

УДК 621.314.572

ББК 31.291.6

Г.П. ОХОТКИН, И.И. ИВАНЧИН

СПОСОБ ВЕКТОРНОЙ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ В МНОГОУРОВНЕВОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Ключевые слова: многоуровневый преобразователь напряжения, векторная широтно-импульсная модуляция напряжения, базовые векторы преобразователя напряжения.

В статье рассматривается вопрос формирования напряжения статическими преобразователями, построенными по многоуровневым структурным схемам. Многоуровневые схемы получили широкое распространение в отраслях промышленности, использующих электромеханические преобразования на средних напряжениях вплоть до 20 кВ. В качестве примера можно указать топливную промышленность, где многоуровневые преобразователи устанавливаются в электроприводах магистральных насосных агрегатов. Расположение магистральных насосов в отдалённых изолированных районах страны предполагает слабые связи в энергосистеме и предъявляет повышенные требования по эффективности использования электроэнергии. В связи с этим для многоуровневого преобразователя напряжения предлагается энергоэффективный векторный способ широтно-импульсной модуляции. При векторной широтно-импульсной модуляции происходит оптимальное количество переключений уровней напряжения в фазах преобразователя, что приводит к наименьшему коэффициенту гармонических искажений напряжения сравнительно с аналогичным показателем при других способах модуляции. Проанализированы особенности векторной широтно-импульсной модуляции в многоуровневых преобразователях напряжения, связанные с увеличением количества базовых пространственных векторов напряжения статического многоуровневого преобразователя. Предложен поэтапный способ векторной широтно-импульсной модуляции в многоуровневом преобразователе, включающий определение ближайших к заданному вектору напряжения базовых векторов преобразователя, вычисление времени формирования каждого из базовых векторов за период коммутации силовых ключей преобразователя, сохранение порядка переключения между базовыми векторами. Способ подробно рассмотрен для многоуровневого преобразователя с пятью уровнями напряжения в фазе. В заключение приведены результаты работы математической модели данного преобразователя с предложенным способом векторной широтно-импульсной модуляции напряжения. По полученным временным диаграммам формирования напряжения построен годограф пространственного результирующего вектора выходного напряжения многоуровневого статического преобразователя.

Статические преобразователи напряжения в электрических сетях переменного тока служат для формирования синусоидального фазного напряжения. Для обеспечения синусоидальности выходного напряжения применяется широтно-импульсная модуляция. Для улучшения качества формируемого напряжения предпочтительнее использовать векторный способ ШИМ, который может уменьшить потери в нагрузке преобразователя, обусловленные гармоническими искажениями формируемого напряжения [1, 2]. Снижение потерь имеет особую важность для мощных многоуровневых преобразователей напряжения, поэтому исследование векторного способа ШИМ для них является актуальной задачей.

Вычисление векторной ШИМ в многоуровневых преобразователях напряжения рассмотрено в работах [3, 4]. Однако описанные алгоритмы сложны в реализации, требуют значительных вычислительных ресурсов, что уменьшает надёжность проектируемых систем. В связи с вышеизложенным целью предложенной статьи является повышение эффективности векторного способа ШИМ в многоуровневых преобразователях.

Основные принципы векторной ШИМ представлены на рис. 1. Проекции пространственного вектора напряжения \vec{U} с амплитудой U_m и мгновенным углом φ на фазы АВС будут равны:

$$U_A = U_m \cdot \cos(\varphi)$$

$$U_B = U_m \cdot \cos(\varphi - \Delta\varphi) = U_m \cdot \cos\left(\varphi - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right)$$

$$U_C = U_m \cdot \cos(\varphi - 2 \cdot \Delta\varphi) = U_m \cdot \cos\left(\varphi - \frac{4 \cdot \pi}{3}\right) = U_m \cdot \cos\left(\varphi + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right).$$

