
4.3.2. ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ, ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

Научная статья

УДК 621.311.24

DOI: 10.53914/issn2071-2243_2023_2_145

EDN: PCGRUK

Использование матричного преобразователя переменного напряжения в мобильной ветроэлектрической установке

Дмитрий Николаевич Афоничев^{1✉}, Сергей Николаевич Пиляев²,
Владимир Викторович Васильев³

^{1, 2, 3}Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I,
Воронеж, Россия

¹dmafonichev@yandex.ru✉

Аннотация. Развитие современной силовой электроники позволяет значительно упростить структуру ветроэлектрической установки, заменяя громоздкую, сложную в управлении и дорогую цепь постоянного тока и классический инвертор прямым преобразованием переменного трехфазного напряжения синхронного генератора в переменное трехфазное напряжение стандартной частоты и амплитуды с помощью матричного преобразователя переменного напряжения. Достоинствами матричного преобразователя являются возможность получения практически синусоидальных напряжений и токов на выходе, а также более высокие коэффициенты мощности и полезного действия, чем при использовании промежуточного постоянного напряжения. В программном комплексе SimInTech разработана компьютерная модель матричного преобразователя напряжения ветроэлектрической установки. Она включает в себя блок, имитирующий генератор, который создает трехфазное напряжение заданной частоты и амплитуды; блок модели двунаправленных ключей преобразователя и блок реализации предложенного алгоритма управления ключами. Также в состав модели входят блок нагрузки и блоки фильтров на выходе и входе матричного преобразователя. Входными параметрами блока управления ключами преобразователя являются частота напряжения генератора, его амплитуда и мгновенное значение. Значение частоты напряжения может быть получено с помощью датчика вращения ротора генератора, мгновенное значение напряжения генератора определяется соответствующими измерительными приборами, а величина его амплитуды вычисляется управляющим контроллером либо выбирается по тарифической кривой генератора. Компьютерное моделирование показало, что кривые выходных токов и напряжений сохраняют свою форму в диапазоне частот входного напряжения от 42 до 70 Гц, что соответствует частотам вращения ротора генератора от 26,4 до 44 рад/с. Таким образом, преобразователь с предложенным алгоритмом управления его ключами обеспечивает получение напряжения на выходе со стандартными частотой и амплитудой напряжения.

Ключевые слова: ветроэлектрическая установка, синхронный генератор, матричный преобразователь, напряжение, ток, фаза, частота, моделирование

Для цитирования: Афоничев Д.Н., Пиляев С.Н., Васильев В.В. Использование матричного преобразователя переменного напряжения в мобильной ветроэлектрической установке // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2023. Т. 16, № 2(77). С. 145–156. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2023_2_145-156.

4.3.2. ELECTROTECHICS, ELECTRICAL EQUIPMENT AND ELECTRICAL POWER SUPPLY FOR AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX (ENGINEERING SCIENCES)

Original article

The use of an alternating current matrix converter in a mobile wind turbine generator system

Dmitry N. Afonichev^{1✉}, Sergey N. Pilyaev², Vladimir V. Vasiliev³

^{1, 2, 3}Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia

¹dmafonichev@yandex.ru✉

Abstract. The development of modern power electronics makes it possible to significantly simplify the structure of a wind turbine generator systems due to replacing cumbersome, difficult to control and expensive DC circuit, and a classic inverter by direct conversion of the alternating three-phase voltage of a synchronous generator into alternating three-phase voltage of standard frequency and amplitude using an alternating current matrix converter. The advantages of the matrix converter are the possibility of obtaining almost sinusoidal voltages and currents at the output, as well as higher power and efficiency coefficients than when using an intermediate DC current. A computer model of an alternating current matrix converter in a wind turbine generator system has been developed in the SimInTech software package. It includes block simulating generator that creates a three-phase voltage of a given frequency and amplitude; the block of the model of bidirectional keys of the converter and the block of implementation of the proposed key management algorithm. The model also includes: load block and filter blocks at the output and input of the matrix converter. The input parameters of the converter key management unit are the frequency of the generator voltage, its

amplitude and instantaneous value. The voltage frequency value can be obtained using the generator rotor rotational-velocity sensor, the instantaneous value of the generator voltage is determined by the appropriate measuring instruments, and its amplitude value can be calculated by the process controller, or selected by the calibration curve of the generator. Computer simulation has shown that the curves of output currents and voltages retain their shape in the frequency range of the input voltage from 42 to 70 Hz, which corresponds to the rotational frequencies of the generator rotor from 26.4 to 44 rad/s. Thus, the converter with the proposed key management algorithm provides the output voltage with the standard frequency and voltage amplitude.

Keywords: wind turbine generator system, synchronous generator, matrix converter, voltage, current, phase, frequency, simulation

For citation: Afonichev D.N., Pilyaev S.N., Vasiliev V.V. The use of an alternating current matrix converter in a mobile wind turbine generator system. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2023;16(2):145-156. (In Russ.). https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2023_2_145-156.

Введение

Использование силы ветра для производства электрической энергии является основным направлением технического прогресса в мире [2, 6, 8, 9, 10]. Во всех странах мира ведутся работы по производству и установке комплектного оборудования для ветроэлектростанций, однако все это оборудование предназначено для комплектации крупных стационарных ветропарков мощностью в несколько сотен мегаватт и более. В то же время в России довольно остро стоит проблема электроснабжения различных мелких потребителей, располагающихся на большом удалении от линий электропередач (пасек, помещений для сушки плодов и овощей, временных построек и сооружений (бараки и т. п.), объектов строительства, транспортных сооружений для дорожных работ, летних лагерей и лагерей для кочевого выпаса скота и др). Нагрузка таких потребителей может составлять десятки киловатт, а потребность в электроэнергии носит временный или сезонный характер, при этом их подключение к системам централизованного электроснабжения является весьма нерентабельным и нецелесообразным мероприятием, поскольку их местоположение может меняться каждый сезон. Поэтому автономное электроснабжение является актуальной проблемой для всех географических областей России и требует новых решений вопросов применения источников возобновляемой энергии в комбинации с привычными видами получения электрической энергии. Учитывая, что в нашей стране серийно не производится комплектное оборудование для обозначенных выше целей, то проблема создания мобильных сельскохозяйственных ветроэлектрических установок (ВЭУ) является актуальной в настоящее время.

