

УДК 621.311

DOI: 10.15593/2224-9397/2020.3.05

**С.Г. Воронин, О.О. Султонов**

Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия

## **СИММЕТРИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ НА ВЫХОДЕ ТРЁХФАЗНОГО ИНВЕРТОРА ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКЕ**

Рассмотрен метод симметрирования напряжения в трёхфазной системе электроснабжения с нулевым проводом, содержащей в качестве преобразователя напряжения полупроводниковый трёхфазный мостовой инвертор. Известно, что основной проблемой при реализации таких систем является симметрирование напряжения при несимметричной нагрузке, что чаще всего характерно при наличии бытовых или промышленных потребителей однофазного напряжения. Если использовать преобразователь с синусоидальной формой напряжения, то задача его симметрирования оказывается весьма сложной. Во многих случаях для этой цели используют преобразования во вращающейся системе координат с переходом от трёхфазной системы в двухфазную, с коррекцией полученного в результате этого преобразования эллиптического годографа вектора напряжения и последующего обратного преобразования от двухфазной системы в трёхфазную. В результате алгоритм работы преобразователя оказывается весьма сложным и требует использования значительных вычислительных ресурсов. Вместе с тем в простейшем случае для некоторых потребителей, не сильно критичных к содержанию высших гармоник в фазном напряжении, вместо синусоидального можно сформировать ступенчатую форму напряжения. При этом в некоторых случаях содержание высших гармоник может оказаться весьма малым. В частности, для 180-градусной коммутации силовых ключей действующее значение первой гармоники напряжения составит 0,955 от действующего значения полного напряжения, что допустимо для большинства потребителей, особенно в сельской местности. Но при этом вопросы симметрирования существенно упрощаются и сводятся к потактовому открыванию ключей в дополнительной, четвертой стойке инвертора. **Цель исследования:** разработка метода симметрирования напряжения на входе трёхфазного инвертора при несимметричной нагрузке. **Методы:** создание дискретного алгоритма управления дополнительной стойкой инвертора, исходя из условия обеспечения заданной точности симметрирования выходного напряжения. **Результаты:** заданный алгоритм реализуется дискретным устройством регулирования напряжения на соответствующих ключах дополнительной стойки на основании информации, получаемой с датчика нулевой точки трёхфазной нагрузки. **Практическая значимость:** предложенная методика симметрирования напряжения на выходе трёхфазного инвертора при несимметричной нагрузке может быть использована при создании автономных мини-ГЭС, предназначенных для энергоснабжения небольших населённых пунктов, находящихся в труднодоступных районах.

**Ключевые слова:** мини-ГЭС, возобновляемые источники энергии, полупроводниковый преобразователь, несимметричная нагрузка, дискретная коммутация, дискретный регулятор тока, методы симметрирования трёхфазного напряжения, автономный инвертор, пропорционально-интегральный регулятор.

S.G. Voronin, O.O. Sultonov

National Research South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

## VOLTAGE SYMMETRY AT THE OUTPUT OF THREE-PHASE INVERTER UNDER ASYMMETRIC LOAD

The article discusses the balancing method of voltage in three-phase power supply system with neutral wire, containing a semiconductor three-phase bridge inverter as voltage converter. It is known that the main problem in the implementation of such systems is the balancing of the voltage at an unbalanced load. This is most often typical in the presence of household or industrial consumers of single-phase voltage. If you use converter with a sinusoidal voltage waveform, then the task of balancing it turns out to be very difficult. In many cases, for this purpose, transformations are used in rotating coordinate system with a transition from three-phase system to two-phase system, with correction of the resulting elliptical hodograph of the voltage vector obtained as a result of this transformation and the subsequent inverse transformation from two-phase system into three-phase system. As a result, the converter operation algorithm turns out to be very complex and requires the use of significant computing resources. At the same time, in the simplest case, for some consumers who are not very critical to the content of higher harmonics in the phase voltage, instead of sinusoidal one, a step voltage form can be formed. Moreover, in some cases, the content of higher harmonics will be very small. In particular, for 180-degree switching of power switches, the effective value of the first voltage harmonic will be 0.955 of the effective value of the total voltage, which is acceptable for most consumers, especially in rural areas. But at the same time, balancing issues are significantly simplified and boiled down to cycle-by-cycle opening of keys in an additional, fourth rack of the inverter. **Purpose of the research:** development balancing voltage method at the input of three-phase inverter with an unbalanced load. **Methods:** creation of discrete algorithm for controlling an additional inverter rack, based on the condition of ensuring the specified accuracy of balancing the output voltage. **Results:** the specified algorithm is implemented by a discrete voltage control device on the corresponding keys of the additional rack based on information received from the zero-point sensor of the three-phase load. **Practical significance:** the proposed balancing voltage method at the output of a three-phase inverter with an unbalanced load can be used to create autonomous mini-hydroelectric power plants intended for power supply of small settlements located in hard-to-reach areas.

**Keywords:** mini HPP, renewable energy sources, semiconductor converter, unbalanced load, discrete switching, discrete current regulator, balancing voltage methods of three-phase, autonomous inverter, proportional-integral controller.