Сложив вектора фазных напряжений, получим суммарный вектор:

$$\vec{U}_\Sigma = \vec{U}_A + \vec{U}_B + \vec{U}_C$$

с координатами

$$U_{\Sigma x} = \frac{3}{2} \cdot U_m \cdot \cos(\varphi),$$

$$U_{\Sigma y} = \frac{3}{2} \cdot U_m \cdot \sin(\varphi).$$

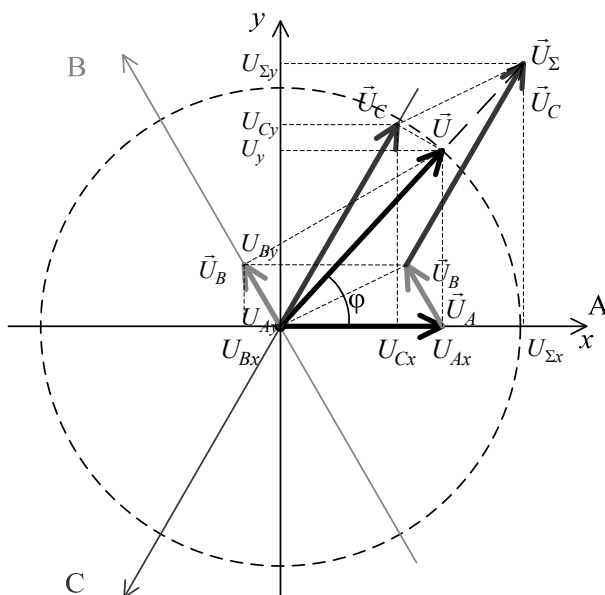


Рис. 1. Пространственный вектор напряжения и его проекции

Суммарный пространственный вектор определится соотношением

$$\vec{U}_{\Sigma} = \frac{3}{2} \cdot \vec{U}, \quad (1)$$

откуда следует, что для вычисления векторной ШИМ необходимо учитывать изменение масштаба суммарного вектора. Кроме того, статический преобразователь напряжения формирует дискретные уровни фазного напряжения, что определяет фиксированное число пространственных векторов фазного напряжения, векторная сумма которых будет образовывать конечное число результирующих пространственных векторов напряжения преобразователя. Формирование желаемого вектора напряжения происходит на основе принципа модуляции между дискретными пространственными векторами напряжения преобразователя. Эквивалентные смещения значений фазных напряжений не оказывают влияния на межфазное напряжение преобразователя, так как они не влияют на модули пространственных векторов фазных напряжений в силу свойства параллельного переноса. Тогда количество неэквивалентных или базовых пространственных векторов трехфазных преобразователей определится выражением

$$N = 3 \cdot n \cdot (n - 1) + 1,$$

где n – число возможных уровней напряжения в фазе преобразователя.

В качестве примера на рис. 2 приведены базовые пространственные векторы напряжения для преобразователей с различным числом уровней n . Пространственные векторы отмечены с помощью точек, координаты которых соответствуют координатам концов векторов. Преобразователь с числом уровней $n = 11$ соответствует преобразователю, рассчитанному на номинальное напряжение 6 кВ.

Область расположения пространственных векторов трёхфазного преобразователя имеет следующие свойства. Границы области образуют правильный шестиугольник, который можно разделить на секторы с I по VI с углами $2\pi/6 = \pi/3 = 60^\circ$ и сторонами, параллельными расположению фаз АВС. При взаимной перестановке и инвертировании фаз АВС можно привести заданный вектор напряжения из любого из секторов к базовому сектору I с возможностью обратного восстановления в исходный сектор. Сторона шестиугольника определяется диапазоном изменения фазного напряжения преобразователя. Расстояние между соседними базовыми векторами зависит от разности потенциалов между соседними дискретными уровнями фазного напряжения преобразователя. 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.

Предлагаемый способ формирования многоуровневой векторной ШИМ состоит из следующих этапов. Сначала необходимо определить текущий сектор заданного вектора напряжения с помощью мгновенного значения угла его поворота φ и привести заданный вектор к сектору I с учётом преобразований фаз при переходе между секторами.

