

Научная статья
УДК 004.9:62-83:621.313.3
DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-46-58

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ С ПРОСТРАНСТВЕННО-ВЕКТОРНОЙ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Никита Юрьевич Саввин^{1✉}, Дмитрий Денисович Гарбузов²

^{1,2} Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, Белгород, Россия

¹ n-savvin@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-6379-6825>

² BSTU-Belgorod@yandex.ru

Аннотация. Представлены этапы разработки и построения математической модели полупроводникового преобразователя частоты с пространственно-векторной широтно-импульсной модуляцией, включающей силовую цепь на основе силовых полупроводниковых элементов, в программной среде математического моделирования MATLAB/Simulink. Сформулированы основные принципы работы составляющих элементов модели и приведены расчетные данные для построения функциональной системы управления силовыми ключами преобразователя частоты на основании диаграмм переключения. По результатам моделирования получены осциллограммы фазных и линейных напряжений на нагрузке. Выявлены зависимости качества выходного напряжения от частоты широтно-импульсной модуляции, сформулированы основные преимущества использования пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции при формировании синусоид выходного напряжения преобразователя частоты при работе на активно-индуктивную нагрузку, сделаны выводы о применимости векторного метода формирования выходного напряжения преобразователя частоты в промышленности.

Ключевые слова: преобразователь частоты, широтно-импульсная модуляция, транзистор, автономный инвертор напряжения

Благодарности: авторы благодарят за предоставление оборудования на базе Центра высоких технологий Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова.

Для цитирования: Саввин Н. Ю., Гарбузов Д. Д. Математическое моделирование преобразователя частоты с пространственно-векторной широтно-импульсной модуляцией // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 2. С. 46–58. DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-46-58.

Original article

MATHEMATICAL SIMULATION OF FREQUENCY CONVERTER WITH SPACE VECTOR PULSE WIDTH MODULATION

Nikita Yu. Savvin^{1✉}, Dmitry D. Garbuzov²

^{1,2} Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russia

¹ n-savvin@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-6379-6825>

² BSTU-Belgorod@yandex.ru

Abstract. The article presents the stages of developing and building a mathematical model for a semiconductor frequency converter with space vector pulse width modulation, which consists of a power circuit made of power semiconductor elements. The mathematical simulation is performed in the MATLAB/Simulink software environment. The main principles of the model's components performance are formulated. Using switching diagrams, calculated data for building a functional management system for the power keys of a frequency converter are presented. Based on the simulation results, oscillography records of phase and linear load voltages are obtained. Dependences of output voltage quality on the frequency of pulse width modulation are identified. The main advantages of using space vector pulse width modulation are described in designing sinusoids of output voltage in a frequency converter when working with an active inductive load. The authors draw conclusions on the usage of the vector method for building an output voltage of a frequency converter in the industry.

Keywords: frequency converter, pulse width modulation, transistor, self-excited voltage inverter

Acknowledgments: the authors are grateful to the Center of High Technologies of the Belgorod State Technical University named after V. G. Shukhov for research equipment.

For citation: Savvin N. Yu., Garbuzov D. D. Mathematical simulation of frequency converter with space vector pulse width modulation. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(2):46–58. DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-46-58.

ВВЕДЕНИЕ

Поиск оптимальных методов управления электрическими двигателями является актуальной и важной задачей, решение которой позволит повысить энергоэффективность, стабилизировать режим работы и продлить срок службы электродвигателей, входящих в состав электроприводов различного назначения.

Особый интерес представляет работа [1] с полноценно описанными основами оптимизированных регулируемых электроприводов переменного тока по энергетическим критериям, математическими моделями силовой части электроприводов для задач управления и оптимизации, методикой сравнительной оценки энергетической эффективности режимов и их реализации в регулируемых электроприводах, а также результатами математического моделирования, однако без анализа выходных характеристик при использовании преобразователя частоты с пространственно-векторной широтно-импульсной модуляцией (ШИМ).

В работе [2] выполнен сравнительный анализ векторного и синусоидального алгоритмов ШИМ в стандартных (распространенных) случаях.

Моделирование является универсальным методом прогнозирования любых технологических процессов: энергетических, теплообменных, химических и т. д. В этом аспекте интерес представляет работа по моделированию оригинальных теплообменных поверхностей, выполненная на базе Центра высоких технологий Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова [3].

Активно развивающаяся и внедряемая в различные отрасли промышленности и производства микропроцессорная техника обладает широкими возможностями в области управления силовыми полупроводниковыми устройствами, входящими в состав преобразователей частоты (ПЧ) [4]. Частотно-регулируемые электроприводы на основе ПЧ явля-

ются наиболее эффективными, по сравнению с нерегулируемыми электроприводами, а исследования в области повышения производительности ПЧ могут лечь в основу высокоэффективной системы управления, учитывающей обширный ряд физических процессов, лежащих в основе регулирования электрических двигателей [5]. Обстоятельный анализ работы ПЧ и алгоритмов формирования сигналов управления силовыми полупроводниковыми ключами – IGBT-транзисторами, уделено в [6].

В [7] дано исчерпывающее представление выходных напряжений трехфазного инвертора в системе пространственных векторов, когда напряжение формируется пространственным вектором определенной величины и угла на комплексной плоскости. По нашему мнению, данный метод формирования выходного напряжения использует принципы пространственно-векторной ШИМ и может быть положен в основу дальнейших исследований в области формирования точной математической модели ПЧ с векторной ШИМ, позволяющей оценить эффективность данной системы и предложить методы ее совершенствования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалом для исследования послужили теоретические основы и принципы, используемые для описания физических процессов и закономерностей, присущих системе формирования пространственно-векторной ШИМ.

Математическое моделирование является важнейшим инструментом для исследования физических процессов, формирования и проверки алгоритмов управления автоматизированных систем управления без необходимости построения физической модели.

В качестве среды разработки и математического моделирования был выбран программный комплекс MATLAB/Simulink, обладающий широкими возможностями и высокой точностью выходных данных.

Для понимания принципов реализации математической модели необходимо рассмотреть методику формирования синусоидальных напряжений на выходе ПЧ. Формирование синусоид выходного напряжения происходит посредством автономного инвертора напряжения (АИН) [8] (рис. 1).

АИН ПЧ включает в себя 6 IGBT-транзисторов, которые можно разделить на 2

группы – верхнюю и нижнюю. Система управления должна быть спроектирована так, чтобы обеспечивать верные комбинации переключения ключей для корректного формирования выходного напряжения на выходе ПЧ. Для задания верных комбинаций включения ключей необходимо спроектировать систему формирования ШИМ-сигналов из входных синусоидальных напряжений фаз А, В и С [9].

