают взаимодействие и общение с помощью новых технологических решений в совершенно новой среде. Эксперты мирового научного сообщества поддерживают использование данной технологии с целью улучшения памяти и понимания во время обучения. Все, что проблематично создать в реальном мире по техническим, экономическим или физическим причинам, можно сформировать в виртуальном мире, где любым навыком легче овладеть, если вы тренируетесь в интерактивной трехмерной среде. Инновационные VR-технологии, невзирая на долгий путь их формирования, еще молоды, но виртуальная реальность – огромный этап развития в области подготовки специалистов, в том числе, для электроэнергетической отрасли. И в ближайшее время мы увидим много интересных и увлекательных открытий в этой сфере.

© Рыжова Е.Л., 2021

Поступила в редакцию 24.07.2021

Received 24.07.2021

Библиографический список

- [1] Дежина И.Г., Фруммин И.Д. Инженерное образование в России и его связь с инновационной деятельностью // От знаний к благосостоянию: интеграция науки и высшего образования для развития России, Воткинс А., Дежина И.Г., Фруммин И.Д., Субботина Т.П. М.: Всемир. банк и Нац. фонд подготовки кадров, 2006. – С. 278-318.
- [2] Виртуальная и дополненная реальности станут частью физического мира // ООО «СК ПРЕСС» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.crn.ru/news/detail.php?ID=120281> (дата обращения 20.07.2021).
- [3] Бабенко В.С. Виртуальная реальность: Толковый словарь терминов. СПб.: ГУАП, 2006. – 87 с.
- [4] Очки виртуальной реальности Oculus Rift [Электронный ресурс]. URL: <https://vr-j.ru/oculus-rift-ochki-virtualnoy-realnosti/> (дата обращения 10.07.2021).
- [5] Шлем виртуальной реальности [Электронный ресурс]. URL: <http://fibrum.com/> (дата обращения 10.07.2021).
- [6] Браницкая И.Н. Личностные факторы современного инновационного процесса // Вестник Полоцкого Государственного Университета. Серия Е. Педагогические Науки. 2012. № 15. С. 85-88.

- [7] Плотникова Р.Н., Забегалина Т.В. Использование потенциала преподавателей, сотрудников и обучающихся в обеспечении качества образования // ФЭС: Финансы. Экономика. Стратегия. 2010. № 2. С. 32а-35.
- [8] Дридзе Т.М. Социальная коммуникация в управлении с обратной связью // Социологические исследования. 1998. № 10. С. 44-50.
- [9] Дополненная реальность – что это такое // УК «АЛЬЯНС. ВЕНЧУРНЫЙ БИЗ-НЕС» [Электронный ресурс]. URL: <http://venture-biz.ru/informatsionnyetechnologii/173-dopolnennaya-realnost> (дата обращения 03.07.2021).
- [10] Завьялова Н. Основы коммуникационных технология // Маркетинговые исследования. 2007. № 1. С. 19-32.
- [11] Куликов Ю.А. Технологии дополненной реальности – инновационная интерактивная технология в образовании // VII Межд. науч.-практ. конф. «Инновационные тенденции развития системы образования», Июнь 11, 2017, Чебоксары, Россия. Чебоксары: Общество с ограниченной ответственностью "Центр научного сотрудничества "Интерактив плюс", 2017. С. 67-69.
- [12] Шиповская Л.П. Виртуальная реальность. Потребность в новых информационных технологиях // Сервис Plus. 2010. № 4. С. 36-45.
- [13] Шапиро Д.И. Виртуальная реальность и проблемы нейрокомпьютинга. М.: РФК «Имидж-Лаб», 2012. – 454 с.
- [14] Алексеенко Н.Н. Психоаналитические аспекты поведения человека в киберпространстве // Журнал практической психологии и психоанализа. 2000. № 3.
- [15] Елесин С.С., Хаминова А.А. Внедрение технологий виртуальной и дополнительной реальности в музейную практику: проблемы и решения // Межд. науч. конф. «Цифровая гуманитаристика: Ресурсы, Методы, Исследования», Май 16-19, 2017, Пермь, Россия. Пермь: ПГНИУ, 2017. С. 174-177.
- [16] Шамшев А.Б. Возможности применения технологий дополнительной реальности в обучении информационным технологиям // Электронное обучение в непрерывном образовании. 2017. № 1. С. 174-179.

References

- [1] I.G. Dezhina and I.D. Frumin, "Inzhenerное образование v Rossii i ego svyaz' s innovacionnoj deyatel'nost'yu [Engineering education in Russia and its connection with innovative activity]", in *Ot znaniy k blagosostoyaniyu: integraciya nauki i vysshego obrazovaniya dlya razvitiya Rossii [From knowledge to well-being: integration of science and higher education for the development of Russia]*, A. Votkins, I.G. Dezhina, I.D. Frumin, T.P. Subbotina. Moscow: World Bank and National Training Foundation, 2006, pp. 278-318 (in Russian).
- [2] Virtual'naya i dopolnennaya real'nosti stanut chast'yu fizicheskogo mira [Virtual and augmented reality will become part of the physical world]. [Online]. Available at: <https://www.crn.ru/news/detail.php?ID=120281> [Accessed: July 20, 2021] (in Russian).
- [3] V.S. Babenko, *Virtual'naya real'nost': Tolkovyy slovar' terminov [Virtual reality: An explanatory dictionary of terms]*. St. Petersburg: SUAI, 2006 (in Russian).
- [4] Ochki virtual'noj real'nosti Oculus Rift [Virtual reality glasses Oculus Rift]. [Online]. Available at: <https://vr-j.ru/oculus-rift-ochki-virtualnoy-realnosti/> [Accessed: July 10, 2021] (in Russian).

