

DOI: 10.15593/2224-9397/2020.1.02

УДК 621.3

Ф.А. Гельвер^{1,2}, И.В. Белоусов^{1,2}, В.Ф. Самосейко^{1,2}¹Филиал «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр»,
Санкт-Петербург, Россия²Государственный университет морского и речного флота
им. адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург, Россия

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СИНТЕЗИРУЕМОГО НАПРЯЖЕНИЯ КАСКАДНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

В связи с развитием промышленного комплекса, освоением новых технологий, увеличением объема добычи и переработки природных ресурсов, а также исследованием новых территорий в мировой электроэнергетике наблюдается повсеместное использование регулируемого электропривода и различных типов преобразователей электрической энергии, а также устойчивая тенденция роста их установленной мощности. По этим причинам, особо остро встают вопросы электромагнитной совместимости нагрузки с питающей сетью и обеспечения требуемого качества преобразуемой электроэнергии. Снижение качества преобразуемой электроэнергии приводит к ухудшению энергетических характеристик, снижению производительности, сокращению срока службы электрооборудования, а также повышению вероятности возникновения аварийных ситуаций. Одним из эффективных путей решения данной проблемы является использование каскадного преобразователя частоты, который позволяет осуществлять синтез выходного напряжения высокого качества. **Цель исследования:** разработка схемных решений и алгоритмов управления каскадным преобразователем частоты, которые позволят осуществить синтез выходного напряжения высокого качества. **Методы:** на основе теоретико-числовых методов, теоретических основ электротехники, основ силовой электроники и системы позиционного счисления выполнена проработка вариантов и способов увеличения возможного числа уровней мгновенно синтезируемого напряжения на выходе каскадного преобразователя частоты. **Результаты:** предложены схемные решения и алгоритмы управления каскадным преобразователем частоты, которые позволяют повысить качество синтезируемого напряжения. Приведено математическое описание алгоритмов управления элементарными ячейками каскадного преобразователя частоты, позволяющих синтезировать требуемые напряжения. Представлено количественное и качественное сравнение способов повышения качества синтезируемого напряжения на выходе каскадного преобразователя частоты, изображена гистограмма зависимости количества синтезируемых уровней напряжения от схемы построения элементарной ячейки, числа ячеек и алгоритмов управления. Приведен результат математического моделирования фазного напряжения на выходе каскадного преобразователя частоты, синтезируемого с помощью трех двухуровневых ячеек с дифференцированным напряжением питания и алгоритмами управления с суммированием и разностью напряжений ячеек в фазе. **Практическая значимость:** предложенные схемы и способы повышения качества синтезируемого напряжения на выходе каскадного преобразователя частоты и результаты проведенных исследований могут быть использованы при проектировании и разработке электрических преобразователей электроэнергии с высоким качеством выходного напряжения. Это позволяет повысить энергетическую эффективность и существенно улучшить гармонический состав синтезируемого напряжения.

Ключевые слова: каскадный преобразователь частоты, качество синтезируемого напряжения, электромагнитная совместимость, ячейка, уровень напряжения, инвертор напряжения, позиционная система счисления, дифференцированное питание ячеек, широтно-импульсная модуляция.

F.A. Gelver^{1,2}, I.V. Belousov^{1,2}, V.F. Samoseiko^{1,2}

¹Branch of the Central Research Institute SET, FSUE Krylov State Research Center, Saint Petersburg, Russian Federation

²State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S.O. Makarova, Saint Petersburg, Russian Federation