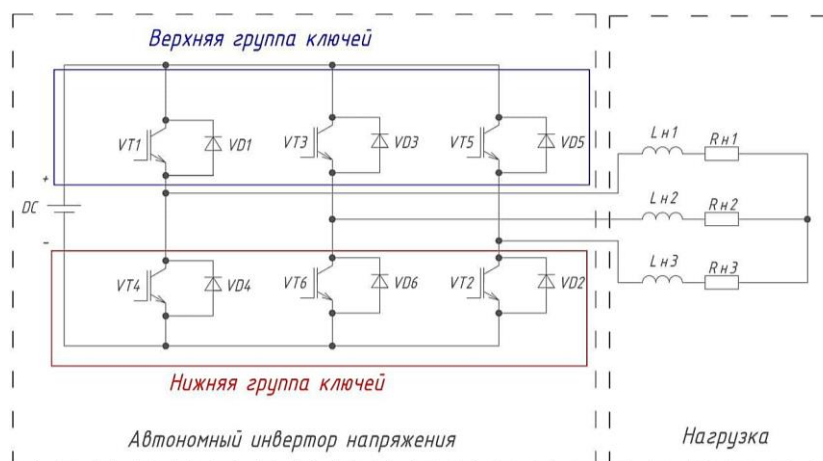


Рис. 1. Принципиальная схема АИН преобразователя частоты

Примечание: составлено авторами.

Построение блока формирования ШИМ в среде MATLAB/Simulink приведено на рис. 2. В данном блоке на синусоиды питающих фаз накладывается напряжение пилообразной формы. Далее посредством логических эле-

ментов ШИМ-сигнал подается на выходы “PWM Builder”, подключенные к силовым ключам. На входы Sine 1/2/3 блока “PWM Builder” подается напряжение синусоидальной формы.

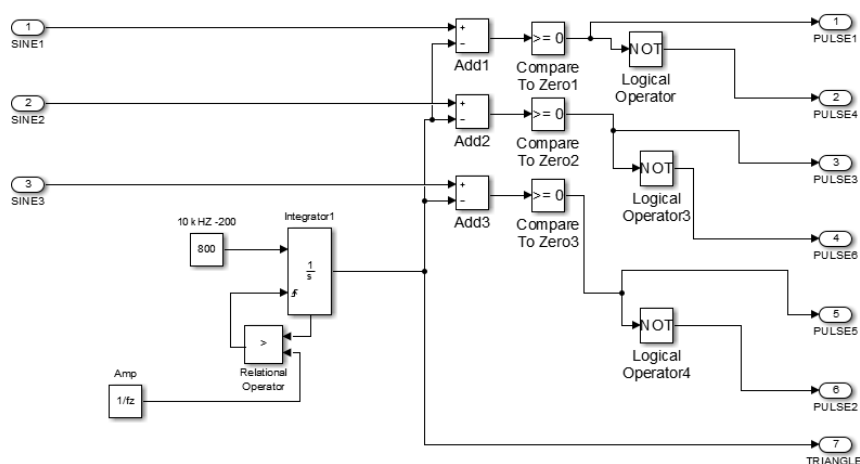


Рис. 2. Блок формирования ШИМ в ПЧ

Примечание: составлено авторами.

В отличие от синусоидальной ШИМ система пространственно-векторной ШИМ позволяет вычислить не мгновенные значения

напряжений, прикладываемых к обмоткам, а моменты подключения обмоток к силовому мосту с целью формирования заданного век-

тора напряжения. Анализируя схему АИН (рис. 1), можно сделать выводы, что существует только 8 комбинаций включения силовых транзисторов (из них две – нулевые),

характеризующихся определенным вектором, которые образуют правильный шестиугольник (рис. 3).

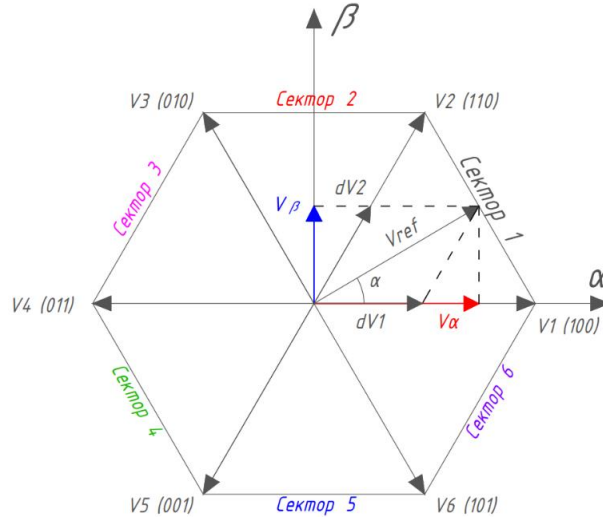


Рис. 3. Система векторов напряжений
Примечание: составлено авторами.

Данный шестиугольник можно разделить на 6 секторов, образованных системой векторов напряжения и сдвинутых относительно друг друга на угол 60° . При этом формирование импульсов в каждой фазе ПЧ происходит

при переходе вектора напряжения из одного сектора в другой. Комбинации включения ключей на примере верхней группы и уровни напряжений в фазах А, В и С на выходе АИН приведены в табл. 1.

Таблица 1

Комбинации переключения силовых ключей автономного инвертора напряжения

Вектор	VT1	VT3	VT5	Va	Vb	Vc
V1	1	0	0	2/3	-1/3	-1/3
V2	1	1	0	1/3	1/3	-2/3
V3	0	1	0	-1/3	2/3	-1/3
V4	0	1	1	-2/3	1/3	1/3
V5	0	0	1	-1/3	-1/3	2/3
V6	1	0	1	1/3	-2/3	1/3

Примечание: составлено авторами.

Работа ключей нижней группы происходит в инверсном режиме, т. е. когда ключ VT1 включен, ключ VT4 выключен, что справедливо и для других пар ключей верхней и нижней группы.

Для формирования вектора напряжений необходимо произвести преобразование из неподвижной трехфазной в двухфазную систему координат α и β . Данный тип преобразований известен как преобразование Парка [10].