- [5] Shlem virtual'noj real'nosti [Virtual Reality Helmet]. [Online]. Available at: <http://fibrum.com/> [Accessed: July 10, 2021] (in Russian).
- [6] I.N. Branitskaya, "Personal factors of modern innovative process", *Herald of Polotsk State University. Series E. Pedagogical Sciences*, no. 15, pp. 85-88, 2012.
- [7] Plotnikova R.N. and T.V. Zabegalina, "Ispol'zovanie potentsiala prepodavatelej, sotrudnikov i obuchayushchihsya v obespechenii kachestva obrazovaniya [Using the potential of teachers, employees and students in ensuring the quality of education]", *FES: Finance. Economy. Strategy*, no. 2, pp. 32a-35, 2010 (in Russian).
- [8] T.M. Dridze, "Social'naya kommunikaciya v upravlenii s obratnoj svyaz'yu [Social communication in management with feedback]", *Sotsiologicheskie Issledovaniya*, no. 10, pp. 44-50, 1998 (in Russian).
- [9] Dopolnennaya real'nost' – chto eto takoe [Augmented reality – what is it]. [Online]. Available at: <http://venture-biz.ru/informatsionnye-tehnologii/173-dopolnennaya-realnost> [Accessed: July 03, 2021] (in Russian).
- [10] N. Zavyalova, "Osnovy kommunikacionnyh tekhnologiya [Fundamentals of communication technologies]", *Marketingovye Issledovaniya [Marketing Research]*, no. 1, pp. 19-32, 2007 (in Russian).
- [11] Yu.A. Kulikov, "Tekhnologii dopolnennoj real'nosti – innovacionnaya interaktivnaya tekhnologiya v obrazovanii [Technologies of additional reality – innovative interactive technology in education]", in *proc. VII Int. scient. and pract. conf. Innovacionnye tendencii razvitiya sistemy obrazovaniya [Innovative trends in the development of the education system]*, June 11, 2017, Cheboksary, Russia, pp. 67-69 (in Russian).
- [12] L.P. Shipovskaya, "Virtual'naya real'nost'. Potrebnost' v novykh informacionnyh tekhnologiyah [Virtual reality. The need for new information technologies]", *Service Plus*, no. 4, pp. 36-45, 2010 (in Russian).
- [13] D.I. Shapiro, *Virtual'naya real'nost' i problemy neyrokomp'yutinga [Virtual reality and problems of neurocomputing]*. Moscow: RFK "Image-Lab", 2012 (in Russian).
- [14] N.N. Alekseenko, "Psihoanaliticheskie aspekty povedeniya cheloveka v kiberprostranstve [Psychoanalytic aspects of human behavior in cyberspace]", *Zhurnal prakticheskoj psihologii i psihoanaliza [Journal of Practical Psychology and Psychoanalysis]*, no. 3, 2000 (in Russian).
- [15] S.S. Elesin and A.A. Khaminova, "Introduction of virtual and augmented reality technologies into museum practice: problems and solutions", in *proc. Int. scient. conf. Cifrovaya gumanitaristika: Resursy, Metody, Issledovaniya [Digital Humanities: Resources, Methods, Research]*, 2017, May 16-19, 2017, Perm, Russia, pp. 174-177 (in Russian).
- [16] A.B. Shamshev, "Possibilities of application of technologies of additional reality in training information technologies", *Elektronnoe obuchenie v nepreryvnom obrazovanii [E-learning in continuous education]*, no. 1, pp. 174-179, 2017 (in Russian).

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ
INFORMATION ABOUT THE AUTHOR**

Рыжова Елена Львовна, кандидат технических наук, доцент кафедры Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Elena L. Ryzhova, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the St. Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I, Saint Petersburg, Russian Federation

СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.314

DOI 10.46960/2658-6754_2021_3_107

ИСТОЧНИК РЕЗЕРВНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ С ВОДОРОДНЫМ ТОПЛИВНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ И ЛИТИЙ-ЖЕЛЕЗО-ФОСФАТНОЙ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕЕЙ

А.Л. Куликов

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия
e-mail: inventor61@mail.ru

В.В. Ваняев

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия
e-mail: vanyaev.w@mail.ru

А.Б. Дарьенков

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия
e-mail: darenkov@nntu.ru

А.В. Шахов

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия
e-mail: andshahov@gmail.com

Разработан источник резервного электропитания ответственных потребителей в условиях нестабильности первичной питающей сети, построенный на основе перспективных водородных топливных элементов и современных литий-железо-фосфатной аккумуляторных батарей, позволяющая уменьшить расчетную мощность, массу и габариты разрабатываемого устройства. Выполнен расчет фильтровых конденсаторов преобразовательной части источника, обеспечивающих требуемое качество выходного напряжения. Приведены результаты имитационного моделирования источника резервного электропитания.

Ключевые слова: система бесперебойного электропитания, источник резервного электропитания, водородный топливный элемент, аккумуляторная батарея, автономный инвертор напряжения, синусоидальная ШИМ, фильтровый конденсатор, имитационная модель.

Для цитирования: Куликов, А.Л. Источник резервного электропитания с водородным топливным элементом и литий-железо-фосфатной аккумуляторной батареей / А.Л. Куликов, В.В. Ваняев, А.Б. Дарьенков, А.В. Шахов // Интеллектуальная электротехника. 2021. № 3. С. 107-124. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_3_107

BACKUP POWER SUPPLY SOURCE WITH HYDROGEN FUEL CELL AND LITHIUM IRON PHOSPHATE BATTERY

A.L. Kulikov

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia
e-mail: inventor61@mail.ru

V.V. Vanyaev

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia
e-mail: vanyaev.w@mail.ru

A.B. Dar'enkov

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia
e-mail: darenkov@nntu.ru

A.V. Shahov

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia
e-mail: andshahov@gmail.com

The article is devoted to the development of a backup power supply source for responsible consumers in conditions of instability of the primary supply network, built on the basis of promising hydrogen fuel cells and modern lithium-iron-phosphate storage batteries. A rational arrangement of storage batteries is proposed, which makes it possible to reduce the design power, weight and dimensions of the device being developed. The calculation of filter capacitors of the converter part of the source, providing the required quality of the output voltage, has been performed. The results of simulation of the backup power source are presented.

Ключевые слова: autonomous voltage inverter, backup power supply source, filter capacitor, hydrogen fuel cell, uninterruptible power supply system, simulation model, sinusoidal PWM, storage battery.

For citation: A.L. Kulikov, V.V. Vanyaev, A.B. Dar'enkov and A.V. Shahov, "Backup power supply source with hydrogen fuel cell and lithium iron phosphate battery", *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 107-124, 2021.

DOI: 10.46960/2658-6754_2021_3_107

I. Введение

Системы бесперебойного электропитания обеспечивают подачу энергии к ответственным потребителям в условиях их работы от первичной сети с нестабильным режимом функционирования. Они включают в себя первичную сеть как основной канал электропитания потребителей и источник резервного электропитания (ИРЭП), в качестве которого весьма перспективно применение водородных топливных элементов (ВТЭ) в совокупности с литий-железо-фосфатной аккумуляторной батареей (АБ), обеспечивающих резервный канал электропитания нагрузки при отсутствии (или низком уровне) напряжения первичной сети.