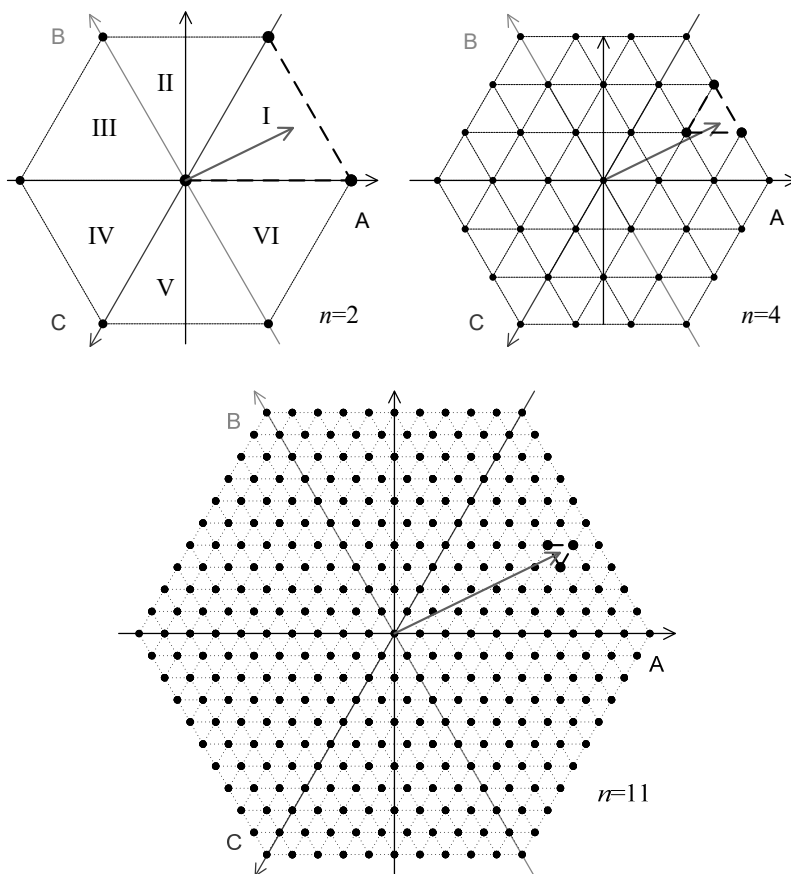


Рис. 2. Диаграмма пространственных векторов напряжения многоуровневых преобразователей

На следующем этапе в секторе I находятся правильный треугольник, координаты вершин которого соответствуют трём базовым пространственным векторам преобразователя, ближайшим к приведённому суммарному вектору, найденному по выражению (1). Нахождение базовых векторов напряжения для преобразователя с 5 уровнями фазового напряжения показано на рис. 3. Искомый правильный треугольник однозначно определяется по проекциям суммарного вектора напряжения на прямые l_1 , l_2 и l_3 , которые расположены перпендикулярно пространственному расположению фаз ABC либо, что равнозначно, перпендикулярны сторонам правильного треугольника самого сектора I по ниже описанному алгоритму.

Прямые l_1 , l_2 и l_3 делятся на интервалы длиной a , которая соответствует проекции расстояния между соседними базовыми векторами. Начало интервала $(0, a]$ устанавливается проекцией начала вектора заданного напряжения. Находится интервал $(k \cdot a, (k+1) \cdot a]$, где $k \in N$, включающий в себя проекцию конца суммарного вектора напряжения для каждой из прямых l .

Каждой комбинации из найденных интервалов прямых l_1 , l_2 и l_3 таблично задаётся правильный треугольник с детерминированными координатами вершин, которые соответствуют координатам базовых пространственных векторов преобразователя.