**Введение.** Силовые полупроводниковые преобразователи широко используются в возобновляемых источниках энергии [1–4]. В ближайшем будущем электрическая энергия будет вырабатываться и потребляться посредством силовой электроники. Это усиливает роль силовой электронной технологии в процессах преобразования энергии и способствует переходу от централизованного производства и распределения электрической энергии к распределенной генерации. Возобновляемые источники энергии (ВИЭ) становятся более предпочтительными в системах распределенной генерации для уменьшения выбросов газа и глобального потепления. В последние десятилетия установлено более 1000 ГВт [5] ВИЭ, и преобразование энергии в них осуществляется

с помощью силовой электроники. Среди различных видов ВИЭ мини-ГЭС малой мощности является наиболее подходящим примером возможности преобразования энергии малых рек в электрическую энергию с применением силовых электронных устройств.

При этом разработка мини-ГЭС с полупроводниковыми преобразователями в низконапорных реках оказывается наиболее эффективной [6–8]. Из условия упрощения структур мини-ГЭС с целью обеспечения их работы в автономном необслуживаемом режиме предлагается использовать в ней неуправляемые простейшие элементы – турбину в виде центробежного насоса и генератор на основе синхронной машины с возбуждением от постоянных магнитов. Тогда качество энергии будет обеспечиваться полупроводниковым преобразователем напряжения. Очевидно, что надёжность работы таких ГЭС в автономном режиме будет определяться не только надёжностью их функциональных элементов, но также сложностью и объёмом электронных управляющих устройств. Поэтому чем проще алгоритмы управления и функционирования мини-ГЭС, тем меньше объём электронных управляющих устройств и тем проще обеспечить бесперебойность работы и регламентное обслуживание.

Одной из проблем, возникающих при использовании полупроводниковых преобразователей в составе мини-ГЭС, является симметрирование напряжения при несимметричной нагрузке. При решении этой проблемы традиционными методами резко возрастает требуемый объём вычислительных ресурсов, приводящий к усложнению схем и снижению их надёжности. В настоящей статье предлагается решение задачи симметрирования напряжения на выходе трехфазного инвертора при наличии несимметрии нагрузки за счёт использования упрощенного алгоритма дискретного регулирования токов через дополнительную стойку инвертора.

Существуют различные схемы решения проблем симметрирования выходного синусоидального напряжения полупроводникового преобразователя [9–13]. Все они построены на основе преобразования исходной системы напряжений в неподвижной системе координат во вращающуюся систему, в которой выявляется эллиптичность годографов напряжения и тока, обусловленная несимметрией, осуществляется приведение их к окружности и путём обратного преобразования формируется новая система фазных напряжений. Реализуются такие схемы достаточно сложно и требуют больших вычислительных ресурсов [14, 15].

Между тем во многих случаях, когда не предъявляются жёсткие требования к содержанию высших гармоник в напряжении питания, можно обойтись простейшим преобразователем с  $180^\circ$  дискретной коммутацией. Для реализации такого преобразователя потребуются шесть полупроводниковых ключей. В данном случае необходимы шесть IGBT-транзисторов (рис. 1). Решение задачи симметрирования напряжений в таком преобразователе существенно упрощается.

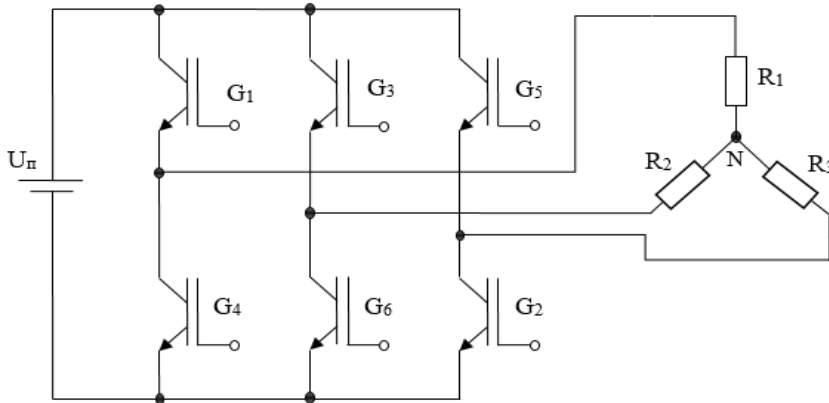


Рис. 1. Трехфазный преобразователь

При  $180^\circ$  дискретной коммутации одновременно подается сигнал на три транзисторных ключа. Замыкание транзисторных ключей происходит по такой схеме: 156-261-312-423-345-456 [16]. Так как в одно время замкнуты транзисторные ключи абсолютно во всех трех фазах, такой режим называют пофазной дискретной коммутацией. В каждый цикл коммутации два резистора нагрузки подключены к постоянному источнику параллельно, а третий резистор – последовательно с ними [17–19]. Следовательно, напряжение на параллельных резисторах равняется  $U_\pi/3$ , а на последовательном резисторе  $2/3U_\pi$  (рис. 2).

Предполагается, что к преобразователю подключена чисто активная нагрузка:  $R_a = R_b = R_c = 10 \text{ Ом}$ .

Согласно [20], для расчетов напряжения и тока применяются следующие выражения:

$$U_{\alpha 0} = U_{c0} = \frac{U_\pi}{3}; U_{b0} = \frac{2U_\pi}{3}; i_1 = \frac{2U_\pi}{3R}.$$

Временные диаграммы выходных напряжений  $180^\circ$  преобразователя при активной нагрузке показаны на рис. 3.