Основным требованием к автономным ВЭУ является обеспечение их мобильности, то есть возможности быстрой сборки, разборки и транспортировки одним транспортным средством, а также высокой эффективности при относительно низкой стоимости производства и эксплуатации [2, 5].

ВЭУ является достаточно сложной системой, состоящей из ряда компонентов, технико-экономические показатели которой определяются прежде всего соответствующим выбором и согласованием параметров всех компонентов ВЭУ [1]. Типовая структура ВЭУ с синхронным генератором показана на рисунке 1.

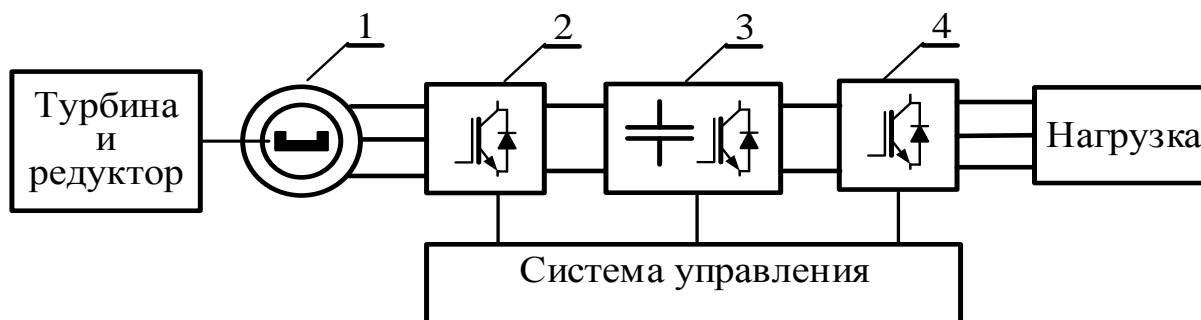


Рис. 1. Структура ВЭУ с синхронным генератором: 1 – синхронный генератор с возбуждением от постоянных магнитов; 2 – управляемый трехфазный выпрямитель; 3 – фильтр постоянного напряжения с регулятором постоянного напряжения (чоппером); 4 – инвертор

Основными компонентами любой ВЭУ являются: ветровая турбина, передаточный механизм (редуктор), электрический генератор и соответствующее электрооборудование для обеспечения стандартного качества электрической энергии [10]. В последние десятилетия в мире и в нашей стране серийно выпускается довольно большое количество тихоходных (многополюсных) синхронных генераторов с постоянными магнитами [8, 10], использование которых позволяет значительно упростить конструкцию передаточного механизма (редуктора) или совсем отказаться от применения повышающего редуктора, что особенно важно при использовании тихоходных ветровых турбин с вертикальной осью вращения [2, 8]. Таким образом, использование тихоходного синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов является наиболее предпочтительным для мобильной ВЭУ исходя из основных требований к ней.

Частота напряжения f , генерируемого синхронным генератором, жестко связана с частотой вращения его ротора ω_r :

$$\omega_r = \frac{2\pi f}{p}, \quad (1)$$

где π – число «пи», $\pi \approx 3,14$;

p – число пар полюсов генератора.

Амплитуда генерируемого напряжения определяется как частотой вращения ротора ω_r , так и величиной нагрузки. На рисунке 2 в качестве примера приведена кривая изменения амплитуды генерируемого напряжения десятиполюсного синхронного генератора номинальной мощностью 15 кВт при нагрузке мощностью в 4 кВт.

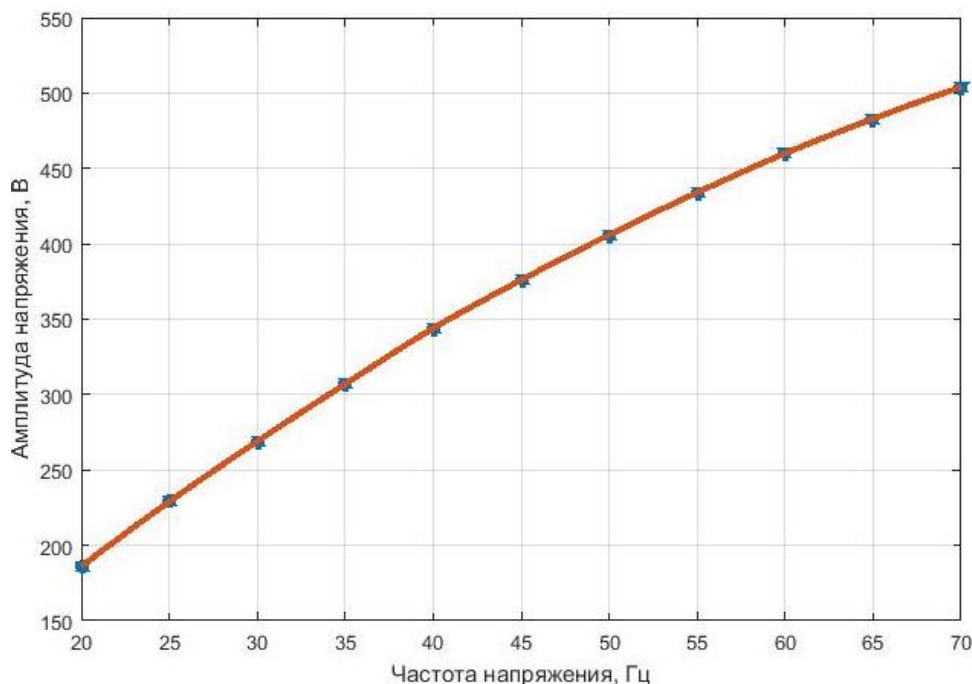


Рис. 2. График зависимости амплитуды выходного напряжения синхронного генератора с постоянными магнитами от частоты выходного напряжения

Из данных, приведенных на рисунке 2, видно, что обеспечить постоянную частоту и амплитуду напряжения генератора при изменении скорости ветра в больших пределах невозможно. Для получения стандартного, постоянного по амплитуде и частоте напряжения требуется преобразовывать переменное напряжение генератора в постоянное и наоборот, с помощью управляемого статического преобразователя (инвертора).