Функциональная схема силовых цепей системы бесперебойного электропитания представлена на рис. 1. Она содержит первичную сеть переменного напряжения U_c , ИРЭП, быстродействующие твердотельные реле $KV1-KV4$, управляемыми микроконтроллером, которые подключают в общем случае активно-индуктивную нагрузку Z_n к сети, или ИРЭП при отсутствии напряжения сети.

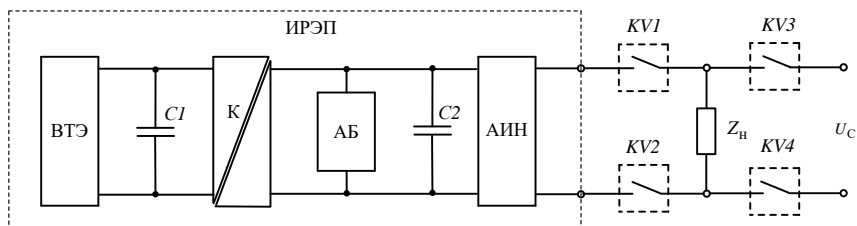


Рис. 1. Функциональная схема силовых цепей системы бесперебойного электропитания

Fig. 1. Functional diagram of power circuits of the uninterruptible power supply system

В свою очередь, функциональная схема силовых цепей ИРЭП содержит ВТЭ в качестве резервного источника энергии, АБ на базе $LiFePO_4$ аккумуляторов, которая выполняет функцию электрического буфера,

обеспечивающего совместно с ВТЭ необходимый уровень выходной мощности в течение заданного времени при отсутствии или низком уровне напряжения U_c . Силовая цепь ИРЭП содержит также конвертор (К) и выходной автономный инвертор напряжения (АИН) с ШИМ. Конвертор согласует относительно низкое напряжение ВТЭ с повышенным напряжением питания АИН, а также гальваническую развязку топливного элемента от остальной силовой цепи. Он выполнен на базе АИН с широтным регулированием выходного напряжения и трансформаторным выходом [1-4].

Выходной АИН выполнен по однофазной мостовой схеме и работает в режиме однополярной синусоидальной ШИМ, позволяющей уменьшить требуемую энергоемкость его выходного фильтра (на схеме рис. 1 этот фильтр, а также фильтр ЭМС, включены в структуру АИН). Преобразовательная часть ИРП выполнена на силовых *MOSFET* и *IGBT* [5]. В разработанном устройстве *LiFePO4* аккумуляторы АБ соединены последовательно для получения напряжения, обеспечивающего требуемый уровень напряжения питания АИН и, соответственно, заданного (220 В) выходного напряжения ИРЭП. Такое решение исключает необходимость установки дополнительного преобразователя для согласования напряжений АБ и АИН, что упрощает ИРЭП, стабилизирует его работу и улучшает его массогабаритные показатели.

С целью наиболее эффективного использования ВТЭ на интервале резервного питания нагрузки он функционирует в режиме источника постоянной номинальной мощности. Участок силовой цепи «конвертор – топливный элемент» охвачен обратной связью по выходной мощности ВТЭ. Кроме рассмотренных устройств, силовая цепь ИРЭП содержит также фильтровые конденсаторы $C1$, $C2$ которые блокируют переменные составляющие токов, генерируемых преобразовательными устройствами.

С целью проверки работоспособности рассмотренной структуры ИРЭП необходимо выполнить имитационное моделирование происходящих в ней электромагнитных процессов. В качестве среды моделирования выбран пакет *MATLAB Simulink* [6].

II. Имитационное моделирование процессов в ИРЭП

Имитационное моделирование процессов в силовых цепях (рис. 1) предполагает разработку моделей на базе заданных исходных данных к проекту, к которым относятся технические данные ТЭ и АБ, а также требования к выходным параметрам ИРЭП.

Если на начальном этапе паспортные параметры ВТЭ и АБ известны, то значения емкостей фильтровые конденсаторы $C1$, $C2$ требуют определения.

Определение величин емкостей фильтровых конденсаторов

Получим расчетные выражения для решения этой задачи, воспользовавшись формулой, описывающей зависимость от времени усредненного тока, потребляемого однофазным мостовым АИН с синусоидальной ШИМ [4]:

$$\tilde{i}_1 = \frac{1}{2} \mu \cdot I_m \cdot [\cos \varphi_n - \cos(2\omega t - \varphi_n)], \quad (1)$$

где I_m – амплитуда усредненного выходного тока однофазного мостового АИН; μ – глубина модуляции выходного напряжения; φ_n – фазовый угол тока нагрузки; ω – круговая частота сетевого напряжения.

Наибольшее значение амплитуды переменной составляющей усредненного потребляемого тока, имеющего круговую частоту 2ω ($f = 100$ Гц), будет:

$$I_{m \max} = \frac{1}{2} \mu_{\max} I_m. \quad (2)$$

Переменная составляющая усредненного потребляемого тока, по сути – тока, генерируемого АИН в цепь питания, замыкается через АБ, ВТЭ и фильтровые конденсаторы C_1 и C_2 , что вызывает появление пульсаций напряжения питания АИН и, как следствие, искажение выходного напряжения ИРЭП.

Наибольшую амплитуду пульсаций напряжения питания АИН можно определить по формуле:

$$U_{m \max} = \frac{1}{2} \mu_{\max} I_m \cdot \frac{r_{\text{ВТЭ}}'' \parallel r_{\text{АБ}}}{\sqrt{1 + 4(r_{\text{ВТЭ}}'' \parallel r_{\text{АБ}} \cdot C_1'' \parallel C_2 \cdot \omega)^2}}. \quad (3)$$

где $r_{\text{ВТЭ}}''$ – внутреннее сопротивление ВТЭ, приведенное к напряжению питания АИН; $r_{\text{АБ}}$ – внутреннее сопротивление АБ; C_1'' – величина емкости конденсатора C_1 приведенная к напряжению питания АИН; C_2 – емкость конденсатора C_2 ; $r_{\text{ВТЭ}}'' \parallel r_{\text{АБ}}$, $C_1'' \parallel C_2$ – соответственно, общее сопротивление и емкость параллельно соединенных элементов.