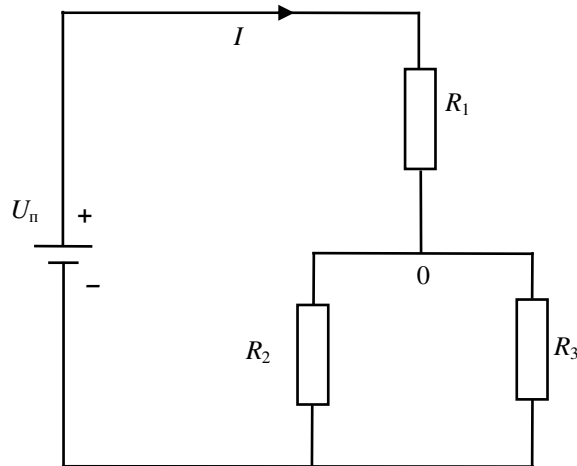


Рис. 2. Эквивалентная схема нагрузки преобразователя

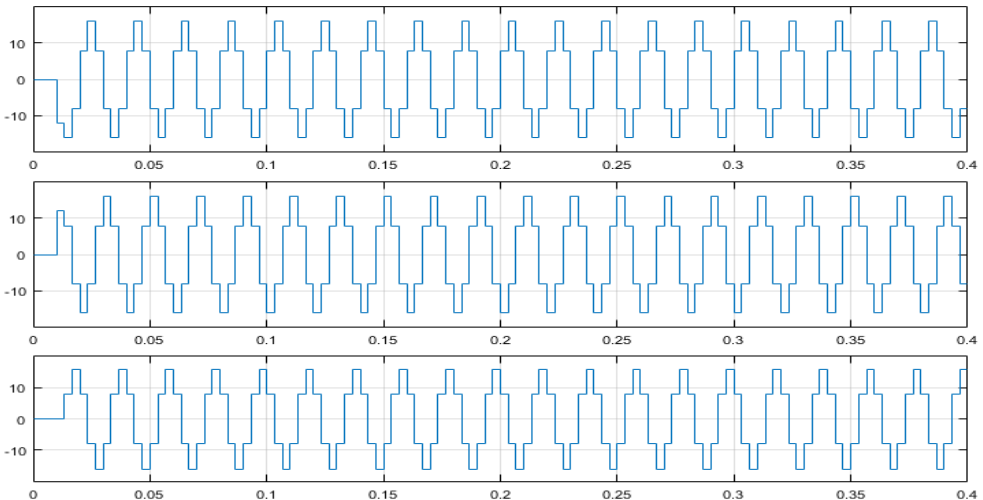


Рис. 3. Временные диаграммы выходных напряжений 180° преобразователя при симметричной нагрузке

Расчет показывает, что содержание действующего значения первой гармоники в таком напряжении составляет 0,955 от полного действующего напряжения, т.е. всего 4,5 % высших гармоник. Поэтому во многих случаях, например, при питании нагревателей или приборов освещения, влияние высших гармоник несущественно. Более того, даже при питании электродвигателей такое содержание высших гармоник практически не влияет на их характеристики. Поэтому не имеет смысла усложнять схему и вводить фильтры высших гармоник.

Когда на выходе преобразователя нагрузка несимметричная ( $R_1 \neq R_2 \neq R_3$ ), то выходная диаграмма будет тоже несимметричная (рис. 4), т.е. действующее значение фазных напряжений будет различно.

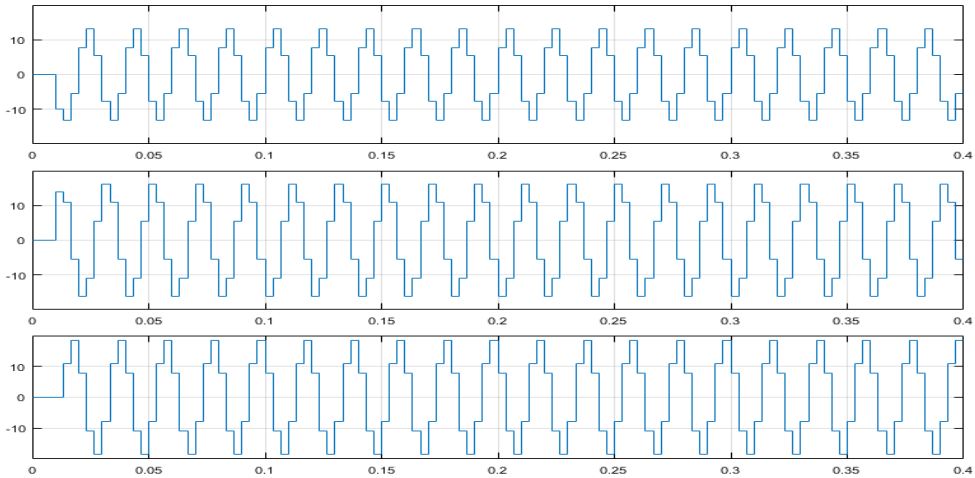


Рис. 4. Временные диаграммы выходных напряжений  $180^\circ$  преобразователя при несимметричной нагрузке

Для решения вопроса симметрирования выходных напряжений предлагается следующий принцип (рис. 5). С помощью добавочного сопротивления (на рис. 5, б это управляемый ключ  $G_8$ ) добавляем или убавляем ток в общую точку звезды, чтобы в данном случае обеспечить падение напряжения на сопротивлении  $R_2$ , равное  $2/3 U_{\text{п}}$ . Необходимую величину тока определяем по уравнению:

$$i_x = \frac{\left(\frac{2}{3} U_{\text{п}}\right) U_{R_2}}{R_2}, \quad (1)$$

где  $U_{R_2}$  – существующее фазное напряжение на резисторе  $R_2$ ;

$$U_{R_2} = i_1 \cdot R_2, \quad (2)$$

$i_1$  – ток, потребляемый от сети;  $i_1 = \frac{U_{\text{п}}}{U_{\text{ЭКВ}}}$ ;

$$U_{\text{ЭКВ}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}, \quad (3)$$

теперь, зная  $i_x$ , можно рассчитать скорректированное фазное напряжение:

$$U'_{R_2} = (i_1 + i_x) R_2. \quad (4)$$

После расчета получаем временную диаграмму тока симметрирования (рис. 6), а временная диаграмма фазных напряжений получит такой же вид, как при симметричной нагрузке (см. рис. 3).