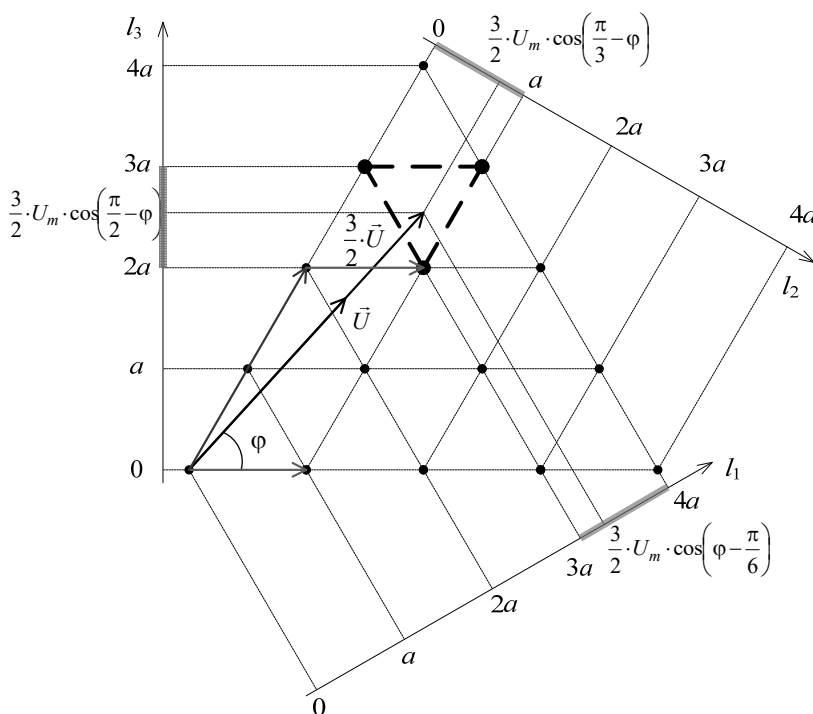


Рис. 3. Определение базовых векторов многоуровневой векторной ШИМ

Далее по известным координатам вершин правильного треугольника, соответствующим базовым векторам \vec{V}_1 , \vec{V}_2 , \vec{V}_3 , и координатам приведённого суммарного вектора \vec{U}_Σ (рис. 4) вычисляется время включения t_1 , t_2 и t_3 каждого вектора. Исходя из того, что должно выполняться равенство

$$\vec{U}_\Sigma = \vec{V}_1 \cdot \frac{t_1}{T_0} + \vec{V}_2 \cdot \frac{t_2}{T_0} + \vec{V}_3 \cdot \frac{t_3}{T_0},$$

получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} x_1 \cdot t_1 + x_2 \cdot t_2 + x_3 \cdot t_3 = x, \\ y_1 \cdot t_1 + y_2 \cdot t_2 + y_3 \cdot t_3 = y, \\ t_1 + t_2 + t_3 = T_0, \end{cases} \quad (2)$$

где $x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x, y$ – координаты векторов напряжений $\vec{V}_1, \vec{V}_2, \vec{V}_3, \vec{U}_\Sigma$; T_0 – период частоты коммутаций векторной ШИМ.

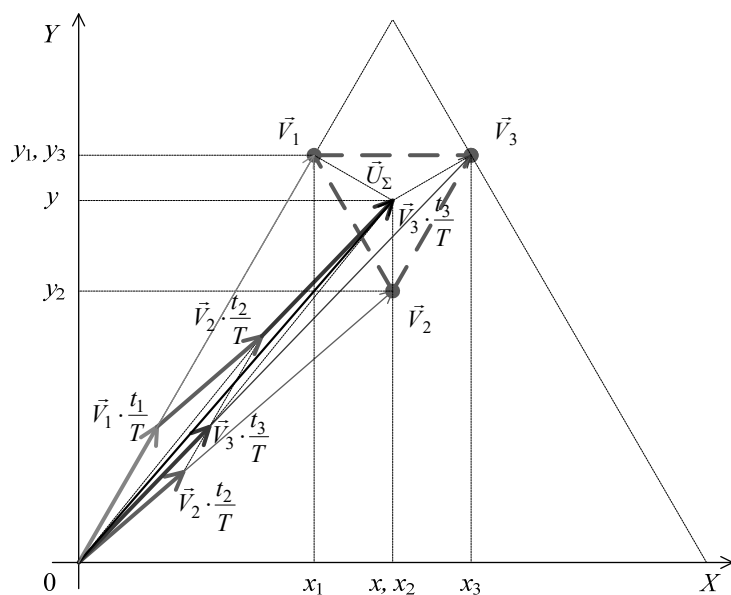


Рис. 4. Определение времени включения базовых векторов для векторной ШИМ

Выше было отмечено, что базовые пространственные векторы напряжения определяются дискретными уровнями напряжений фазы, то есть каждому базовому вектору \vec{V}_x соответствуют напряжения на выходе преобразователя $[a_x, b_x, c_x]$. Таким образом, решение системы уравнений (2) будет определять время включения дискретного уровня напряжения фаз ABC на периоде модуляции T_0 , что позволяет получить желаемую форму фазного напряжения. Для уменьшения динамических потерь преобразователя нужно сохранять порядок включения базовых векторов при смене треугольника, вершины которого определяют три ближайших базовых вектора (рис. 5).