Преобразование Парка для векторов напряжений выполняется по формулам (1, 2).

$$\vec{V}_\alpha = \frac{2}{3} \times \left[1 - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \right] \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\vec{V}_\beta = \frac{2}{3} \times \left[0 \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} \right] \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}. \quad (2)$$

V_{ref} – вектор опорного напряжения, формирующийся из векторов V_α и V_β (3):

$$|\vec{V_{ref}}| = \sqrt{\vec{V_{\alpha}}^2 + \vec{V_{\beta}}^2}. \quad (3)$$

$$\alpha = \arctan \frac{|\vec{V_{\alpha}}|}{|\vec{V_{\beta}}|}. \quad (4)$$

Для отслеживания положение вектора V_{ref} в пространстве используется угол между V_{ref} и осью α (4):

Таким образом можно сформировать блок преобразования трехфазной системы координат A, B, C в систему координат α и β (рис. 4).

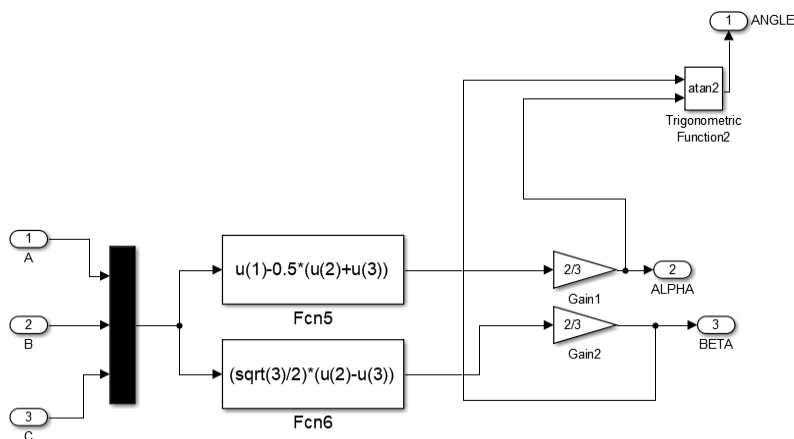


Рис. 4. Структура блока преобразования координат (Coordinate Transformer)

Примечание: составлено авторами.

Блоки Fcn5 и Fcn6 содержат функции, реализующие преобразования Парка. Угол α формируется путем нахождения арктангенса

отношения модуля $\vec{V_{\alpha}}$ к модулю $\vec{V_{\beta}}$. Осциллограммы, полученные в результате работы Coordinate Transformer, представлены на рис. 5–7.

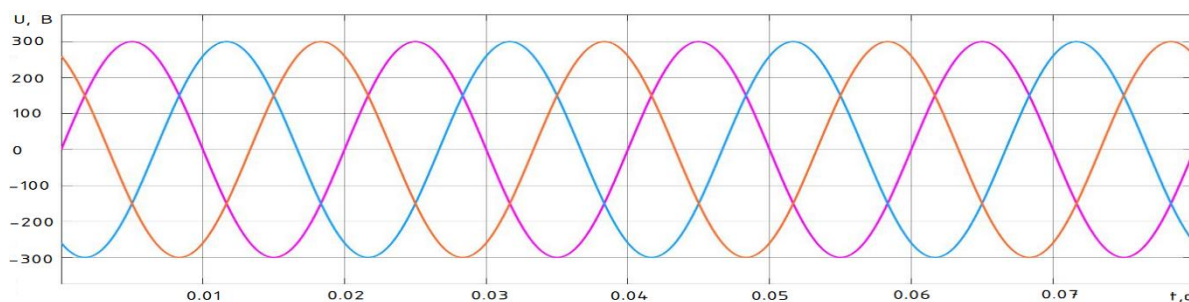


Рис. 5. Трехфазная система на входе блока Coordinate Transformer

Примечание: составлено авторами.

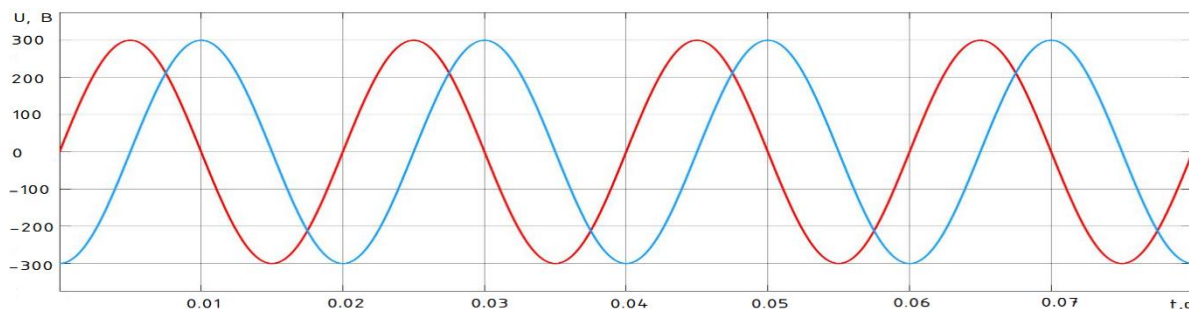


Рис. 6. Двухфазная система на выходе блока Coordinate Transformer

Примечание: составлено авторами.

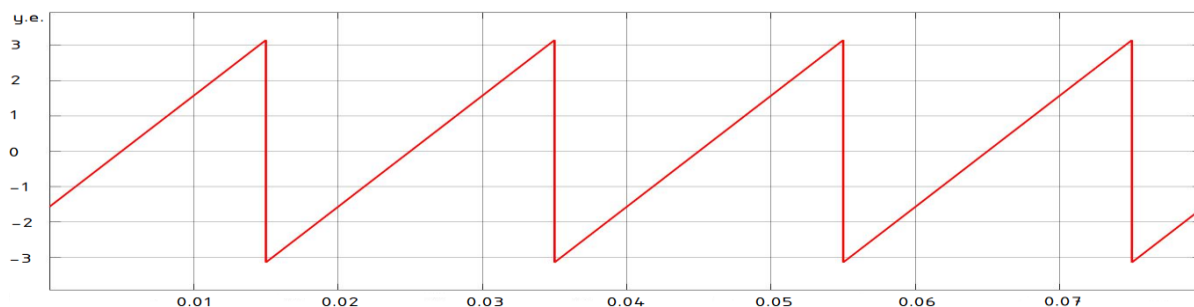


Рис. 7. Осциллограмма формирования угла α
Примечание: составлено авторами.

После вычисления положения вектора опорного напряжения относительно системы координат α и β необходимо определить сектор, в котором находится $\vec{V}_{ref}$ в ходе своего перемещения. Методика определения сектора

сводится к сравнению значения угла α с углами, образованными двумя векторами напряжений, формирующих сектор. Данную операцию реализует блок Sector Constructor (рис. 8).