При реальных значениях параметров ВТЭ и АБ справедливы соотношения:

$$r_{\text{ВТЭ}}'' \gg r_{\text{АБ}}; C_1'' \ll C_2, \quad (4)$$

и расчетное выражение $U_{m \max}$ примет вид:

$$U_{m \max} \approx \frac{1}{2} \mu_{\max} I_m \cdot \frac{r_{\text{АБ max}}}{\sqrt{1 + 4(r_{\text{АБ max}} C_2 \omega)^2}}. \quad (5)$$

Коэффициент пульсаций напряжения питания АИН на частоте 100 Гц определяется по формуле:

$$k_U = \frac{U_{m \max}}{U_{\text{АБ min}}}. \quad (6)$$

Подставляя (6) в (5), получаем формулу для расчета требуемой величины емкости конденсатора C_2 , обеспечивающей заданное значение коэффициента пульсаций:

$$C_2 = \frac{1}{2r_{\text{АБ max}} \omega} \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{\mu_{\max} I_m r_{\text{АБ max}}}{k_U U_{\text{АБ min}}} \right)^2 - 1}. \quad (7)$$

Незначительная, согласно соотношениям (4), часть переменной составляющей тока, генерируемого АИН в цепь питания, замыкается через ВТЭ и фильтровый алюминиевый электролитический конденсатор C_1 [7], и ее величина не оказывает существенного влияния на выходное напряжение ИРЭП. Необходимое значение емкости конденсатора C_1 можно выбрать из следующего приближенного соотношения:

$$C_1 \approx \frac{r_{\text{ТЭ}}}{r_{\text{АБ max}}} \cdot C_2. \quad (8)$$

Определение глубины модуляции выходного напряжения АИН с ШИМ

Глубина модуляции μ выходного напряжения мостового АИН с ШИМ определяется:

$$\mu = \frac{U_{\text{mвых}}}{U_{\text{АБ}}}, \quad (9)$$

где $U_{\text{mвых}}$ – амплитуда выходного напряжения устройства.

При заданном значении выходного напряжения наибольшее требуемое расчетное значение μ_{\max} глубины модуляции будет:

$$\mu_{\max} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{АБmin}} - r_{\text{АБmax}} \cdot \frac{P_{\text{вых}}}{U_{\text{АБmin}}}}, \quad (10)$$

где $P_{\text{вых}}$ – мощность, отдаваемая ИРП в нагрузку.

Определение коэффициента повышения выходного напряжения конвертора

Данный преобразователь выполнен на базе АИН с трансформаторным звеном повышенной частоты [3] и согласует относительно небольшое выходное напряжение топливного элемента с напряжением АБ. Коэффициент $k_{\text{п}}$ повышения выходного напряжения рассчитывается в соответствии с выражением:

$$k_{\text{п}} = D_{\max} \cdot k_{21} = \frac{U_{\text{АБmax}}}{U_{\text{ТЭmin}}}, \quad (11)$$

где D_{\max} – наибольшая относительная длительность включения транзисторов К; k_{21} – коэффициент трансформации согласующего трансформатора К. Задавая значение D_{\max} , находим требуемый коэффициент трансформации k_{21} для мостовой схемы АИН:

$$k_{21} = \frac{k_{\text{п}}}{D_{\max}}. \quad (12)$$

При использовании в К полумостового АИН значение коэффициента трансформации рассчитывается по формуле:

$$k_{21} = \frac{2k_{\text{п}}}{D_{\max}}. \quad (13)$$

Расчет параметров имитационной модели ИРЭП

На базе паспортных данных ВТЭ и АБ, а также приведенных выше соотношений выполним расчет параметров моделируемых устройств.

Расчет внутреннего сопротивления ВТЭ

Внешняя характеристика ВТЭ, используемого в проекте, приведена на рис. 2.

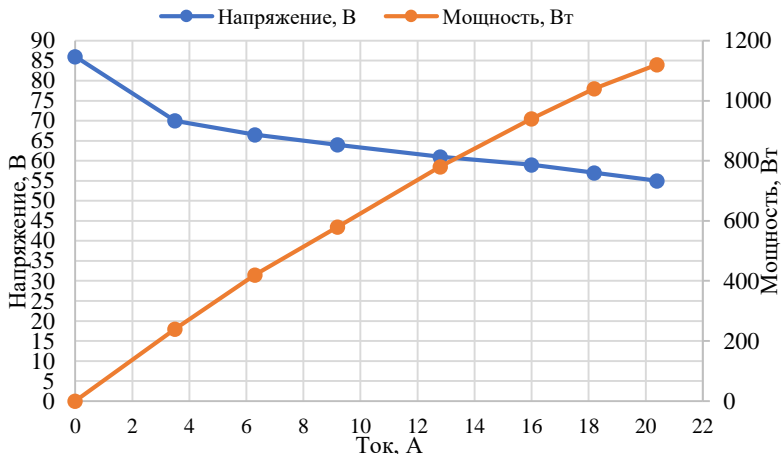


Рис. 2. Внешняя характеристика ВТЭ

Fig. 2. External characteristic of hydrogen fuel cell

Внутреннее сопротивление $r_{ТЭ}$ ВТЭ, согласно его внешней характеристике (рис. 2), будет:

$$r_{ТЭ} = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{69 - 56}{18,2 - 3,5} = \frac{13}{14,7} = 0,88 \text{ Ом.}$$

Расчет внутреннего сопротивления АБ

Принимаем следующие значения параметров аккумуляторов IFR26650-35A, применяемых в проекте:

- номинальное напряжение $U_{Аном} = 3,2 \text{ В}$;
- минимальное напряжение $U_{Аmin} = 2,5 \text{ В}$;
- максимальное напряжение $U_{Аmax} = 3,6 \text{ В}$;
- максимальное внутреннее сопротивление $r_{Аmax} = 18 \text{ мОм}$.

Значения напряжений всей АБ может быть рассчитано по формуле:

$$U_{АБ} = N \cdot M \cdot U_A,$$

где N , M – соответственно число аккумуляторов в одном субблоке АБ и число субблоков в батарее.

В проектируемом устройстве $N = 12$, $M = 12$ и соответствующие параметры всей батареи будут иметь значения

- номинальное напряжение $U_{АБном} = 3,2 \cdot 144 = 460,8 \text{ В}$;

- минимальное напряжение $U_{\text{АБmin}} = 2,5 \cdot 144 = 360 \text{ В}$;
- максимальное напряжение $U_{\text{АБmax}} = 3,6 \cdot 144 = 518,4 \text{ В}$;
- максимальное внутреннее сопротивление $r_{\text{АБmax}} = 18 \cdot 10^{-3} \cdot 144 = 2,6 \text{ Ом}$.

Расчет глубины модуляции выходного напряжения АИН

При действующем значении выходного напряжения $U_{\text{вых}} = 220 \text{ В}$ и выходной мощности $P_{\text{вых}} = 3,0 \text{ кВт}$ наибольшее требуемое расчетное значение μ_{max} , согласно (10), будет:

$$\mu_{\text{max}} = \frac{U_{\text{мвых}}}{U_{\text{АБmin}} - r_{\text{АБmax}} \cdot \frac{P_{\text{вых}}}{U_{\text{АБmin}}}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 220}{360 - 2,6 \cdot \frac{3 \cdot 10^3}{360}} = 0,92.$$

С учетом падения напряжения на открытых транзисторах и мертвого времени при переключениях транзисторов АИН принимаем значение $\mu_{\text{max}} = 0,95$.