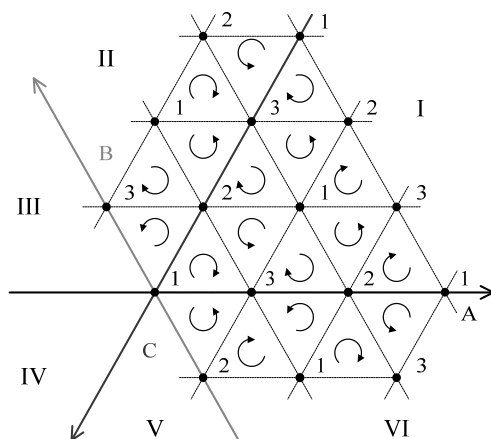


Рис. 5. Порядок включения базовых векторов напряжения

На заключительном этапе вычисленная форма напряжения для сектора I приводится к текущему сектору, что позволяет получить желаемую форму напряжения на выходе каждой фазы преобразователя за период времени T .

Для проверки предложенного способа разработана математическая модель в MATLAB. Результаты вычислительного эксперимента представлены на рис. 6. На рис. 6, а показаны временные диаграммы вычисления векторной ШИМ, а на рис. 6, б представлен годограф сформированного вектора напряжения максимальной амплитуды при $n = 5$.

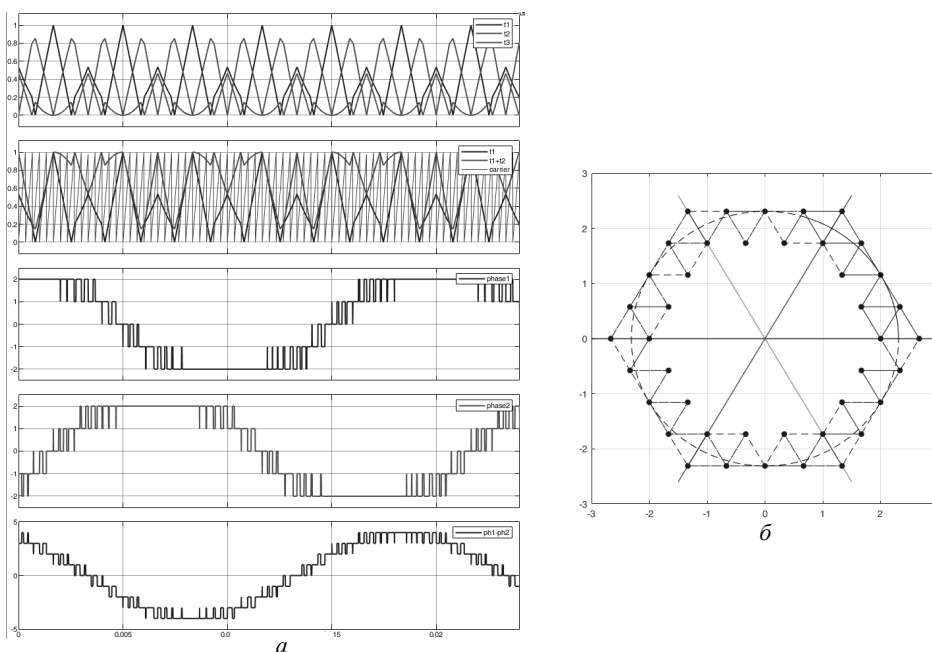


Рис. 6. Формирование напряжения (а) и его годограф (б) при векторной ШИМ

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о работоспособности предложенного способа векторной ШИМ многоуровневого преобразователя напряжения. Разработанный алгоритм прост в реализации, обладает высоким быстродействием благодаря табличному способу задания координат базовых векторов и высокой точностью обработки выходного напряжения.

Литература

1. Васильев Б.Ю., Козярук А.Е., Мардашов Д.В. Увеличение коэффициента использования автономного инвертора при пространственно-векторном управлении // Электротехника. 2020. № 4. С. 14–23.
2. Изосимов Д.Б., Рывкин С.Е., Шевцов С.В. Симплексные алгоритмы управления трехфазным автономным инвертором напряжения с ШИМ // Электротехника. 1993. № 12. С. 14–20.
3. Коротков А.А., Виноградов А.Б. Новый алгоритм векторного формирования ШИМ высоковольтного преобразователя с минимизацией коммутационных потерь // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2013. № 4. С. 64–69.
4. Gupta A.K., Khambadkone A.M. A General Space Vector PWM Algorithm for Multilevel Inverters Including Operation in Overmodulation Range. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2007, vol. 22, no. 2, pp. 517–526.