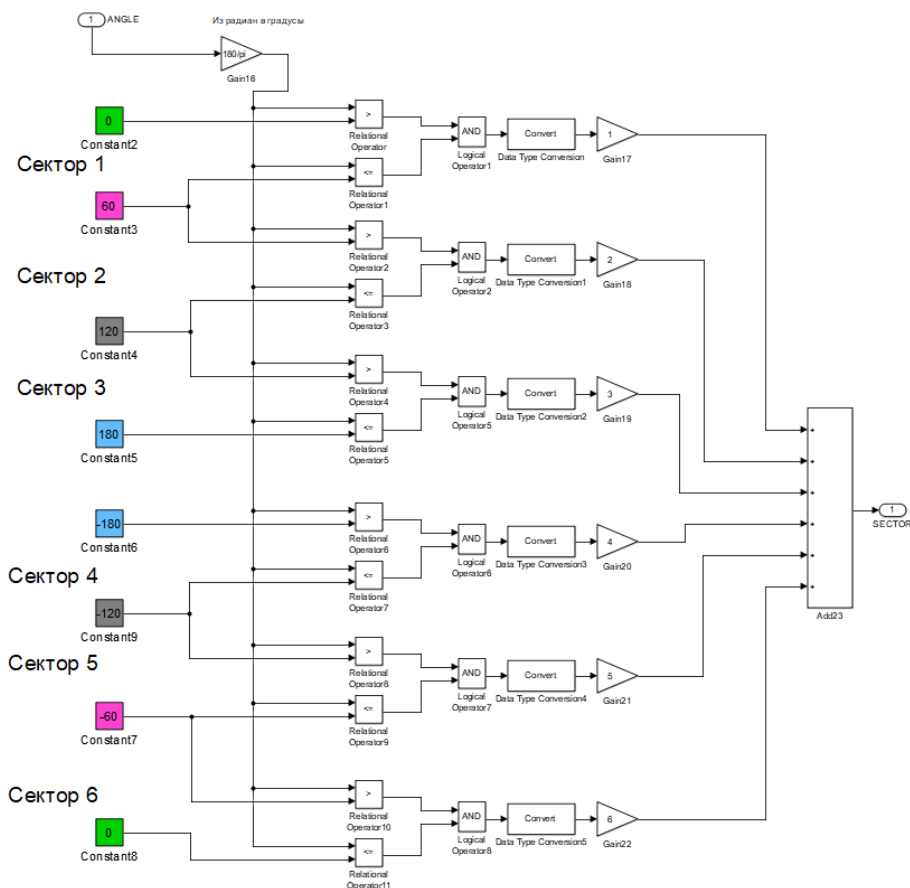


Рис. 8. Структура блока формирователя секторов
Примечание: составлено авторами.

В Sector Constructor значение угла α , переведенное из радиана в градусы, сравнивается с фиксированными значениями углов, характерных для каждого сектора. Пропорциональ-

ное звено Gain 17–22 необходимо для формирования подъема каждого сектора относительно друг друга до достижения сектором угла в 180° или π . Далее вектор переходит

в область секторов 4, 5, 6, расположенных в отрицательной области углов, и алгоритм повторяется.

Определение продолжительности времени переключения в секторе 1 предусматривает взятие интеграла от вектора $\vec{V}_{ref}$ в пределах от 0 до T_z , где $T_z = \frac{1}{f_z}$ – общее время переключения согласно (4):

$$\int_0^{T_z} \vec{V}_{ref} dt = \int_0^{T_1} \vec{V}_1 dt + \int_{T_1}^{T_1+T_2} \vec{V}_2 dt + \int_{T_1+T_2}^{T_z} \vec{V}_0 dt. \quad (4)$$

Тогда по формуле (5):

$$T_z \times \vec{V}_{ref} = (T_1 \times \vec{V}_1 + T_2 \times \vec{V}_2). \quad (5)$$

Общее время переключения по формуле (6):

$$T_z \times \vec{V}_{ref} \times \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \cos \beta \end{bmatrix} = T_1 \times \frac{2}{3} \times V_{dc} \times \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + T_2 \times \frac{2}{3} \times V_{dc} \times \begin{bmatrix} \cos \frac{\pi}{3} \\ \sin \frac{\pi}{3} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Промежутки времени T_0 – T_2 определяются согласно (7, 8):

$$T_1 = T_z \times a \times \frac{\sin\left(\frac{\pi}{3} - \alpha\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{3}\right)}, \quad (7)$$

$$T_2 = T_z \times a \times \frac{\sin(\alpha)}{\sin\left(\frac{\pi}{3}\right)}, \quad (8)$$

где $a = \frac{|\vec{V}_{ref}|}{\frac{2}{3} \times V_{dc}}$ – индекс модуляции.

Итоговое значение временных интервалов для каждого сектора согласно (9, 10):

$$T_1 = \frac{\sqrt{3} \times T_z \times |\vec{V}_{ref}|}{V_{dc}} \times \left(\sin\left(\frac{\pi}{3} - \alpha + \frac{n-1}{3} \pi\right) \right) = \frac{\sqrt{3} \times T_z \times |\vec{V}_{ref}|}{V_{dc}} \times \left(\sin\left(\frac{\pi}{3} n - \alpha\right) \right), \quad (9)$$

$$T_2 = \frac{\sqrt{3} \times T_z \times |\vec{V}_{ref}|}{V_{dc}} \times \left(\sin\left(\alpha - \frac{n-1}{3} \pi\right) \right). \quad (10)$$

На основе (9, 10) сформирован блок расчета временных интервалов для каждого сектора (рис. 9).