Расчет коэффициента повышения выходного напряжения конвертора

Коэффициент $k_{\text{п}}$ согласно (11) будет:

$$k_{\text{п}} = D_{\text{max}} \cdot k_{21} = \frac{U_{\text{АБmax}}}{U_{\text{ТЭmin}}} = \frac{518,4}{57} = 9,1.$$

Задаваясь значением $D_{\text{max}} = 0,8$, находим требуемый коэффициент трансформации k_{21} для полумостовой схемы АИН:

$$k_{21} = \frac{2k_{\text{п}}}{D_{\text{max}}} = \frac{2 \cdot 9,1}{0,8} = 22,8.$$

Расчет величин емкостей фильтровых конденсаторов

Задаваясь значением коэффициента k_U пульсаций напряжения питания АИН, равным $k_U = 0,045$, на основании полученных ранее данных по (7) рассчитываем емкость конденсатора C_2 :

$$\begin{aligned} C_2 &= \frac{1}{2r_{\text{АБmax}} \omega} \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{\mu_{\text{max}} I_m r_{\text{АБmax}}}{k_U U_{\text{АБmin}}} \right)^2 - 1} = \\ &= \frac{1}{2 \cdot 2,6 \cdot 314} \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{0,95 \cdot 24 \cdot 2,6}{0,045 \cdot 360} \right)^2 - 1} = 940 \text{ мкФ}. \end{aligned}$$

Принимаем модельное значение емкости $C_2 = 1000$ мкФ.
Находим величину емкости конденсатора C_1 из (8):

$$C_1 \approx \frac{r_{ТЭ}}{r_{АБ\max}} \cdot C_2 = \frac{0,88}{2,6} \cdot 1000 = 318 \text{ мкФ.}$$

Принимаем модельные значения емкостей полумостового АИН в составе К несколько меньшими рассчитанных и равными $C = 2 \cdot C_1 = 470$ мкФ.

III. Результаты

Имитационное моделирование на ПК электромагнитных процессов в полной структуре ИРЭП, содержащей два преобразовательных устройства с автономными системами управления, не представляется целесообразным в силу ограниченности его вычислительных возможностей. При этом следует заметить, что на работу каждого из них значимое влияние оказывает лишь низкочастотная (100 Гц) составляющая тока, генерируемого выходным АИН. По этой причине моделирование процессов выполнено отдельно в каждом устройстве с учетом влияния на каждый из них этой составляющей.

Моделирование выполнено при условиях:

- нагрузка ИРП имеет номинальное значение $P \approx 3$ кВт;
- действующее значение напряжения на выходе ИРЭП $U_{\text{вых}} = 220$ В;
- частота выходного напряжения $f_{\text{вых}} = 50$ Гц;
- нагрузка ИРП активно-индуктивная $\cos\varphi_n = 0,8$;
- ВТЭ работает в режиме номинальной выходной мощности $P_{ТЭ} = 1,0$ кВт;
- тактовая частота преобразователей ИРЭП $f_t = 20$ кГц;
- напряжение АБ $U_{АБ} = 360$ В и $U_{АБ} = 500$ В.

Схемы набора имитационных моделей АИН и К приведены на рис. 3, 4. Результаты моделирования представлены временными диаграммами на рис. 5-10.