Методика исследования

Развитие современной силовой электроники позволяет значительно упростить структуру ВЭУ (рис. 1), заменяя громоздкую, сложную в управлении и дорогую цепь постоянного тока и классический инвертор прямым преобразованием переменного трехфазного напряжения синхронного генератора в переменное трехфазное напряжение стандартной частоты и амплитуды с помощью матричного преобразователя переменного напряжения [3, 7].

Матричный преобразователь переменного напряжения в простейшем виде состоит из девяти (3×3) двунаправленных переключателей, реализованных в виде IGBT-транзисторов с общим эмиттером, включенных разнонаправлено [3, 4, 7, 9] и способных подключать любую из трех фаз входного напряжения к любой из трех фаз нагрузки.

На рисунке 3, а представлена упрощенная схема матричного преобразователя, каждый из переключателей которого, замыкаясь по определенному алгоритму, формирует кривую напряжения выходной цепи из «кусочков» кривых входного напряжения.

Достоинствами матричного преобразователя является возможность получения практически синусоидальных напряжений и токов на выходе, а также более высокие коэффициент мощности и коэффициент полезного действия (КПД), чем при использовании промежуточного постоянного напряжения.

В настоящее время разработано достаточно большое количество разнообразных алгоритмов коммутации матричных преобразователей [3, 4, 7], которые можно классифицировать на две группы:

- скалярные;
- векторные.

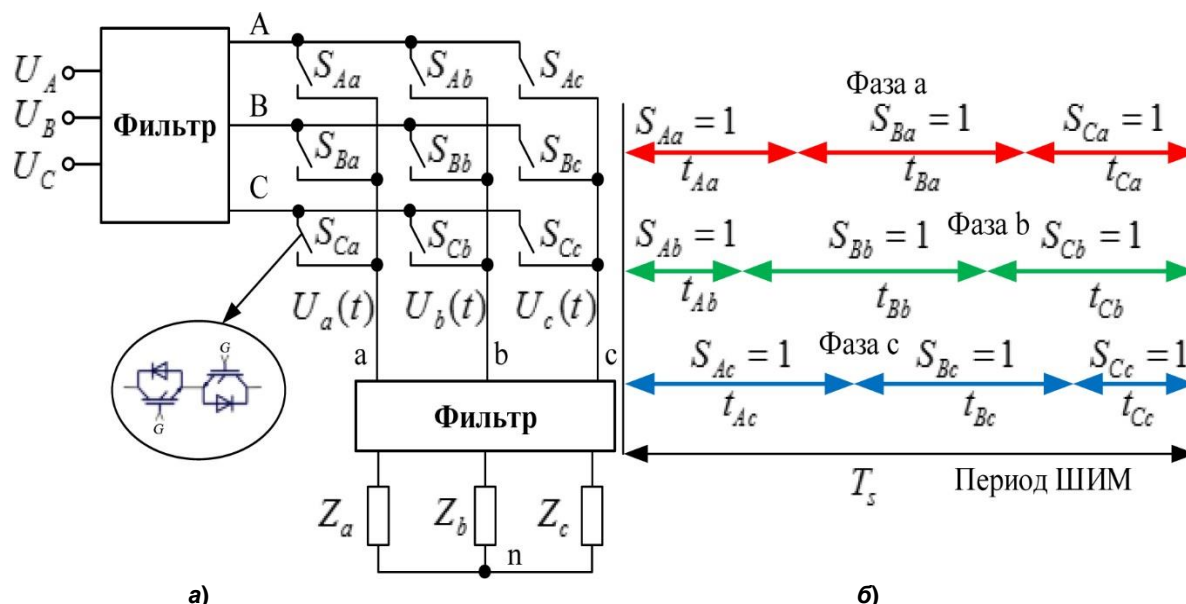


Рис. 3. Упрощенная схема матричного преобразователя (а) и примерная диаграмма работы ключей за период ШИМ (б)

Скалярные алгоритмы управления преобразователем по аналогии со скалярными методами управления электроприводами переменного тока характеризуются тем, что происходит преобразование переменного напряжения заданной частоты и амплитуды в напряжение другой частоты и амплитуды с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) при контроле параметров выходного напряжения.

Векторные алгоритмы управления матричным преобразователем позволяют напрямую управлять пространственным вектором выходного напряжения. Каждый из этих алгоритмов имеет свои достоинства и предпочтительные области применения исходя из вида нагрузки.

В случае ВЭУ предпочтительным является использование более простого скалярного алгоритма управления матричным преобразователем, который будем строить на основе оптимального метода Venturini [7]. Пусть каждый переключатель описывается логической функцией в соответствии с обозначениями, принятыми на рисунке 3, а. Логическая единица соответствует замкнутому состоянию переключателя, тогда связь между входными и выходными напряжениями и токами преобразователя имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} U_a(t) \\ U_b(t) \\ U_c(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} S_{Aa}(t) & S_{Ba}(t) & S_{Ca}(t) \\ S_{Ab}(t) & S_{Bb}(t) & S_{Cb}(t) \\ S_{Ac}(t) & S_{Bc}(t) & S_{Cc}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_A(t) \\ U_B(t) \\ U_C(t) \end{bmatrix}; \\ \begin{bmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} S_{Aa}(t) & S_{Ba}(t) & S_{Ca}(t) \\ S_{Ab}(t) & S_{Bb}(t) & S_{Cb}(t) \\ S_{Ac}(t) & S_{Bc}(t) & S_{Cc}(t) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $U_a(t), U_b(t), U_c(t), i_a(t), i_b(t), i_c(t)$ – мгновенные значения фазных напряжений (В) и токов (А) на выходе преобразователя;

$S_{ij}(t)$ – логические функции переключателей;

$U_A(t), U_B(t), U_C(t), i_A(t), i_B(t), i_C(t)$ – мгновенные значения фазных напряжений (В) и токов (А) на входе в матричный преобразователь;

T – транспонирование матрицы.