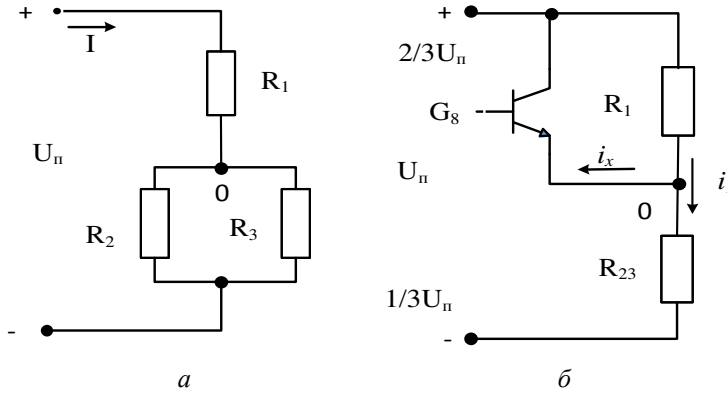


Рис. 5. Исходная схема замещения без симметрирования (а) и эквивалентная схема замещения с симметрированием (б)

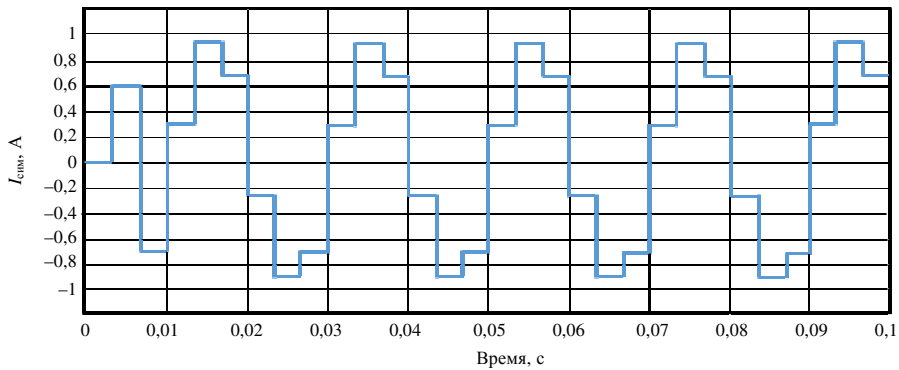


Рис. 6. Ток симметрирования

Для того чтобы операция симметрирования осуществлялась автоматически за счёт введения обратной связи по напряжению общей точки звезды относительно шины минус источника, необходимо поставить датчик напряжения этой точки относительно корпуса. Тогда, управляя дополнительными ключами, соединенными с источником постоянного тока, как это показано на рис. 7, мы можем обеспечить симметричную диаграмму фазных напряжений. Это происходит за счёт того, что система осуществляет дополнительное подключение общей точки к шине плюс или минус и по сигналам датчика напряжения воздействует на регулятор тока, который показан на рис. 7.

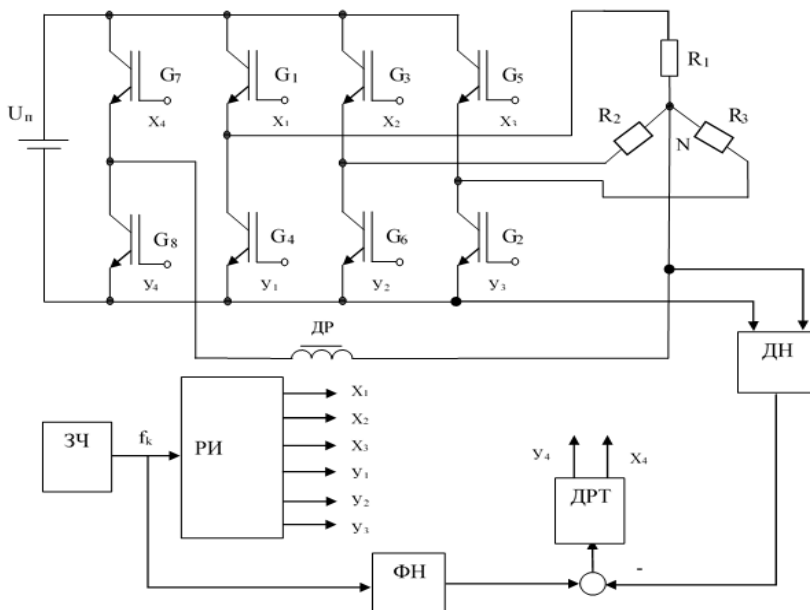


Рис. 7. Схема реализации устройства симметрирования

Блок-схема устройства, реализующего изложенный принцип, представлена на рис. 7, где обозначено:  $G_1$ – $G_6$  – основные силовые ключи инвертора напряжения;  $G_7, G_8$  – ключи дополнительной стойки, предназначенной для симметрирования напряжения;  $R_1$ – $R_3$  – сопротивления нагрузки; ДН – датчик напряжения нулевой точки относительно шины «минус» источника питания; ЗЧ – задатчик частоты коммутации ключей; РИ – распределитель импульсов управления ключами; ФН – формирователь заданного значения напряжения общей точки; ДРТ – дискретный регулятор тока.