ОХОТКИН ГРИГОРИЙ ПЕТРОВИЧ – доктор технических наук, заведующий кафедрой автоматизации и управления в технических системах, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (elius@list.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9410-7380>).

ИВАНЧИН ИВАН ИВАНОВИЧ – руководитель направления, ООО «НПП «ЭКРА», Россия, Чебоксары (ivanchin_i@ekra.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5693-2948>).

Grigory P. OKHOTKIN, Ivan I. IVANCHIN

SPACE VECTOR PWM IN A MULTILEVEL VOLTAGE CONVERTER

Key words: multilevel voltage converter, vector pulse-width modulation of voltage, base vectors of voltage converter.

The present article considers the voltage forming by multilevel converters. Multilevel converters are widely used in industry applications with medium voltages up to 20 kV. An example is the oil industry, where multilevel converters are installed in electric drives of pumping units on pipeline systems. The location of the pipelines in isolated areas implies weak net connections for power system and expects increased requirements for the efficiency of the use of electricity. In this regard, for a multilevel voltage converter, an energy-efficient vector method of pulse-width modulation is proposed. With vector pulse-width modulation, the optimal number of voltage level switching occurs in the phases of the converter, which leads to the lowest harmonic distortion of the voltage, compared with other modulation methods. The features of vector pulse-width modulation in multilevel voltage converters caused by the increased number of basic voltage vectors of a static multilevel converter are analyzed. A step-by-step method of vector pulse-width modulation in a multilevel converter is proposed, including determining the base vectors of the converter closest to a reference voltage vector, calculating the time for each of the base vectors, maintaining the switching order between the base vectors. The method is considered in detail for a multilevel converter with five voltage levels in a phase. In conclusion, the results of modeling control system of this converter with the proposed method of vector pulse-width modulation are presented. According to the obtained time diagrams of voltage formation, a hodograph of the resulting vector of the output voltage of a multilevel static converter was constructed.

References

1. Vasil'ev B.Yu., Kozyaruk A.E., Mardashov D.V. *Uvelichenie koeffitsienta ispol'zovaniya avtonomnogo invertora pri prostranstvenno-vektornom upravlenii* [Increasing the utilization factor of an autonomous inverter with space-vector control]. *Elektrotehnika*, 2020, no. 4, pp. 14–23.
2. Izosimov D.B., Ryvkin S.E., Shevtsov S.V. *Simpleksnyye algoritmy upravleniya trekh-faznym avtonomnym invertorom napryazheniya s ShIM* [Simplex control algorithms for a three-phase autonomous voltage inverter with PWM]. *Elektrotehnika*, 1993, no. 12, pp. 14–20.
3. Korotkov A.A., Vinogradov A.B. *Novyi algoritm vektornogo formirovaniya shim vysokovol'tnogo preobrazovatela s minimizatsiei kommutatsionnykh poter'* [A new algorithm for the vector formation of a PWM high-voltage converter with minimization of switching losses]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2013, no. 4, pp. 64–69.
4. Gupta A.K., Khambadkone A.M. *A General Space Vector PWM Algorithm for Multilevel Inverters Including Operation in Overmodulation Range*. *IEEE Transactions on Power Electronics*. March, 2007, vol. 22, no. 2, pp. 517–526.

GRIGORY P. OKHOTKIN – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Automation and Control in Technical Systems, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (elius@list.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9410-7380>).

IVAN I. IVANCHIN – Head of Research, “EKRA” RPE, Russia, Cheboksary (ivanchin_i@ekra.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5693-2948>).

Формат цитирования: Охоткин Г.П., Иванчин И.И. Способ векторной широтно-импульсной модуляции в многоуровневом преобразователе напряжения // Вестник Чувашского университета. – 2022. – № 1. – С. 107–114. DOI: 10.47026/1810-1909-2022-1-107-114.