Результаты и их обсуждение

Управление матричным преобразователем должно соответствовать двум основным правилам.

Во-первых, любые две входные фазы никогда не должны быть подключены к одной и той же выходной линии (фазе) во избежание короткого замыкания.

Во-вторых, выходная фаза никогда не должна быть замкнута сама на себя из-за отсутствия пути для индуктивного тока нагрузки, что может привести к появлению перенапряжения. Эти два ограничения сводятся к следующему условию коммутации ключей – сумма логических переменных каждой строчки матрицы в выражении (2) равна логической единице

$$S_{Ai}(t) + S_{Bi}(t) + S_{Ci}(t) = 1, i \in \{a, b, c\}. \quad (3)$$

Поскольку принцип действия матричного преобразователя основан на том, что высокочастотные импульсы напряжения, вырезаемые ШИМ из кривых трехфазного входного напряжения амплитудой U_{mi} и частотой f_i , должны собираться в кривые трехфазного напряжения другой амплитуды U_{mo} и частоты f_o , то время замыкания каждого ключа преобразователя (рис. 3, а) является переменной на каждом периоде коммутации, как это показано на рисунке 3, б.

Примем в качестве коэффициента модуляции каждого ключа $m_{ij}(t)$ отношение времени его замыкания в каждом периоде модуляции t_{ij} (рис. 3, б) к периоду ШИМ T_s :

$$m_{ij}(t) = \frac{t_{ij}}{T_s}, \quad i \in \{A, B, C\}, \quad j \in \{a, b, c\}. \quad (4)$$

Отсюда преобразования выражения (2) могут быть представлены через модуляционную матрицу ключей $[M]$ следующим образом:

$$[U_o] = \begin{bmatrix} U_a(t) \\ U_b(t) \\ U_c(t) \end{bmatrix}; [U_i] = \begin{bmatrix} U_A(t) \\ U_B(t) \\ U_C(t) \end{bmatrix}; [i_o] = \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix}; [i_i] = \begin{bmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$[M] = \begin{bmatrix} m_{Aa}(t) & m_{Ba}(t) & m_{Ca}(t) \\ m_{Ab}(t) & m_{Bb}(t) & m_{Cb}(t) \\ m_{Ac}(t) & m_{Bc}(t) & m_{Cc}(t) \end{bmatrix}; [U_o] = [M][U_i]; [i_i] = [M]^T [i_o].$$

Пусть входные фазные напряжения и выходные токи заданы в виде:

$$[U_i] = \begin{bmatrix} U_A(t) \\ U_B(t) \\ U_C(t) \end{bmatrix} = U_{mi} \begin{bmatrix} \cos(\omega_i t) \\ \cos(\omega_i t - 2\pi/3) \\ \cos(\omega_i t - 4\pi/3) \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$$[i_o] = \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} = I_{mo} \begin{bmatrix} \cos(\omega_o t + \varphi_o) \\ \cos(\omega_o t + \varphi_o - 2\pi/3) \\ \cos(\omega_o t + \varphi_o - 4\pi/3) \end{bmatrix},$$

где U_{mi} – амплитуда входного напряжения, В;

I_{mo} – амплитуда выходного тока, А;

ω_i, ω_o – угловые частоты входного и выходного напряжений, рад/с;

φ_o – фазовый угол сдвига выходного тока, рад.

Согласно выражению (4) задаваемые выходное напряжение и входной ток определяются через матрицу модуляции следующим образом:

$$[U_o] = [M][U_i] = qU_{mi} \begin{bmatrix} \cos(\omega_o t) \\ \cos(\omega_o t - 2\pi/3) \\ \cos(\omega_o t - 4\pi/3) \end{bmatrix}; \quad (7)$$

$$[i_i] = [M]^T [i_o] = q \frac{\cos \varphi_o}{\cos \varphi_i} \begin{bmatrix} \cos(\omega_i t + \varphi_i) \\ \cos(\omega_i t + \varphi_i - 2\pi/3) \\ \cos(\omega_i t + \varphi_i - 4\pi/3) \end{bmatrix},$$

где $q = U_{mi} / U_{mo}$ – коэффициент передачи по амплитуде напряжения;

φ_i – фазовый угол сдвига тока на входе, рад.

Классический метод Venturini получения модуляционной матрицы ограничивает амплитуду выходного напряжения половиной от входного ($q = 0,5$) [7]. Для обеспечения максимально возможного для матричных преобразователей коэффициента передачи $q = 0,866$ [7] добавим к задаваемому целевому напряжению третью гармонику входной частоты и вычтем третью гармонику выходной частоты

$$[U_o] = qU_{mi} \begin{bmatrix} \cos(\omega_o t) - \frac{1}{6} \cos(\omega_o t) + \frac{1}{2\sqrt{3}} \cos(\omega_i t) \\ \cos(\omega_o t + \frac{4\pi}{3}) - \frac{1}{6} \cos(\omega_o t) + \frac{1}{2\sqrt{3}} \cos(\omega_i t) \\ \cos(\omega_o t + \frac{2\pi}{3}) - \frac{1}{6} \cos(\omega_o t) + \frac{1}{2\sqrt{3}} \cos(\omega_i t) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Введение третьих гармоник в кривую заданного вторичного напряжения не влияет на синусоидальный характер полученного напряжения каждой фазы нагрузки. Если фазовый угол сдвига тока на входе $\varphi_i = 0$, то каждый элемент модуляционной матрицы может быть определен в упрощенном виде следующим образом

$$m_{kj} = \frac{1}{3} + \frac{2U_k U_j}{3U_{mi}^2} + \frac{4q}{9} \sin(\omega_i t + \beta_k) \sin(3\omega_i t),$$

$$k \in \{A, B, C\}, j \in \{a, b, c\}, \beta_k \in \left\{0, \frac{2\pi}{3}, \frac{4\pi}{3}\right\}.$$

Время замыкания каждого ключа преобразователя t_{Kj} определяется согласно зависимости (4)

$$t_{Kj} = T_s m_{Kj}. \quad (10)$$

На рисунке 4 представлена построенная в программном комплексе SimInTech [1, 5] компьютерная модель матричного преобразователя напряжения ВЭУ.