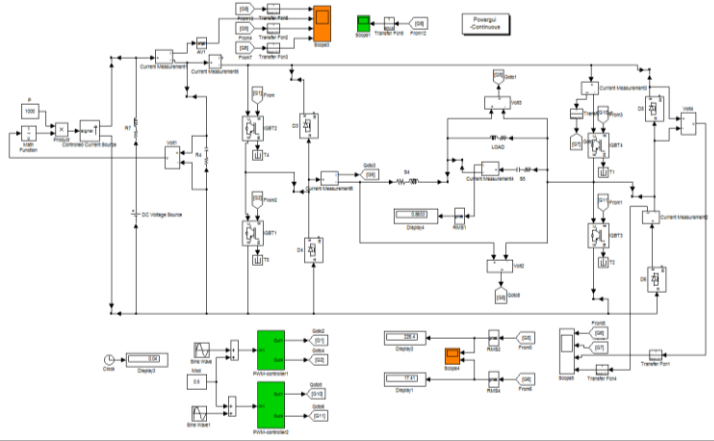


Рис. 3. Схема набора имитационной модели АИН

Fig. 3. Scheme of the set of the autonomous voltage inverter simulation model

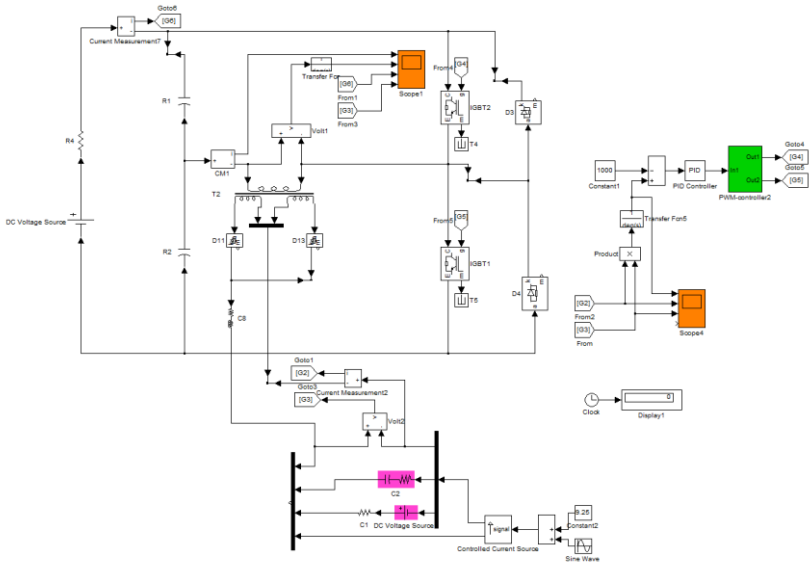


Рис. 4. Схема набора имитационной модели конвертора

Fig. 4. Scheme of a set of a simulation model of the converter

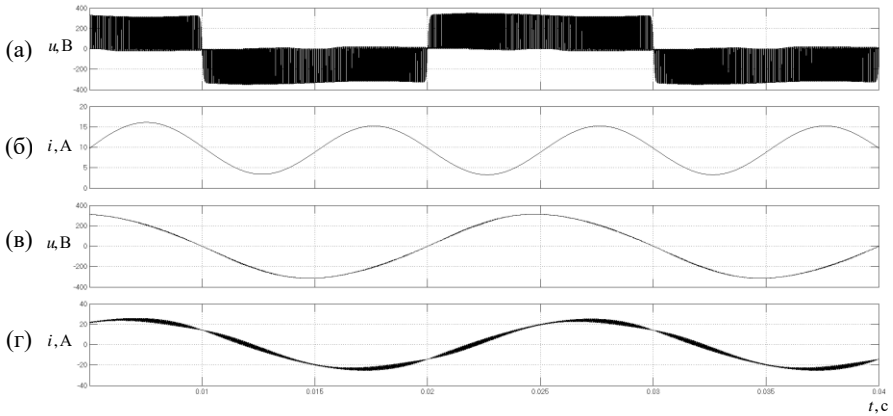


Рис. 5. Диаграммы работы выходного АИН:
выходное напряжение АИН (а); ток АБ (б); выходное напряжение ИРЭП (в);
выходной ток АИН (г)

Fig. 5. Diagrams of output autonomous voltage inverter operation:
output voltage (a); battery current (b); output voltage
of uninterruptible power supply system (в); output current (г)

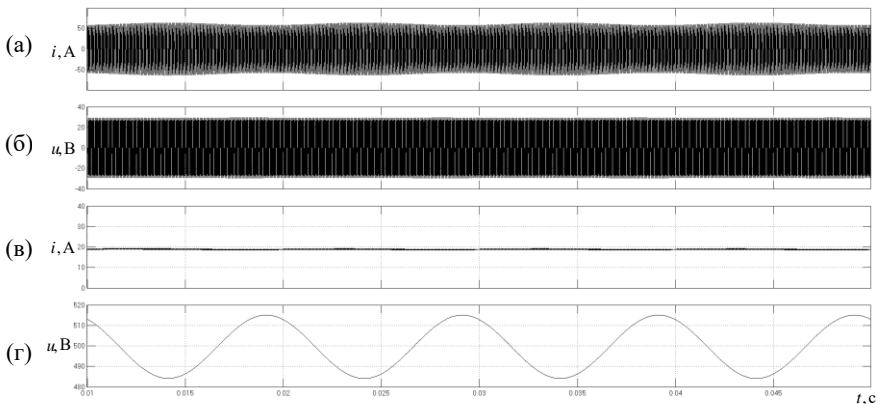
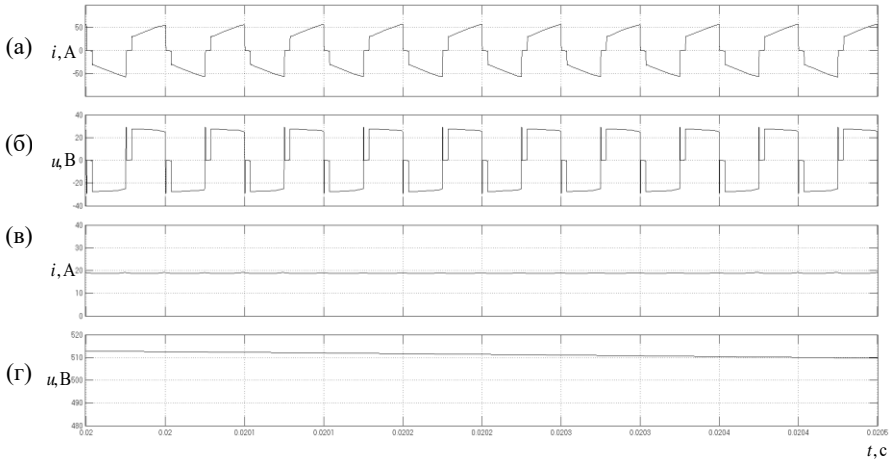


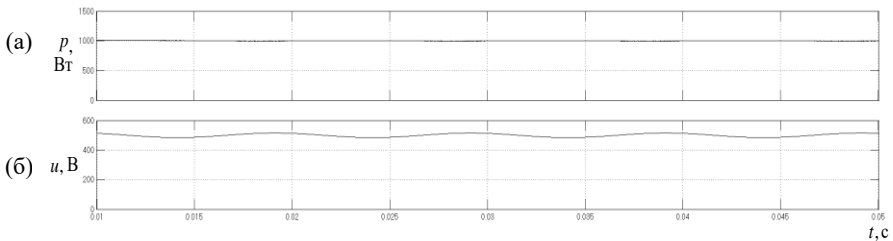
Рис. 6. Диаграммы работы конвертора:
выходной ток и напряжение АИН конвертора (а, б); выходной ток ВТЭ (в);
напряжение АБ (г)

Fig. 6. Diagrams of converter operation:
output current and voltage of the autonomous voltage inverter converter (а, б);
output current of fuel cell (в); battery voltage (г)



**Рис. 7. Диаграммы работы конвертора
выходной ток и напряжение АИН конвертора (а, б);
выходной ток ВТЭ (в); напряжение АБ (г)**

**Fig. 7. Diagrams of converter operation:
output current and voltage of the autonomous voltage inverter converter (а, б);
output current of fuel cell (в); battery voltage (г)**