Устройство работает следующим образом. Заданная частота коммутации ключей  $f_k = 300$  Гц, создается ЗЧ и поступает на РИ, который формирует импульсы управления ключами инвертора с частотой 50 Гц и длительностью 180 электрических градусов. За счёт этого формируется трёхфазное выходное напряжение на выходе инвертора. При симметричном режиме работы потенциал общей точки относительно шины «минус» изменяется от  $0,33$  до  $0,66U_n$  (рис. 8, сплошная линия). Поскольку потенциал периодически от такта к такту коммутации меняется, можно условно принять, что на чётном такте потенциал высокий, а на нечётном-низкий. При этом за начало отсчёта можно взять один из импульсов на выходе РИ, например  $x_1$ . Тогда с помощью ФН мы можем



формировать соответствующее симметричной нагрузке значение потенциала общей точки  $U_{oc}$  на чётных и нечётных тактах. В случае несимметрии нагрузки форма сигнала на нейтральной точке  $U_{оф}$  меняется (см. рис. 8, пунктирная линия). Определив разность напряжения  $U_{oc}$  и  $U_{оф}$ , мы можем с помощью ДРТ по сигналам  $x_4, y_4$  сформировать ток, компенсирующий несимметрию. Для этого может быть использован дискретный, работающий на данном такте регулятор тока, реализующий, например, пропорционально-интегральный (ПИ) закон управления. Регулятор воздействует на ключи  $G_7$  и  $G_8$ , изменяя скважность напряжения управления ими. На высокой частоте эти ключи совместно с дросселем ДР образуют источник тока. Тогда алгоритм работы регулятора будет такой:

$$I_{\kappa_1}[n] = I_{\kappa}[n-1] + \Delta U[n-1]k; \quad I_{\kappa_2}[n] = I_{\kappa}[n-1] + \Delta U[n-1]k, \quad (5)$$

где  $I_{\kappa}[n], I_{\kappa}[n-1]$  – компенсирующий ток соответствующего ключа на  $n$ -м и предыдущем тактах регулирования;  $\Delta U$  – отклонение напряжения общей точки от заданного;

$$\Delta U = U_{oc} - U_{оф}, \quad (6)$$

где, как показано на рис. 8,  $U_{oc}$  – заданное напряжение общей точки относительно шины «–» при симметричном режиме работы может принимать значение  $+1/3U_{п}$  на тактах № 2-4-6 и  $+2/3U_{п}$  на тактах № 1-3-5,  $U_{оф}$  – фактическое напряжение общей точки.

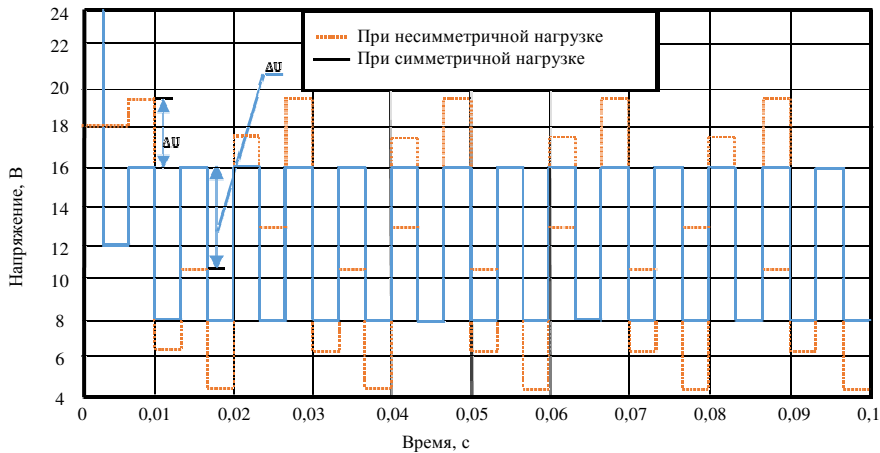


Рис. 8. Напряжение нулевой точки источника питания при симметричном (сплошные линии) и несимметричном (пунктирные линии) режиме

На рис. 9 показан переходный процесс системы автоматического симметрирования напряжения при некотором значении коэффициента  $k$ .

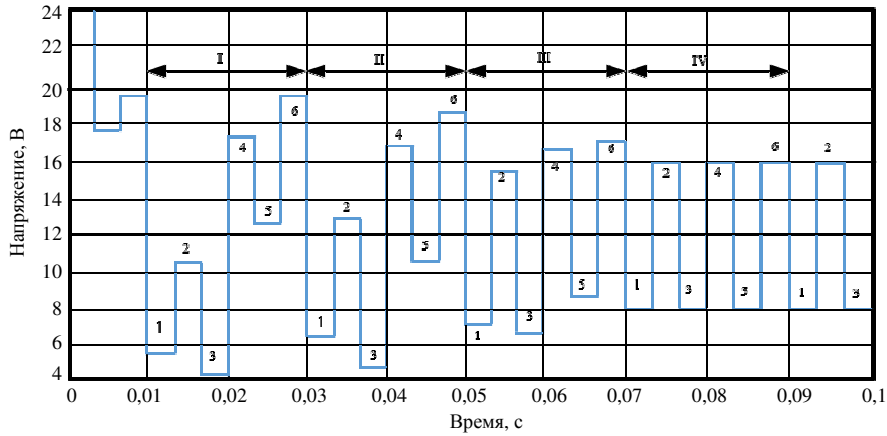


Рис. 9. Диаграмма, поясняющая принцип работы регулятора тока: I, II, III и IV – период основной частоты, 1, 2, 3, 4, 5 и 6 – номер такта дискретной коммутации внутри периода

Первый период – без регулятора, а в третьем, четвертом и пятом периоде работает регулятор компенсации тока, и за три периода напряжение нулевой точки стало симметричным.