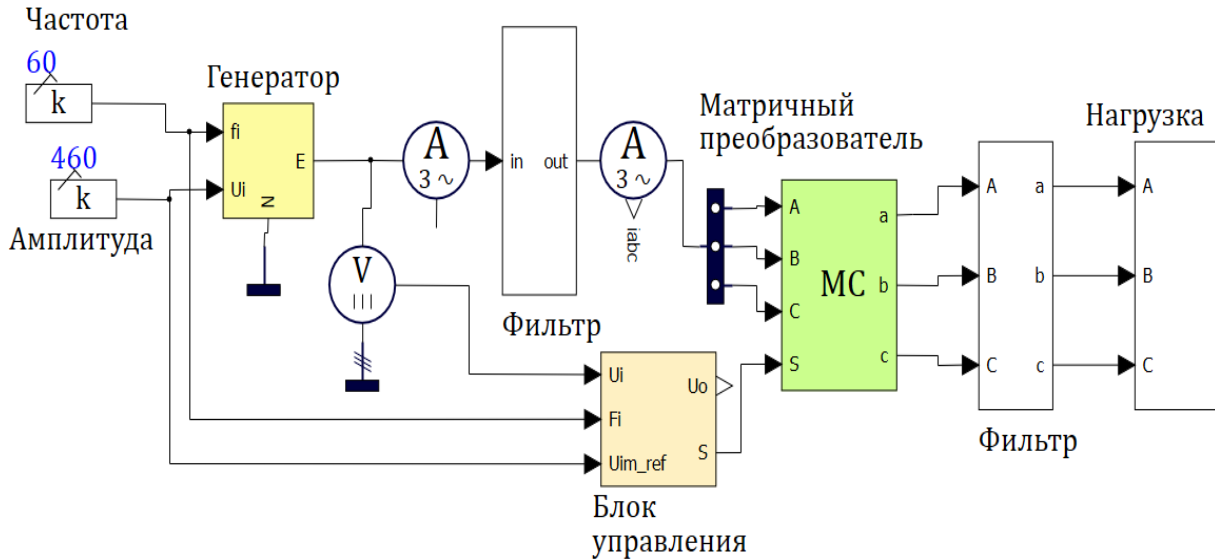


Рис. 4. Компьютерная модель матричного преобразователя в программе SimInTech

Компьютерная модель матричного преобразователя напряжения включает в себя:

- блок, имитирующий генератор, который создает трехфазное напряжение заданной частоты и амплитуды;
- блок модели двунаправленных ключей преобразователя (рис. 5, а)
- блок реализации алгоритма управления ключами согласно выражениям (9) и (10) (рис. 5, б).