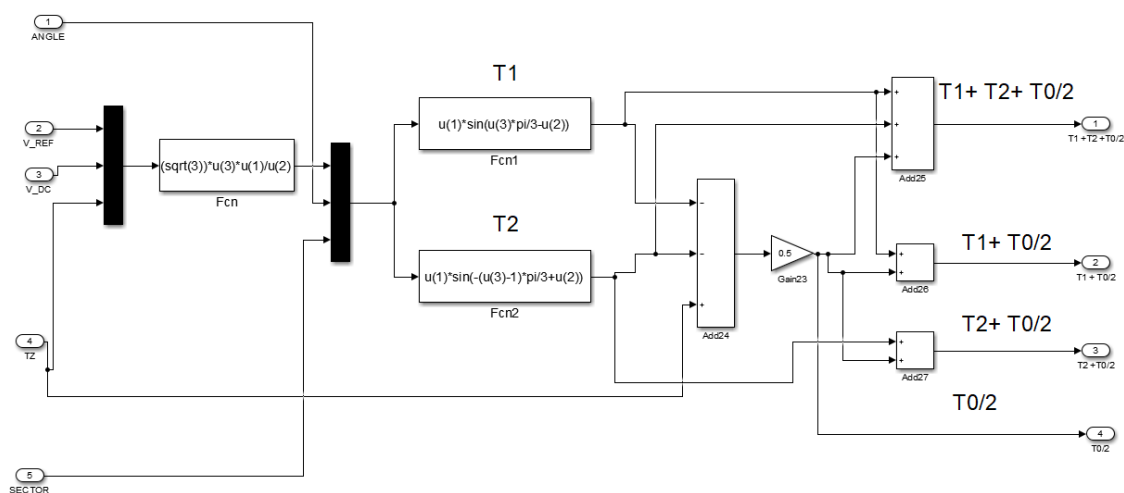


Рис. 9. Структура блока формирователя временных интервалов

Примечание: составлено авторами.

На входы блока Interval Compiler подается значение угла α , V_{ref} , V_{dc} , T_z и Sector, на выходе формируются интервалы T_1 , T_2 , T_0 для любых секторов.

Для формирования синусоид выходного напряжения должна быть соблюдена строгая последовательность переключения полупроводниковых ключей (табл. 2).

Таблица 2

Последовательность переключения силовых ключей автономного инвертора напряжения

Сектор	Верхняя группа ключей	Нижняя группа ключей
1	$VT1 = T1 + T2 + T0/2$ $VT3 = T1 + T0/2$ $VT5 = T0/2$	$VT4 = T0/2$ $VT6 = T1 + T0/2$ $VT2 = T1 + T2 + T0/2$
2	$VT1 = T1 + T0/2$ $VT3 = T1 + T2 + T0/2$ $VT5 = T0/2$	$VT4 = T2 + T0/2$ $VT6 = T0/2$ $VT2 = T1 + T2 + T0/2$
3	$VT1 = T0/2$ $VT3 = T1 + T2 + T0/2$ $VT5 = T2 + T0/2$	$VT4 = T1 + T2 + T0/2$ $VT6 = T0/2$ $VT2 = T1 + T0/2$
4	$VT1 = T0/2$ $VT3 = T1 + T0/2$ $VT5 = T1 + T2 + T0/2$	$VT4 = T1 + T2 + T0/2$ $VT6 = T2 + T0/2$ $VT2 = T0/2$
5	$VT1 = T2 + T0/2$ $VT3 = T0/2$ $VT5 = T1 + T2 + T0/2$	$VT4 = T1 + T0/2$ $VT6 = T1 + T2 + T0/2$ $VT2 = T0/2$
6	$VT1 = T1 + T2 + T0/2$ $VT3 = T0/2$ $VT5 = T1 + T0/2$	$VT4 = T0/2$ $VT6 = T1 + T2 + T0/2$ $VT2 = T2 + T0/2$

Примечание: составлено авторами.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Формирование синусоид векторной ШИМ происходит согласно табл. 2. Блок формирования синусоид векторной ШИМ Sine

Builder (рис. 10) основывается на данных о секторе и рассчитанных в блоке Interval Compiler временных интервалах. Результат работы блока Sine Builder представлен на рис. 11.

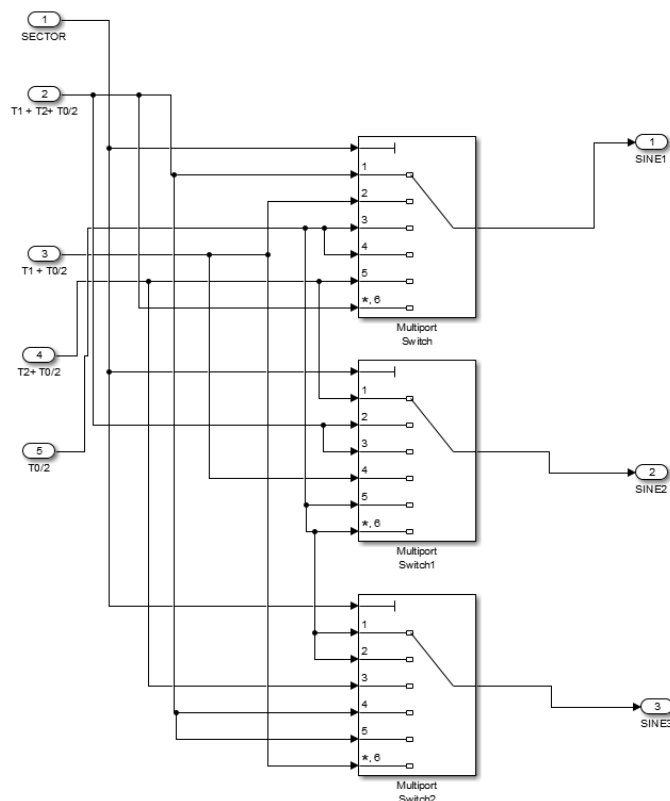


Рис. 10. Структура блока формирователя векторной широтно-импульсной модуляции

Примечание: составлено авторами.

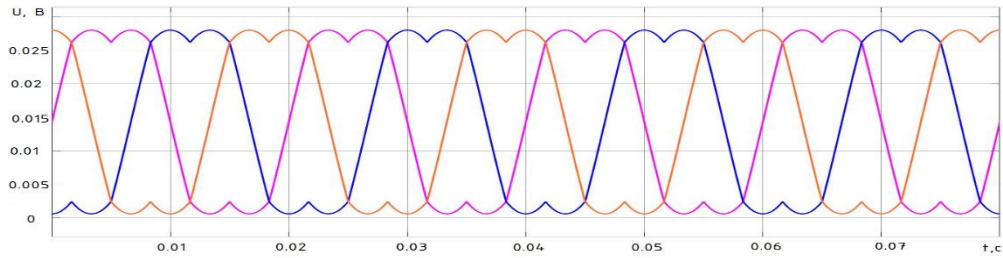


Рис. 11. Осциллограмма выхода блока Sine Builder

Примечание: составлено авторами.

Силовая часть преобразователя частоты (рис. 12) представлена трехфазным источником переменного напряжения, выпрямителем, фильтрующей емкостью в звене постоян-

ного тока, 6 полупроводниковыми ключами, активно-индуктивной нагрузкой и осциллографами для получения осциллограмм напряжений и токов на нагрузке.