Очевидно, что появление реактивных элементов в нагрузке инвертора приведёт к изменению формы напряжения на нулевой точке сети, так как форма фазных токов может существенно отличаться от формы напряжений. Однако важнейшим показателем остаётся равенство амплитуды напряжений на нулевой точке, и именно по этому критерию должно осуществляться управление ключами четвёртой дополнительной стойки инвертора.

Алгоритм управления ключами четвёртой стойки не изменится при реализации разных методов управления: дискретный, ШИМ-модуляции, векторного управления и при разной градусной коммутации. Но затруднения могут возникнуть, если мы будем обеспечивать синусоидальность токов методом пространственно-векторной модуляции на относительно небольшой частоте. Здесь возникает проблема фильтрации напряжений на нулевой точке, что может вызвать задержку в формировании управляющих сигналов и, как следствие, потерю устойчивости регулятора.

**Выводы:**

1. Предложен принцип симметрирования напряжения на выходе трёхфазного инвертора с использованием простейшего ПИ-регулятора тока, не требующий, по сравнению с традиционными алгоритмами, многократных координатных преобразований сигналов с датчиков фазных токов и напряжений, следовательно, не требующий больших вычислительных ресурсов.

2. Указанный алгоритм наиболее эффективен при использовании в составе мини-ГЭС, предназначенных для бытовых потребителей небольшой мощности в труднодоступных сельских районах, которые не предъявляют жёстких требований по содержанию в фазном напряжении высших гармоник.

**Библиографический список**

1. Вечиу И., Кюреа О., Кэмблонг Х. Переходные операции четырехплечевого инвертора для автономных приложений с несбалансированной нагрузкой // IEEE Trans. Power Electron. – Февраль 2010. – Т. 25. – № 2.

2. Юнвей Л., Вилатгамува Д.М., Чанг Л.П. Повышение качества микросетевой мощности с использованием трехфазного четырехпроводного компенсатора межсетевое взаимодействия // IEEE Trans. Power Electron. – Ноябрь/декабрь 2005. – Т. 19, № 1. – С. 1707–1719.

3. Гибридная энергетическая система, использующая альтернативные источники энергии на изолированном острове / Т.Сенджу Т. Накадзи, К. Узато, Т. Фунабаша // IEEE Trans. Energy Convers. – Июнь 2005. – Т. 21, № 2. – С. 406–414.

4. Марвали М.Н., Мин Д., Кейхани А. Надежный анализ стабильности контроля напряжения и тока для систем распределенной генерации // IEEE Trans. Energy Convers. – Июнь 2006. – Т. 21, № 2. – С. 516–526.

5. Блаабьерг Ф., Драгичевич Т., Давари П. Применение силовой электроники // Электроника. – 2019. – 8(4):465. DOI: [org/10.3390/electronics8040465](https://doi.org/10.3390/electronics8040465)

6. Автоматизированная мини-ГЭС как основа системы электроснабжения горных районов Таджикистана / С.Г. Воронин, А.М. Давлатов, О.О. Султонов [и др.] // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 100–107. DOI: [10.14529/power190311](https://doi.org/10.14529/power190311)

7. Аминов Д., Косимов Б., Султонов О. Разработка погружного гидрогенератора как возобновляемого источника электроэнергии для малых рек // Междунар. российская конф. по автоматизации (РусАвтоКон). – Сочи, 2020. – С. 1079–1084. DOI: 10.1109/РусАвтоКон49822.2020.9208214

8. Повышение экономической эффективности малых гидроэлектростанций республики Таджикистан / А.М. Давлатов, Б.И. Косимов, Д.Ю. Гулов, О.О. Султонов // Всерос. науч.-практ. конф. (Казань, 20–21 марта 2019 г.). – Казань: Изд-во Казан. гос. энергет. ун-та, 2019. – С. 456–461.

9. Воронин С.Г., Курносков Д.А., Кульмухаметова А.С. Векторное управление синхронными двигателями с возбуждением от постоянных магнитов // Электротехника. – 2013. – № 10. – С. 50–54.

10. Вектор управления клапанным приводом / С.Г. Воронин, Д.В. Коробатов, В.В. Запунный, П.О. Шабуров // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. – 2004. – Вып. 5. – № 4(33). – С. 11–15.

11. Стратегия управления микросетью в условиях трехфазного дисбаланса / Х. Ши, Ф. Чжуо, Х. И, З. Гэн // Современные энергетические системы и чистая энергия. – Январь 2016. – Вып. 4. – С. 94–102. DOI: 10.1007/s40565-015-0182-3

12. Стратегия управления трехфазным четырехканальным фотоэлектрическим инвертором, подключенным к сети, при несбалансированных сбоях / Х.С. Камил, Д. Мат Саид, М.В. Мустафа, М. Реза Мивех, С.М. Хусин // 7-я Международная конференция IEEE по электроэнергии и энергии (PECOn). – Куала-Лумпур, Малайзия, 2018. – С. 13–18. DOI: 10.1109 / PECOn.2018.8684184

13. Вечуи И., Куреа О., Кэмблонг Х. Переходные процессы инвертора с четырьмя ножками для автономных применений с несбалансированной нагрузкой // IEEE Trans. Power Electron. – Февраль 2010. – Т. 25, № 2.