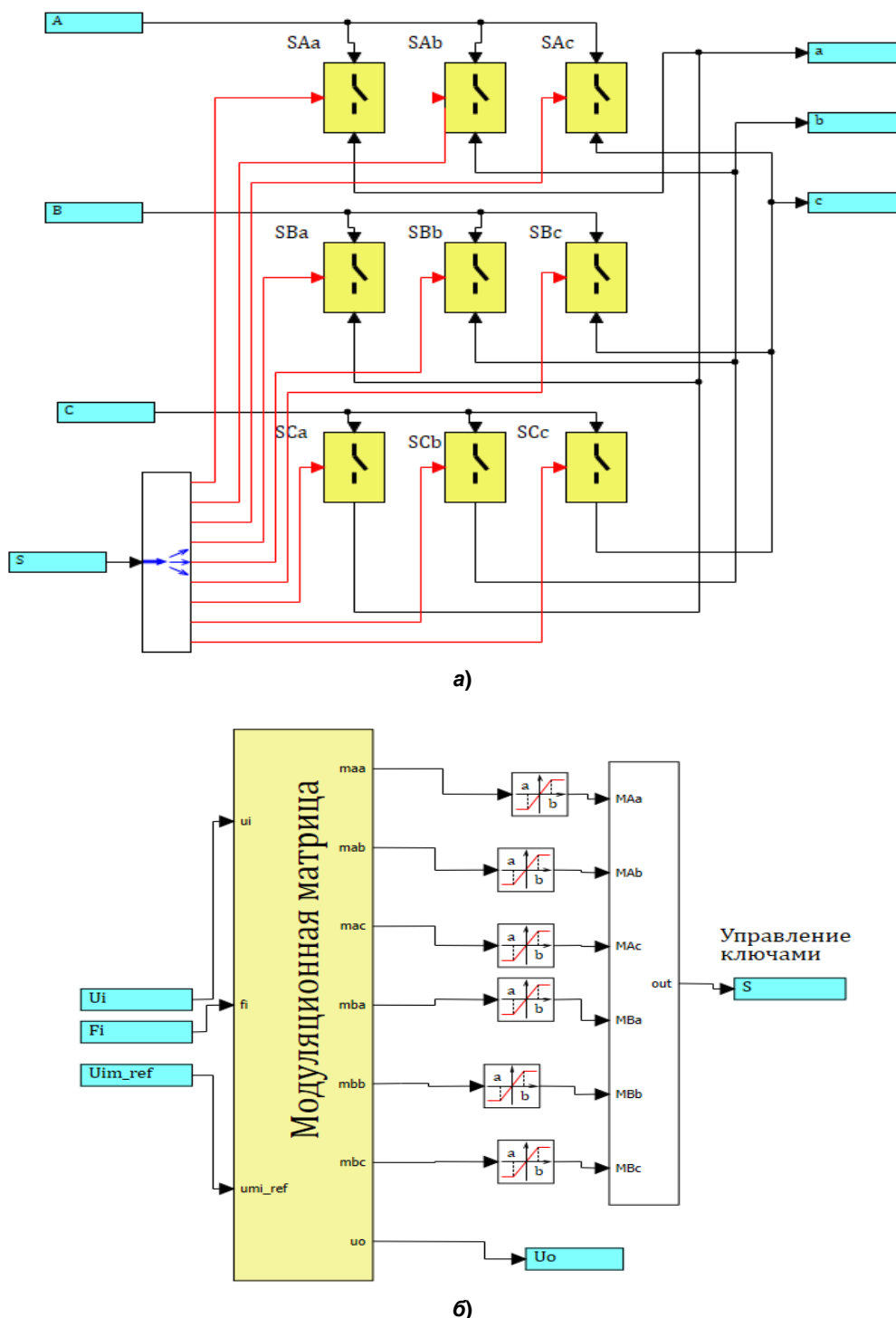


Рис. 5. Модели блока ключей (а) и блока управления ключами преобразователя (б)

Кроме того, в состав модели входят:

- блок нагрузки, представленный на рисунке 6, а;
 - блоки фильтров на выходе и входе матричного преобразователя.
- Схемы фильтров идентичны и отличаются только параметрами.

На рисунке 6, б в качестве примера показана модель входного фильтра.

Входными параметрами блока управления ключами преобразователя являются частота напряжения генератора, его амплитуда, и мгновенное значение. Значение частоты напряжения может быть получено с помощью датчика вращения ротора генера-

тора, учитывая их жесткую связь согласно выражению (1). Мгновенное значение напряжения генератора определяется соответствующими измерительными приборами, а величина его амплитуды вычисляется управляющим контроллером либо выбирается по тарировочной кривой генератора.

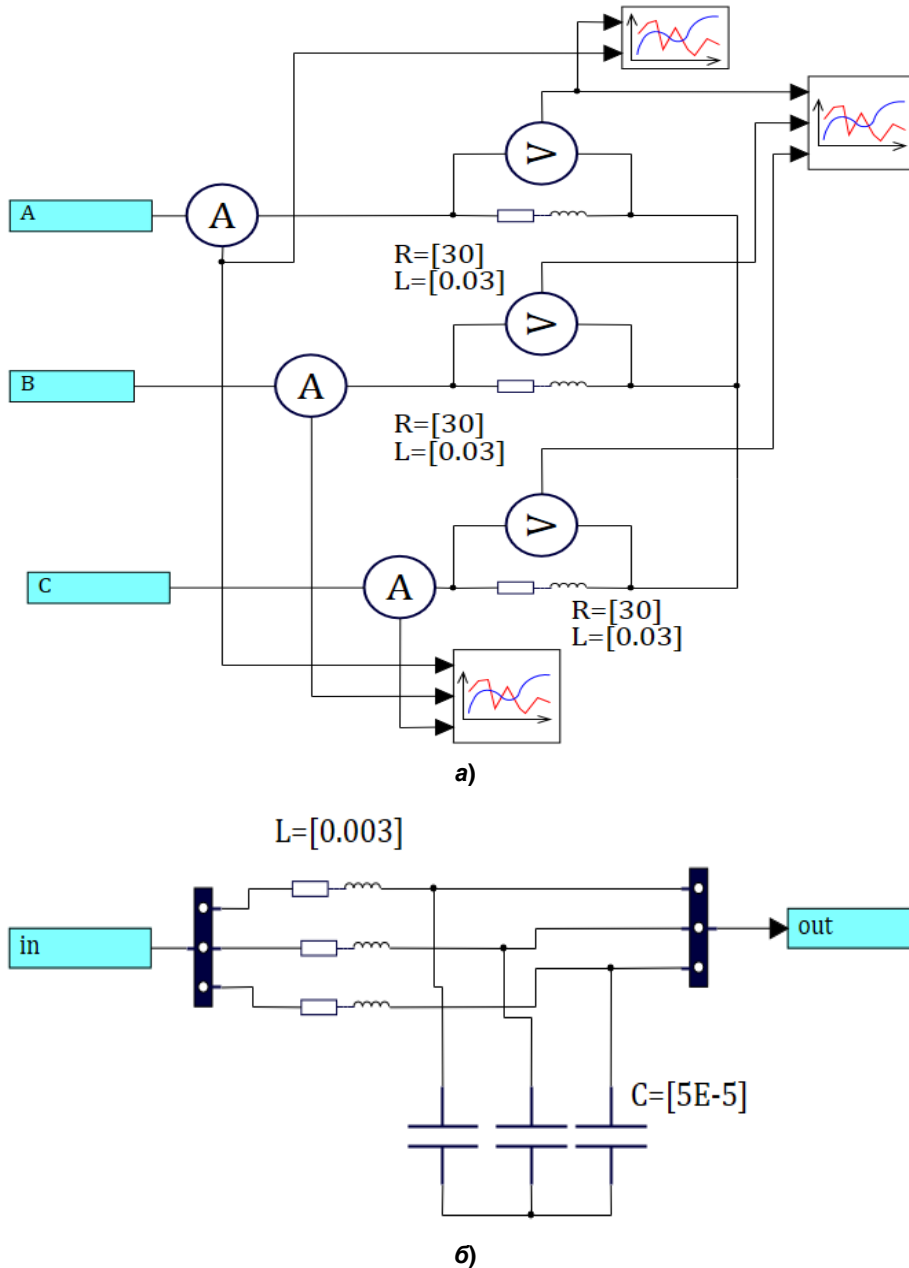


Рис. 6. Модели блока нагрузки (а) и блока входного фильтра (б)

Поскольку основным предназначением матричного преобразователя является получение стандартного трехфазного напряжения, то в блоке построения модуляционной матрицы (рис. 5, б) коэффициент передачи по напряжению вычисляется следующим образом:

$$q = \frac{\sqrt{2}U_{ms}}{U_{mi}}, \quad (11)$$

где U_{ms} – стандартное действующее значение амплитуды фазного напряжения, $U_{ms} = 220$ В.