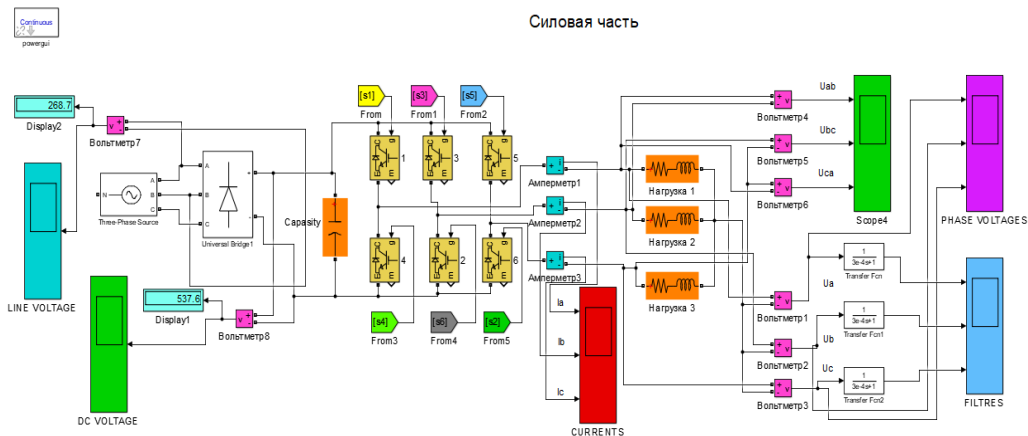


Рис. 12. Силовая часть преобразователя частоты

Примечание: составлено авторами.

Система управления ПЧ (рис. 13) сформирована блоками преобразования Парка, формирователем интервалов, секторов перемещения векторов напряжений, построителя

синусоид питающего напряжения. Частота питающего напряжения задается посредством блока константы f_z в герцах.

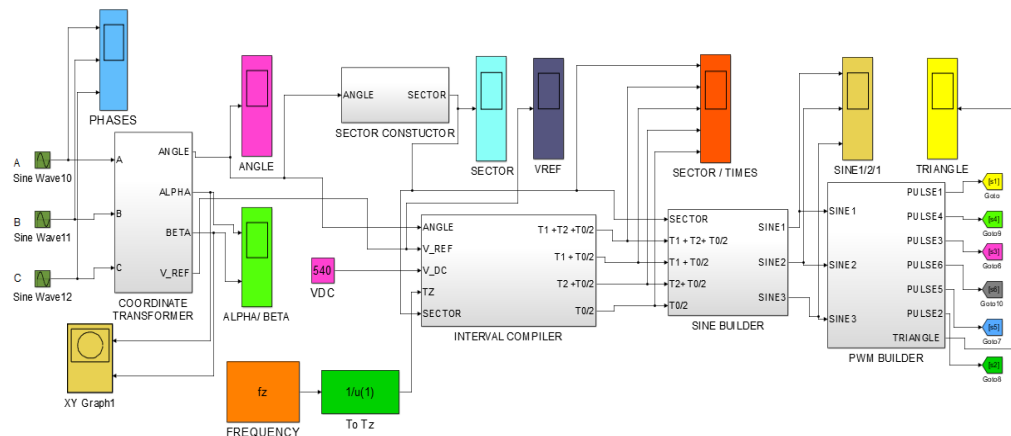


Рис. 13. Система управления преобразователем частоты

Примечание: составлено авторами.

По результатам моделирования получены осциллограммы линейных и фазных напряжений на нагрузке при частоте выходного напряжения $f = 50$ Гц (рис. 14–17).

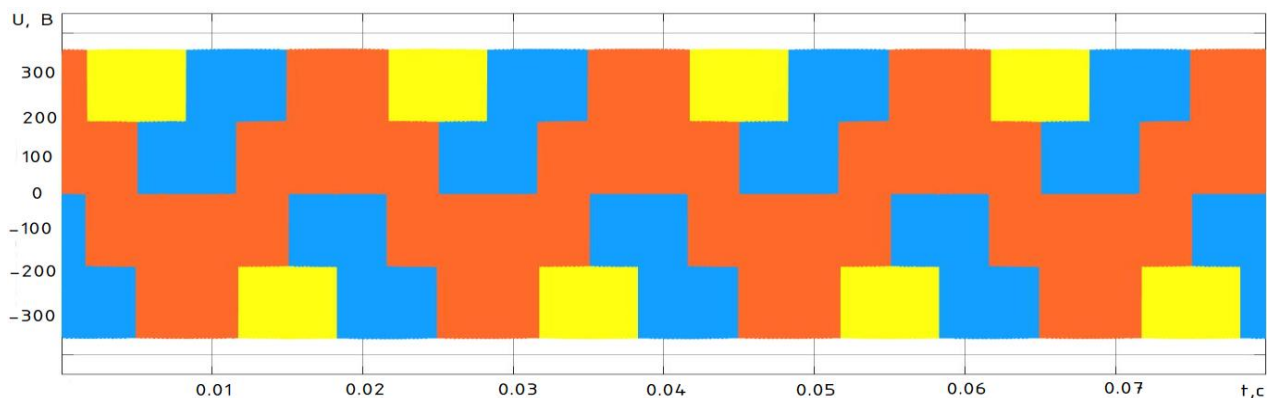


Рис. 14. Осциллограмма фазных напряжений на нагрузке
 Примечание: составлено авторами.

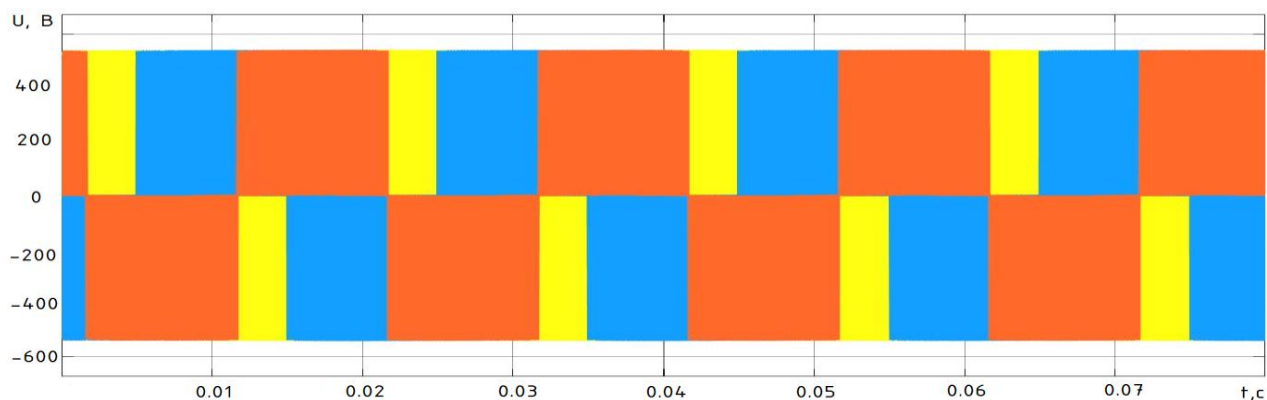


Рис. 15. Осциллограмма линейных напряжений на нагрузке
 Примечание: составлено авторами.