14. Мусулин И.Я. Трехфазные инверторы Желько, обеспечивающие несимметричные, нелинейные и однофазные нагрузки // Тр. 17-й Междунар. конф. по электроприводам и силовой электронике. – 2013. – С. 184–191.

15. Чжун К., Хобсон Л., Джейн М.Г. Классический контроль нейтральной точки в 4-проводных 3-фазных преобразователях постоянного и переменного тока // Качество и использование электроэнергии. – 2005. – № 11. – С. 73–81.

16. Воронин С., Султонов О., Давлатов А. Особенности балансировки трехфазного ступенчатого напряжения на выходе полупроводниковых преобразователей // Российский семинар по энергетике и автоматизации металлургической промышленности: исследования и практика (РЕАМИ). – 2020. – С. 119–123.

17. Марвали М.Н., Дай Мин, Кейхани А. Анализ устойчивости управления напряжением и током для систем распределенной генерации // *IEEE Trans. on Energy Conversion*. – Июнь 2006. – Vol. 21, № 2. – С. 516–526. DOI: 10.1109/TEC.2005.860406

18. Сонг Х.С., Нам К. Схема двойного контроля тока для ШИМ-преобразователя в условиях несбалансированного входного напряжения // *IEEE Trans. Ind. Electron.* – Октябрь 1999. – Т. 46. – С. 953–959.

19. Воронин С.Г., Курносков Д.А., Кульмухаметова А.С. Сравнительная оценка различных способов управления коммутацией вентиляционных двигателей по энергетическим показателям и регулировочным свойствам // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. – 2013. – Т. 13. – № 1. – С. 96–103.

20. Воронин С.Г. Электропривод летательных аппаратов: конспект лекций. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. – Ч. 1. – 171 с.

### References

1. Vechiu I., Kiurea O., Kemblong Kh. Perekhodnye operatsii chetyrekhplechevogo invertora dlia avtonomnykh prilozhenii s nesbalansirovannoi nagruzkoi [Transient Operations of a Four-Arm Inverter for Offline Unbalanced Load Applications]. *IEEE Trans. Power Electron.*, February 2010, vol. 25, no. 2.

2. Iunvei L., Vilatgamuva D.M., Chang L.P. Povyslenie kachestva mikrosetevoi moshchnosti s ispol'zovaniem trekhfaznogo chetyrekhprovodnogo kompensatora mezhsetevogo vzaimodeistviia [Improving the quality of microgrid power using a three-phase four-wire interconnection compensator]. *IEEE Trans. Power Electron.*, November/December 2005, vol. 19, no. 1, pp. 1707-1719.

3. Sendzhu T., Nakadzi T., Uezato K., Funabashi T. Gibridnaia energeticheskaia sistema, ispol'zuiushchaia al'ternativnye istochniki energii na izolirovannom ostrove [A Hybrid Power System Using Alternative Energy Sources on an Isolated Island]. *IEEE Trans. Energy Convers.*, June 2005, vol. 21, no. 2, pp. 406-414.

4. Marvali M.N., Min D., Keikhani A. Nadezhnyi analiz stabil'nosti kontroliia napriazheniia i toka dlia sistem raspredelennoi generatsii [Reliable Analysis of Voltage and Current Control Stability for Distributed Generation Systems]. *IEEE Trans. Energy Convers.*, June 2006, vol. 21, no. 2, pp. 516-526.

5. Blaab'erg F., Dragichevich T., Davari P. Primenenie silovoi elektroniki [Applications of Power Electronics]. *Elektronika*, 2019, 8(4): 465. DOI: org/10.3390/electronics8040465

6. Voronin S.G., Davlatov A.M., Sulonov O.O. et al. Avtomatizirovannaia mini-GES kak osnova sistemy elektrosnabzheniia gornykh raionov Tadjikistana [Automated mini-hydroelectric power station as the basis for the power supply system of mountainous regions of Tajikistan]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Energetika*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 100-107. DOI: 10.14529/power190311

7. Aminov D., Kosimov B., Sulonov O. Razrabotka pogruzhnogo gidrogeneratora kak vozobnovliaemogo istochnika elektroenergii dlia malykh rek [Development of a Water-Submersible Hydrogenerator as a Renewable Source of Electricity for Small Rivers]. *Mezhdunarodnaia rossiiskaia konferentsiia po avtomatizatsii (RusAvtoKon)*. Sochi, 2020, pp. 1079-1084. DOI: 10.1109/РусАвтоКон49822.2020.9208214

8. Davlatov A.M., Kosimov B.I., Gulov D.Iu., Sulonov O.O. Povyshenie ekonomicheskoi effektivnosti malykh gidroelektrostantsii respubliky Tadjikistan [Increasing the economic efficiency of small hydroelectric power plants in the Republic of Tajikistan]. *Vserossiiskaia nauchno-prakticheskaiia konferentsiia (Kazan', 20-21 March 2019)*. Kazan': Kazanskii gosudarstvennyi energeticheskii universitet, 2019, pp. 456-461.

9. Voronin S.G., Kurnosov D.A., Kul'mukhametova A.S. Vektornoe upravlenie sinkhronnymi dvigateliami s vzbuzhdeniem ot postoiannykh magnitov [Vector control of synchronous motors with permanent magnet excitation]. *Elektrotehnika*, 2013, no. 10, pp. 50-54.