На рисунке 7 показаны кривые напряжений и токов на входе и выходе матричного преобразователя при частоте входного напряжения 60 Гц и амплитуде 460 В (в соответствии с кривой, приведенной на рисунке 2 при частоте ШИМ 10 кГц).

Компьютерное моделирование показало, что кривые выходных токов и напряжений сохраняют свою форму в диапазоне частот входного напряжения от 42 до 70 Гц, что соответствует частотам вращения ротора генератора от 26,4 до 44 рад/с.

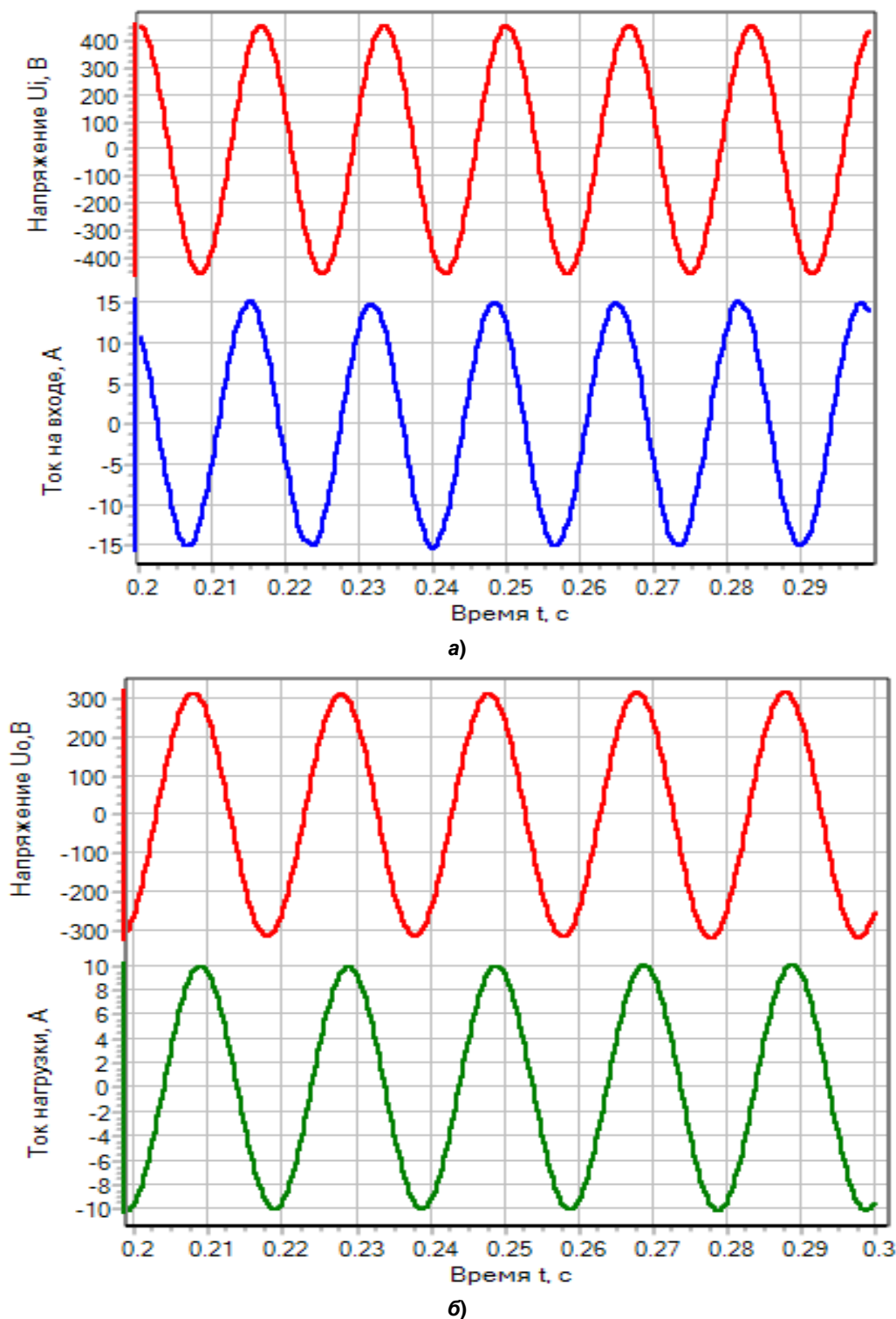


Рис. 7. Кривые напряжения и тока на входе (а) в матричный преобразователь и на входе (б) при частоте входного напряжения 60 Гц и амплитуде 460 В

Выводы

1. Матричный преобразователь переменного напряжения с предложенным алгоритмом управления может быть с успехом использован в мобильных ВЭУ малой мощности. Входными параметрами блока управления ключами преобразователя являются частота напряжения генератора, его амплитуда и мгновенное значение. Значение частоты напряжения может быть получено с помощью датчика вращения ротора генератора, мгновенное значение напряжения генератора определяется соответствующими измерительными приборами, а величина его амплитуды вычисляется управляющим контроллером либо выбирается по тарировочной кривой генератора.

2. Реализация модели матричного преобразователя показала, что преобразователь с предложенным алгоритмом управления его ключами обеспечивает получение напряжения на выходе со стандартными частотой и амплитудой напряжения.

3. Разработанная компьютерная модель может быть использована при проектировании мобильных ВЭУ малой мощности. Программный продукт SimInTech позволяет преобразовать модель блока управления преобразователем в программу для микроконтроллера на языке Си, значительно упрощая реализацию схемного решения матричного преобразователя.