**Рис. 8. Диаграммы работы конвертора
выходная мощность конвертора (а); напряжение АБ (б)**

**Fig. 8. Diagrams of converter operation:
converter output power (а); battery voltage (б)**

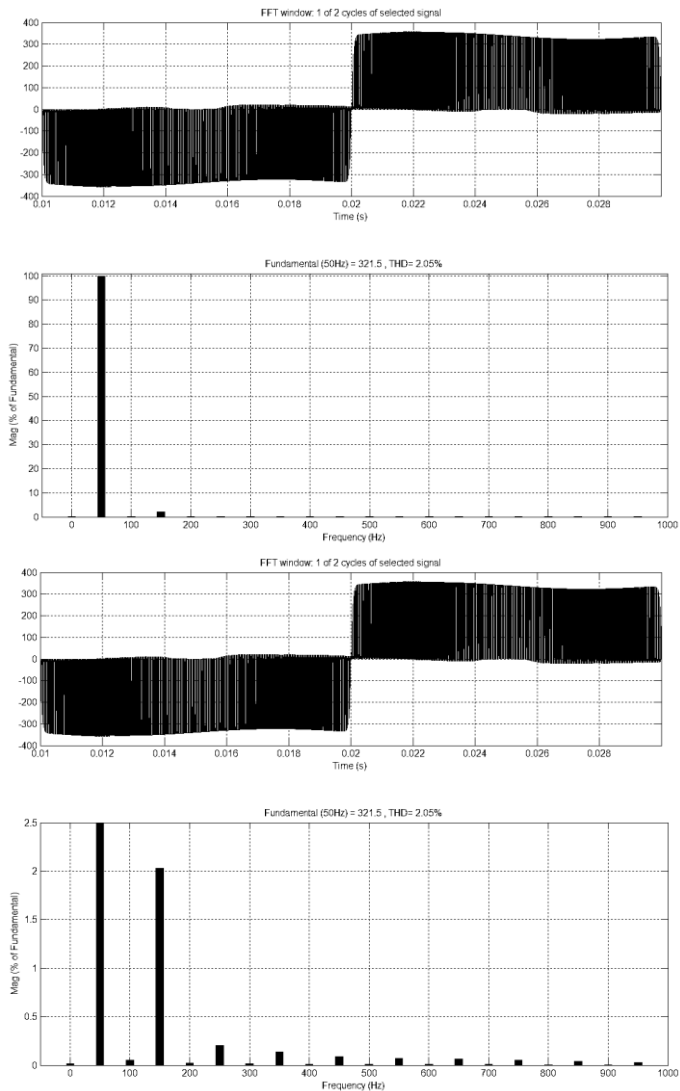


Рис. 9. Спектральный анализ кривой выходного напряжения ИРЭП ($C_2 = 1000$ мкФ)

Fig. 9. Spectral analysis of the output voltage curve of the uninterruptible power supply system ($C_2 = 1000$ μ F)

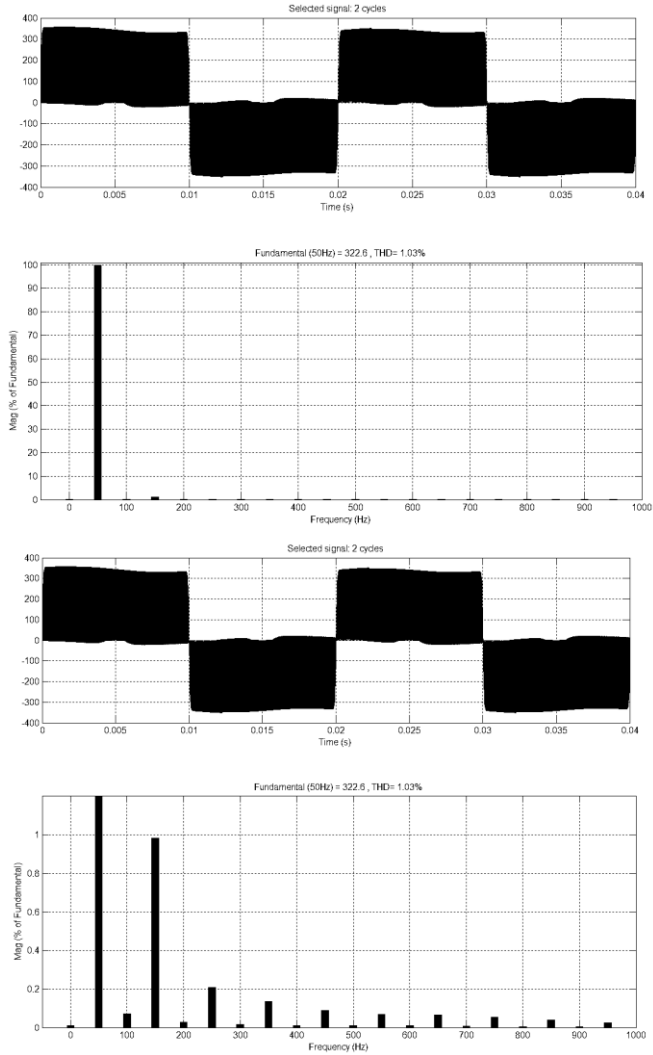


Рис. 10. Спектральный анализ кривой выходного напряжения ИРЭП ($C_2 = 2000 \text{ мкФ}$)

Fig. 10. Spectral analysis of the output voltage curve of the uninterruptible power supply system ($C_2 = 2000 \text{ }\mu\text{F}$)

Из рис. 9 и 10 следует, что выходное напряжение ИРЭП, кроме основной гармоники с частотой 50 Гц, содержит составляющую тройной частоты 150 Гц, обусловленную амплитудной модуляцией напряжения питания АИН, при этом амплитуда 3-й гармоники при выбранных значениях емкостей фильтров $C1$, $C2$ не превышает 1...2 % от амплитуды основной гармоники.

IV. Выводы

1. Предложенная функциональная схема и реализация силовых цепей ИРЭП с АБ, содержащей ряд последовательно соединенных $LiFePO_4$ аккумуляторов, обеспечивает требуемый уровень напряжения питания АИН и выходного напряжения ИРЭП и исключает необходимость установки дополнительного преобразователя для согласования напряжений АБ и первичной сети, что существенно упрощает ИРЭП, стабилизирует его работу и улучшает массогабаритные показатели.

2. Реализация режима постоянства выходной мощности ВТЭ, равной номинальному ее значению на интервале резервного питания нагрузки, а также в пределах интервала зарядки АБ позволяет наиболее полно и эффективно использовать потенциал ВТЭ и ИРЭП в целом.

3. Результаты имитационного моделирования подтвердили работоспособность рассмотренной структуры ИРЭП, достоверность расчета ее параметров, обеспечивающих высокое качество выходного напряжения (генерируемой электроэнергии).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного Фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-38-51016.

© Куликов А.Л., 2021

© Ваняев В.В., 2021

© Дарьенков А.Б., 2021

© Шахов А.В., 2021

Поступила в редакцию 10.09.2021

Received 10.09.2021

Библиографический список

- [1] Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А. Силовая электроника. М.: Изд. Дом МЭИ, 2007. – 632 с.
- [2] Зиновьев, Г.С. Основы силовой электроники. 4-е изд. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – 671 с.
- [3] Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. М.: Техносфера, 2006. – 632 с.

- [4] Мелешин В.И., Овчинников Д.А. Управление транзисторными преобразователями электроэнергии. М.: Техносфера, 2011. – 576 с.
- [5] Транзисторы, микросхемы и модули для управления питанием International Rectifier // ЗАО «Платан Компонентс». [Электронный ресурс]. URL: www.irf.ru (дата обращения 01.06.2021).
- [6] Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
- [7] Aluminium Electrolytic Capacitors. EPCOS Data Book, 2018.