10. Voronin S.G., Korobotov D.V., Zapunnyi V.V., Shaburov P.O. Vektor upravleniia klapannym privodom [Vector of valve drive control]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Energetika*, 2004, iss. 5, no. 4(33), pp. 11-15.

11. Shi Kh., Chzhuo F., I Kh., Gen Z. Strategiia upravleniia mikroset'iu v usloviiakh trekhfaznogo disbalansa [Control strategy for microgrid under three-phase unbalance condition]. *Sovremennye*

*energeticheskie sistemy i chistaia energiya*. January 2016, iss. 4, pp. 94-102. DOI: 10.1007/s40565-015-0182-3

12. Kamil Kh.S., Mat Said D., Mustafa M.V., Reza Mivekh M., Khusin S.M. Strategiya upravleniia trekhfaznym chetyrekhkanal'nym fotoelektricheskim invertorom, podkliuchennym k seti, pri nesbalansirovannykh sboiakh [Control Strategy for a Three-Phase Four-leg Grid Connected PV Inverter under Unbalanced Faults]. *7-ia Mezhdunarodnaia konferentsiia IEEE po elektroenergii i energii (PECon)*. Kuala-Lumpur, Malaiziia, 2018, pp. 13-18. DOI: 10.1109/PECON.2018.8684184

13. Vechiu I., Kurea O., Kemblong Kh. Perekhodnye protsessy invertora s chetyr'mia nozhkami dlia avtonomnykh primenenii s nesbalansirovannoi nagruzkoi [Transient processes of the inverter with four legs for stand-alone applications with unbalanced load]. *IEEE Trans. Power Electron.* February 2010, vol. 25, no. 2.

14. Musulin I.Ia. Zhel'ko Trekhfaznye inventory, obespechivaiushchie nesimmetrichnye, nelineinye i odnofaznye nagruzki [Zel'ko Three-Phase Inverters Supplying Non-Symmetrical, Non-Linear and Single Phase Loads]. *Trudy 17-i Mezhdunarodnoi konferentsii po elektroprivodam i silovoi elektronike*, 2013, pp. 184-191.

15. Chzhun K., Khobson L., Dzhein M.G. Klassicheskii kontrol' neutral'noi tochki v 4-provodnykh 3-faznykh preobrazovatelyakh postoiannogo i peremennogo toka [Classical control of the neutral point in 4-wire 3-phase DC-AC converters]. *Kachestvo i ispol'zovanie elektroenergii*, 2005, no. 11, pp. 73-81.

16. Voronin S., Sultonov O., Davlatov A. Osobennosti balansirovki trekhfaznogo stupenchatogo napriazheniia na vykhode poluprovodnikovyykh preobrazovatelei [Features of Balancing a Three-Phase Step Voltage at the Output of Semiconductor Converters]. *Rossiiskii seminar po energetike i avtomatizatsii metallurgicheskoi promyshlennosti: issledovaniia i praktika (PEAMI)*, 2020, pp. 119-123.

17. Marvali M.N., Dai Min, Keikhani A. Analiz ustoiichivosti upravleniia napriazheniem i tokom dlia sistem raspredelennoi generatsii [Robust stability analysis of voltage and current control for distributed generation systems]. *IEEE Trans. on Energy Conversion*, June 2006, vol. 21, no. 2, pp. 516-526. DOI: 10.1109/TEC.2005.860406

18. Song Kh.S., Nam K. Skhema dvojnogo kontroliia toka dlia ShIM-preobrazovatelya v usloviakh nesbalansirovannogo vkhodnogo napriazheniia

[Dual Current Control Circuit for PWM Converter with Unbalanced Input Voltage]. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, October 1999, vol. 46, pp. 953-959.

19. Voronin S.G., Kurnosov D.A., Kul'mukhametova A.S. Sravnitel'naia otsenka razlichnykh sposobov upravleniia kommutatsiei ventil'nykh dvigatelei po energeticheskim pokazateliyam i regulirovochnym svoistvam [Comparative assessment of various control methods for commutation of valve motors by energy indicators and control properties]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Energetika*, 2013, vol. 13, no. 1, pp. 96-103.

20. Voronin S.G. Elektroprivod letatel'nykh apparatov [Electric drive of aircraft]. Chelyabinsk: Iuzhno-Ural'skii gosudarstvennyi universitet, 2006, part 1, 171 p.

### Сведения об авторах

**Воронин Сергей Григорьевич** (Челябинск, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Летательные аппараты» Южно-Уральского государственного университета (454080, Челябинск, пр. Ленина, 76, e-mail: sosnovka.voronin@yandex.ru).

**Султонов Оламафруз Олимович** (Челябинск, Россия) – аспирант кафедры «Теоретические основы электротехники» Южно-Уральского государственного университета (454080, Челябинск, пр. Ленина, 76, e-mail: olam.c89@mail.ru).

### About the authors

**Voronin Sergey Grigorievich** (Chelyabinsk, Russian Federation) is a Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Aircraft South Ural State University (454080, Chelyabinsk, 76, Lenina ave., e-mail: sosnovka.voronin@yandex.ru).

**Sultonov Olamafruz Olimovich** (Chelyabinsk, Russian Federation) is a Graduate Student of the Department "Theoretical Foundations of Electrical Engineering" South Ural State University (454080, Chelyabinsk, 76, Lenina ave., e-mail: olam.c89@mail.ru).

Получено 17.08.2020