Список источников

1. Афоничев Д.Н., Пиляев С.Н. Моделирование автономной ветроэлектрической установки в программе SimInTech // Тенденции развития технических средств и технологий в АПК: материалы международной научно-практической конференции; в 2 ч. (Воронеж, 25 февраля 2021 г.). Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2021. Ч. 2. С. 113–119.
2. Денисенко Е.А. Автономные системы электроснабжения: монография. Краснодар: ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ, 2019. 130 с.
3. Калачев Ю.Н., Александров А.Г. Преобразователи автономных источников электроэнергии. SimInTech. Москва: ДМК Пресс, 2021. 80 с.
4. Музипов Х.Н. Программно-технические комплексы автоматизированных систем управления: учебное пособие. Санкт-Петербург: Лань, 2018. 164 с.
5. Пиляев С.Н., Панов Р.М., Афоничев Д.Н. Обоснование требований к мобильным ветроэлектрическим установкам для автономного электроснабжения сельскохозяйственных потребителей // Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции – новые технологии и техника нового поколения для АПК: сборник научных докладов XX международной научно-практической конференции (Тамбов, 26–27 сентября 2019 г.) Тамбов: Изд-во «Студия печати Галины Золотовой», 2019. С. 185–187.
6. Bose B.K. Power electronics in renewable energy systems and smart grid. Technology and Applications. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2019. 752 p.
7. Luo F.L., Ye H. Power Electronics. Advanced Conversion Technologies. 2nd edition. CRC Press, 2018. 735 p.
8. Nelson V., Starcher K. Wind Energy Renewable Energy and the Environment. 3rd edition. CRC Press. Taylor & Francis Group, 2019. 310 p.
9. Ramesh B.N. Smart grid systems. Modeling and Control. 1st edition. Apple Academic Press, Inc., 2017. 308 p.
10. Shepherd W., Zhang L. Electricity generation using wind power. 2nd edition. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2017. 300 p.

References

1. Afonichev D.N., Pilyaev S.N. Modelirovanie avtonomnoj vetroelektricheskoy ustanovki v programme SimInTech [Simulation of a stand-alone wind unit in SimInTech software]. Tendentsii razvitiya tekhnicheskikh sredstv i tekhnologiy v APK: materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii; v 2 ch. (Voronezh, 25 fevralya 2021 g.) [Trends in the development of technical means and technologies in the Agro-Industrial Complex: Proceedings of the International Research-to-Practice Conference; in 2 volumes (Voronezh, February 25, 2021). Voronezh: Voronezh State Agrarian University Press. 2021;2:113-119. (In Russ.).
2. Denisenko E.A. Avtonomnye sistemy elektrosnabzheniya: monografiya [Autonomous power supply systems: monograph]. Krasnodar: Kuban State Agrarian University Press; 2019. 130 p. (In Russ.).
3. Kalachev Yu.N., Aleksandrov A.G. Preobrazovateli avtonomnykh istochnikov elektroenergii. SimInTech [Converters of autonomous power sources. SimInTech]. Moscow: DMK Press; 2021. 80 p. (In Russ.).
4. Muzipov H.N. Programmno-tekhnicheskie komplekсы avtomatizirovannykh sistem upravleniya [Software and hardware complexes of automated control systems]. Saint Petersburg: Lan' Press; 2018. 164 p. (In Russ.).
5. Pilyaev S.N., Panov R.M., Afonichev D.N. Obosnovanie trebovanij k mobil'nym vetroelektricheskim ustanovkam dlya avtonomnogo elektrosnabzheniya sel'skokhozyajstvennykh potrebitelej [Substantiation of requirements for mobile wind power installations for autonomous power supply of agricultural consumers]. Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya resursov pri proizvodstve sel'skokhozyajstvennoj produktsii – novye tekhnologii i tekhnika novogo pokoleniya dlya APK: sbornik nauchnykh dokladov XX mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii (Tambov, 26-27 sentyabrya 2019 g.) [Improving the efficiency of the use of resources at producing agricultural products. New technologies and equipment of a new generation for the Agro-Industrial Complex: collection of scientific papers of the XX International Research-to-Practice Conference (Tambov, September 26-27, 2019)]. Tambov: Galina Zolotova Printing Studio; 2019:185-187. (In Russ.).
6. Bose B.K. Power electronics in renewable energy systems and smart grid. Technology and Applications. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.; 2019. 752 p.
7. Luo F.L., Ye H. Power Electronics. Advanced Conversion Technologies. 2nd edition. CRC Press; 2018. 735 p.
8. Nelson V., Starcher K. Wind Energy Renewable Energy and the Environment. 3rd edition. CRC Press. Taylor & Francis Group; 2019. 310 p.
9. Ramesh B.N. Smart grid systems. Modeling and Control. 1st edition. Apple Academic Press, Inc.; 2017. 308 p.
10. Shepherd W., Zhang L. Electricity generation using wind power. 2nd edition. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd; 2017. 300 p.

Информация об авторах

Д.Н. Афоничев – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электротехники и автоматики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», dmafonichev@yandex.ru.

С.Н. Пиляев – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электротехники и автоматики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», pilyaevs@mail.ru.

В.В. Васильев – кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации транспортных и технологических машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», vasiliev.vladimir87@mail.ru.

Information about the authors

D.N. Afonichev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, dmafonichev@yandex.ru.

S.N. Pilyaev, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, pilyaevs@mail.ru.

V.V. Vasiliev, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Operation of Transport and Technological Machines, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, vasiliev.vladimir87@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 20.05.2023; одобрена после рецензирования 22.06.2023; принята к публикации 24.06.2023.

The article was submitted 20.05.2023; approved after reviewing 22.06.2023; accepted for publication 24.06.2023.

© Афоничев Д.Н., Пиляев С.Н., Васильев В.В., 2023