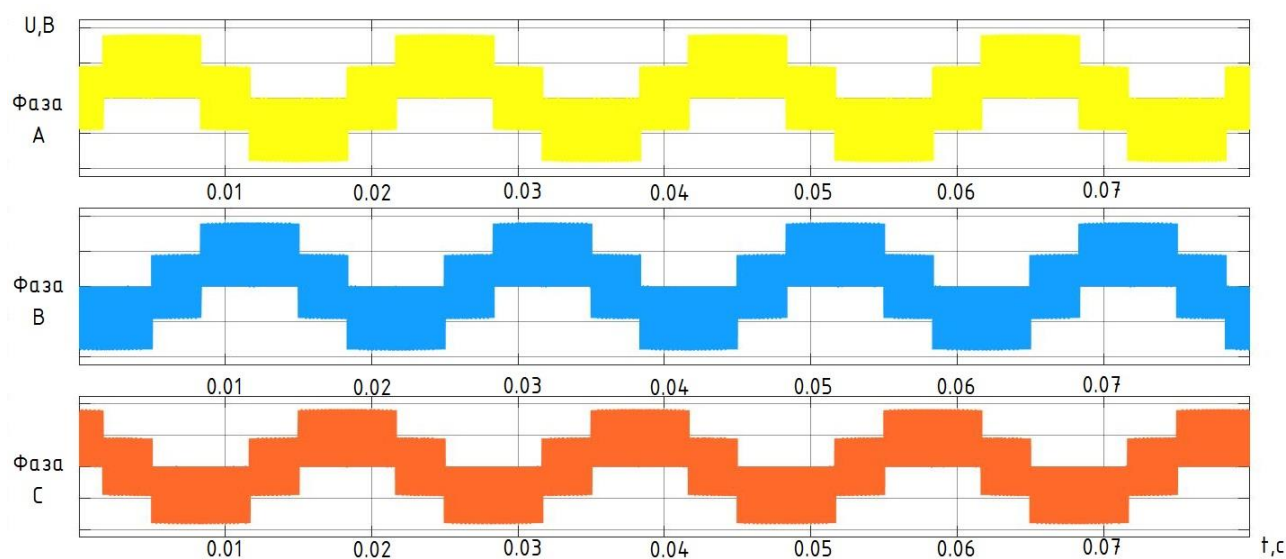


Рис. 16. Осциллограмма фазных напряжений на нагрузке в фазах А, В, С
 Примечание: составлено авторами.

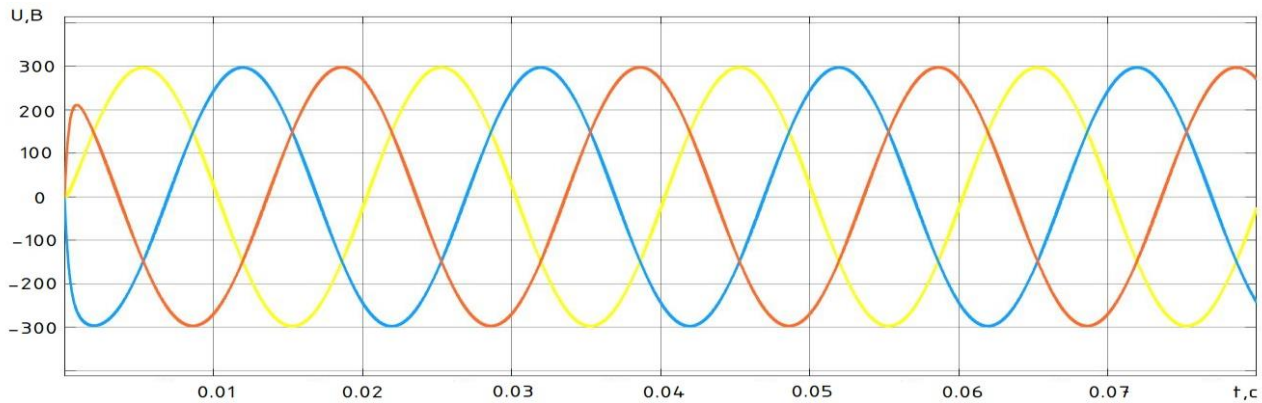


Рис. 17. Оциллограмма линейных напряжений на нагрузке после фильтрации
Примечание: составлено авторами.

Для проверки правильности формирования пространственного вектора напряжений построен годограф вращения пространствен-

ного вектора с помощью инструмента XY Graph (рис. 18).

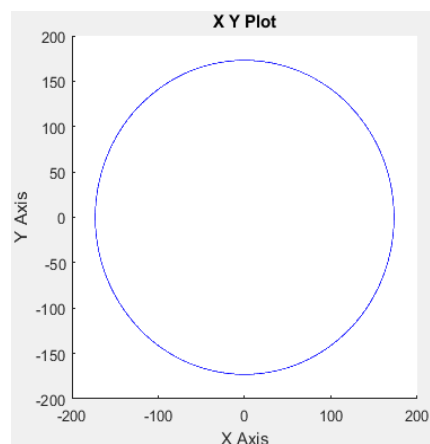


Рис. 18. Годограф вращения пространственного вектора напряжений
Примечание: составлено авторами.

Полученные в результате моделирования данные позволяют произвести оценку гармонических искажений в результате применения преобразователя частоты с векторной ШИМ. В отличие от работ, рассмотренных во введении, при моделировании сделаны допущения об активном сопротивлении ключей. В открытом состоянии активные сопротивления равны нулю, в закрытом – стремятся к бесконечности. Алгоритмы, примененные в модели, позволяют повысить качество выходного напряжения ПЧ, однако требуют больших вычислительных ресурсов, чем классический метод формирования ШИМ.