References

- [1] Yu.K. Rozanov, M.V. Ryabchitsky and A.A. Kvasnyuk, *Silovaya Elektronika [Power Electronics]*. Moscow: MPEI, 2007 (in Russian).
- [2] G.S. Zinoviev, *Osnovy silovoj elektroniki [Power Electronics Fundamentals]*. 4th ed. Novosibirsk: NSTU, 2009 (in Russian).
- [3] V.I. Meleshin, *Tranzistornaya preobrazovatel'naya tekhnika [Transistor converter technology]*. Moscow: Technosphere, 2006 (in Russian).
- [4] V.I. Meleshin and D.A. Ovchinnikov, *Upravlenie tranzistornymi preobrazovatelyami elektroenergii [Control of transistor power converters]*. Moscow: Technosphere, 2011 (in Russian).
- [5] Tranzistory, mikroskhemu i moduli dlya upravleniya pitaniem International Rectifier [Power Management Transistors, ICs & Modules International Rectifier]. [Online]. Available at: www.irf.ru [Accessed: June 1, 2021] (in Russian).
- [6] I.V. Chernykh, *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustrojstv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink [Simulation of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]*. Moscow: DMK Press; SPb: Piter, 2008 (in Russian).
- [7] Aluminium Electrolytic Capacitors. EPCOS Data Book, 2018.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Куликов Александр Леонидович, доктор технических наук, профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Aleksandr L. Kulikov, D. Sci. (Eng.), professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Ваняев Валерий Владимирович, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Valery V. Vanyaev, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Дарьенков Андрей Борисович, доктор технических наук, директор института электроэнергетики, заведующий кафедрой Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Andrey B. Dar'enkov, D. Sci. (Eng.), director of the Institute of Electric Power Industry, head of the department of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Шахов Андрей Валентинович, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Andrey V. Shahov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

**MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION
OF THE RUSSIAN FEDERATION
NIZHNY NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY
n.a. R.E. ALEKSEEV**

SMART ELECTRICAL ENGINEERING

№ 3

Nizhny Novgorod 2021

Smart electrical engineering / NNSTU n.a. R.E. Alekseev. – Nizhny Novgorod, 2021. No. 3 (15). – 128 p.

The journal is issued 4 times in year

Editor-in-Chief A.B. Loskutov

EDITORIAL STAFF

A.B. Dar'enkov (associate Editor-in-Chief),
E.N. Sosnina (associate Editor-in-Chief), A.V. Shalukho (executive secretary),
V.I. Kazakova (executive editor), I.A. Lipuzhin (executive editor)

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:

Gennadiy Yakovlevich Vagin	Doctor of technical sciences, professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Nikolay Ivanovich Voropai	Associate member of RAS, doctor of technical sciences, professor, head of the chair INRTU (Irkutsk, Russia)
Leonid Abramovich German	Doctor of technical sciences, professor, professor SSTU Branch in Nizhny Novgorod (Nizhny Novgorod, Russia)
Valery Gennadievich Goldstein	Doctor of technical sciences, professor, professor SSTU (Samara, Russia)
Igor Vasilevich Gulyaev	Doctor of technical sciences, professor, professor MRSU (Saransk, Russia)
Anatoly Viktorovich Kuznetsov	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair USTU (Ulyanovsk, Russia)
Pavel Vladimirovich Ilyushin	Doctor of technical sciences, Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)
Alexander Leonidovich Kulikov	Doctor of technical sciences, associate professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Viktor Nikolaevich Mescheryakov	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair LSTU (Lipetsk, Russia)
Georgy Borisovich Onishchenko	Doctor of technical sciences, professor, scientific director LLC «STC Drive Technique» (Moscow, Russia)
Aleksandr Sergeevich Plekhov	Candidate of technical sciences, associate professor, associate professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Aleksandr Yur'evich Smirnov	Doctor of technical sciences, associate professor, leading design engineer JSC «Afrikantov OKBM» (Nizhny Novgorod, Russia)
Vladimir Georgievich Titov	Doctor of technical sciences, professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Oleg Stanislavovich Khvatov	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair FFEI HE «VSUWT» (Nizhny Novgorod, Russia)
Yuriy Ivanovich Khokhlov	Doctor of technical sciences, professor, professor FSAEIH SUSU (NRU) (Chelyabinsk, Russia)
Alexandr Ivanovich Chivenkov	Doctor of technical sciences, associate professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Roustiam Chakirov	Dr.-Ing., Prof. Dr., professor H-BRS (Germany)

*Electronic version:
<http://www.ie.nntu.ru>*

ISSN 2658-6754

*The certificate on registration of periodic printed editions
III № ФС77-81688 on 06 Aug., 2021*

© Nizhny Novgorod State Technical University
n.a. R.E. Alekseev, 2021

CONTENT

ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS	4
A.A. Loskutov, A.B. Loskutov, Yu.S. Shalnov. Analysis of power system 110 kV stability using small longitudinal compensation devices for overhead line.....	4
L.A. German, V.P. Goncharenko, A.A. Karabanov, A.V. Kovtun. Switchable compensation and filtration system on track sectioning cabin...	24
A.I. Ermolaev, V.I. Erofeev, A.S. Plekhov, D.Yu. Titov. Study of magnetic vibration occurring in induction motor using FEM simulation.....	38
O.N. Kuznetsov, D.A. Averyanov. Analysis of possibility of repeating Texas scenario in Russian power systems containing a significant share of renewable energy sources.....	57
O.A. Burmakin, V.V. Gulyaev, Yu.S. Malyshev, S.V. Popov. Simulation of ship power plant with built-in DC network in Matlab	75
D.A. Filatov, P.V. Terentyev, A.S. Polumordvinov. Study of operating modes of plant lighting systems for vertical farms with differentiated electricity tariff.....	85
E.L. Ryzhova. The use of virtual reality formats in training of personnel for electric power industry through computer simulation.....	95
POWER ENGINEERING	107
A.L. Kulikov, V.V. Vanyaev, A.B. Dar'enkov, A.V. Shahov. Backup power supply source with hydrogen fuel cell and lithium iron phosphate battery.....	107

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

№ 3

Редакторы: **В.И. Казакова, И.А. Липужин**
Технический редактор: **И.Н. Терентьева**

Редакция:

603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24
smart_electric@nttu.ru

Свободная цена

Подписано в печать 29.09.2021. Дата выхода в свет: 11.10.2021

Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Печать трафаретная. Усл. печ. л. 7,3. Тираж 300 экз. Заказ .

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексева. Типография НГТУ.

Адрес университета и полиграфического предприятия:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.