Преобразователь частоты формирует дискретные уровни фазного напряжения, что,

в свою очередь, ограничивает число векторов фазного напряжения, строго определяя их количество. Поскольку области расположения векторов ограничены правильным шестиугольником, то изменение чередования фаз позволяет переместить вектор напряжения из исходного сектора в другой сектор с возможностью обратного возвращения к базовому. Для формирования выходного напряжения используют три соседних пространственных вектора, координаты которых ограничивают треугольную область, в которой в данный момент времени находится конец вектора заданного напряжения.

Преобразователи частоты с пространственно-векторной ШИМ в совокупности

с методами повышения эффективности коммутации силового коммутационного оборудования и снижения гармонических искажений позволяют увеличить эффективность управления электроприводами промышленного применения, а использование более эффективных алгоритмов управления на новой производительной микропроцессорной базе в значительной мере способствуют решению данной задачи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены принципы формирования пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции, приведены теоретические и практические аспекты, а также особенности построения математической модели преобразователя частоты с пространственно-векторной широтно-импульсной модуляцией, произведено имитационное моделирование в среде MATLAB/Simulink.

По результатам моделирования получены осциллограммы фазных и линейных напряжений на нагрузке, определены пути оптимизации формирования выходных напряжений в виде их последующей обработки с помо-

щью фильтров гармоник, а также с помощью совершенствования алгоритма управления.

Выполнена проверка результатов моделирования с помощью построения годографа вращения пространственного вектора в XY Graph.

Применение современных технологий, включая преобразователи частоты с пространственно-векторной широтно-импульсной модуляцией и методы повышения эффективности коммутации силового оборудования, позволяют улучшить работу электроприводов в промышленности. Также новые микропроцессорные системы имеют большой потенциал для эффективного управления процессами. Так, в целом внедрение этих инновационных методов может улучшить результативность и экономическую эффективность в различных производственных секторах.

Важным шагом в повышении эффективности преобразователей частоты с векторной ШИМ является дальнейшее преобразование выходного напряжения, а именно удаление из спектра определенного ряда гармоник, что позволит повысить электромагнитную совместимость и снизить потери на коммутацию.

Список источников

1. Поляков В. Н., Шрейнер Р. Т. Энергоэффективные режимы двигателей переменного тока в системах частотного управления. Екатеринбург : УрФУ, 2017. 256 с.
2. Виноградов А. Б., Коротков А. А. Алгоритмы управления высоковольтным многоуровневым преобразователем частоты : моногр. Иваново, 2018. 184 с.
3. Куцев Л. А., Мелькумов В. Н., Саввин Н. Ю. Компьютерное моделирование движения теплоносителя в гофрированном канале пластинчатого теплообменника // Научный журнал строительства и архитектуры. 2020. № 4. С. 51–58. DOI 10.36622/VSTU.2020.60.4.005.
4. Голембиовский Ю. М., Томашевский Ю. Б., Щербakov А. А. и др. Автономный однофазный инвертор с высоким качеством выходного напряжения // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2018. Т. 18, № 1. С. 75–81. DOI 10.14529/power180110.
5. Кабдин Н. Е., Сторчевой В. Ф. Электропривод. М. : МЭСК, 2021. 286 с.
6. Cociu L., Cociu V. R. About the bidirectional separator circuit used in the induction machine analysis. *Bul Inst Polit Iași*. 2015;LXI (LXV)(3):9–20.

References

1. Polyakov V. N., Shreiner R. T. Energoeffektivnye rezhimy dvigatelei peremennogo toka v sistemakh chastotnogo upravleniia. Yekaterinburg: UrFU; 2017. 256 p. (In Russian).
2. Vinogradov A. B., Korotkov A. A. Algoritmy upravleniia vysokovoltnym mnogourovnevnyim preobrazovatelem chastoty. Monograph. Ivanovo; 2018. 184 p. (In Russian).
3. Kushchev L. A., Melkumov V. N., Savvin N. Yu. Computer simulation of flow in corrugated channel of plate heat exchanger. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2020;(4):51–58. DOI 10.36622/VSTU.2020.60.4.005. (In Russian).
4. Golembiovsky Yu. M., Tomashevsky Yu. B., Shcherbakov A. A. et al. Autonomous single-phase inverter with high quality of output voltage. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2018;18(1):75–81. DOI 10.14529/power180110. (In Russian).
5. Kabdin N. E., Storchey V. F. Elektroprivod. Moscow: MESKh; 2021. 286 p. (In Russian).
6. Cociu L., Cociu V. R. About the bidirectional separator circuit used in the induction machine analysis. *Bul Inst Polit Iași*. 2015;LXI (LXV)(3):9–20.

7. Васильев Б. Ю., Козырук А. Е., Мардашов Д. В. Увеличение коэффициента использования автономного инвертора при пространственно-векторном управлении // Электротехника. 2020. № 4. С. 14–23.
8. Correlation b/w output voltage frequency and angle theta for Conventional Space Vector PWM 3-Phase inverter drive. URL: <https://electronics.stackexchange.com/questions/446639/correlation-b-w-output-voltage-frequency-and-angle-theta-for-conventional-space> (дата обращения: 10.03.2023).
9. Маклаков А. С. Гибридный алгоритм модуляции на основе пространственно-векторной ШИМ и ШИМ с удалением выделенных гармоник // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2018. Т. 18, № 1. С. 92–100.
10. Костылев А. В. Векторная ШИМ для двухсекционного преобразователя частоты // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. 2015. Т. 15, № 2. С. 34–40.
7. Vasilyev B. Yu., Kozyaruk A. E., Mardashov D. V. Increasing the utilization factor of an autonomous inverter under space vector control. *Elektrotehnika*. 2020;(4):14–23. (In Russian).
8. Correlation b/w output voltage frequency and angle theta for Conventional Space Vector PWM 3-Phase inverter drive. URL: <https://electronics.stackexchange.com/questions/446639/correlation-b-w-output-voltage-frequency-and-angle-theta-for-conventional-space> (accessed: 10.03.2023).
9. Maklakov A. S. Hybrid modulation based on SHEPWM and SVPWM. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2018;18(1):92–100. (In Russian).
10. Kostylev A. V. The vector PWM for two-section frequency converter. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2015;15(2):34–40. (In Russian).

Информация об авторах

Н. Ю. Саввин – кандидат технических наук, доцент.
Д. Д. Гарбузов – магистрант.

Information about the authors

N. Yu. Savvin – Candidate of Sciences (Engineering),
Docent.
D. D. Garbuzov – Master's Degree Student.