METHODS FOR IMPROVING THE QUALITY OF SYNTHESIZABLE VOLTAGE OF THE CASCADE FREQUENCY CONVERTER

In connection with the development of the industrial complex, the development of new technologies, the increase in the extraction and processing of natural resources, as well as the study of new territories, there is a widespread use of a controlled electric drive and various types of electric energy converters in the world electric power industry, as well as a steady growth trend in their installed power. For these reasons, the issues of electromagnetic compatibility of the load with the supply network and ensuring the required quality of the converted electricity are particularly acute. A decrease in the quality of the converted electricity leads to a deterioration in energy performance, a decrease in productivity, a reduction in the life of electrical equipment, as well as an increase in the likelihood of an emergency. One of the effective ways to solve this problem is to use a cascade frequency converter, which allows the synthesis of high quality output voltage. **Purpose:** the development of circuit solutions and control algorithms for a cascade frequency converter that will allow the synthesis of high quality output voltage. **Methods:** on the basis of number-theoretic methods, theoretical foundations of electrical engineering, fundamentals of power electronics and positional number system, the study of options and ways to increase the possible number of levels of instantly synthesized voltage at the output of a cascade frequency converter was carried out. **Results:** proposed circuit solutions and control algorithms for a cascade frequency converter, which will improve the quality of the synthesized voltage. A mathematical description of the control algorithms of the unit cells of the cascade frequency converter, allowing to synthesize the required voltage. A quantitative and qualitative comparison of ways to improve the quality of the synthesized voltage at the output of a cascade frequency converter is presented, a histogram of the dependence of the number of synthesized voltage levels on the unit cell construction scheme, the number of cells and control algorithms is shown. The result of mathematical modeling of the phase voltage at the output of a cascade frequency converter synthesized using three two-level cells with differentiated supply voltage and control algorithms with summation and difference of cell voltages in phase is presented. **Practical relevance:** the proposed schemes and methods for improving the quality of the synthesized voltage at the output of the cascade frequency converter and the results of the studies can be used in the design and development of electric power converters with high quality output voltage. This allows you to increase energy efficiency and significantly improve the harmonic composition of the synthesized voltage.

Keywords: cascade frequency converter, quality of synthesized voltage, electromagnetic compatibility, cell, voltage level, voltage inverter, positional number system, differentiated cell power, pulse-width modulation.

Введение. В настоящее время в мировой электроэнергетике наблюдается устойчивая тенденция роста установленной мощности энергоустановок. Такая тенденция связана с развитием промышленного комплекса, освоением новых технологий, увеличением объема добычи и переработки природных ресурсов, а также исследованием новых территорий. Большая доля среди потребителей электроэнергии приходится на регулируемый электропривод, без использования которого не-

мыслима работа промышленных предприятия, систем водоснабжения, горно-металлургических комплексов, электротранспорта и т.д. Использование регулируемого электропривода позволяет получить лучшие функциональные возможности установок и механизмов, осуществить автоматизацию технологического процесса и, что самое важное, осуществить экономичное регулирование потока энергии [1, 2]. Особое место в электроприводе отводится электрическому преобразователю, посредством которого осуществляется управление электрической машиной и осуществляется регулирование потока энергии в электрическом силовом канале. Особую популярность в электроэнергетике, особенно в автономных системах электроснабжения, находят преобразователи электрической энергии, способные синтезировать выходное напряжение с требуемыми показателями качества [3–5]. В связи с этим особо остро встают вопросы электромагнитной совместимости нагрузки с питающей сетью и обеспечения требуемого качества преобразуемой электроэнергии. Как правило, качество электроэнергии питающей сети обеспечивается поставщиком электроэнергии при ограничениях, наложенных на параметры электрической нагрузки. А вот качество напряжения, синтезируемого электрическими преобразователями, должно обеспечиваться возможностями их элементной базы, схемотехнической реализацией такого преобразователя и алгоритмами его управления. Снижение качества электроэнергии, преобразуемой электрическим преобразователем, приводит к изменению режима работы потребителя электрической энергии, ухудшению энергетических характеристик и его производительности, сокращению службы электрооборудования, а также повышению вероятности возникновения аварийных ситуации. С ростом установленной мощности энергоустановок данные вопросы приобретают особую актуальность и требуют внимания специалистов.

Таким образом, современный электрический преобразователь должен обеспечивать высокое качество синтезируемых напряжений для питания электрической нагрузки, а также иметь высокие показатели электромагнитной совместимости с питающей сетью. Кроме того, электрический преобразователь помимо выполнения требований технологического процесса должен обладать высокой надежностью.

Существует множество структур схемотехнической реализации электрического преобразователя регулируемого электропривода [6–7].

Каждая из этих структур имеет свои достоинства и недостатки. Однако при реализации электрических преобразователей большой мощности и ограничений, наложенных на параметры используемых полупроводниковых ключей, имеются два варианта реализации: параллельное соединение полупроводниковых элементов – увеличение тока; либо последовательное соединение полупроводниковых элементов – увеличение напряжения. Параллельное соединение полупроводниковых элементов требует равномерного распределения тока между ними и не всегда может быть реализовано в динамике. А вот последовательное соединение полупроводниковых элементов, с обеспечением распределения напряжения за счет организации питания электрического преобразователя, может быть реализовано с использованием многоуровневых преобразователей частоты [8–10]. Кроме того, такие преобразователи частоты обеспечивают высокое качество синтезируемых напряжений и лучшие показатели качества электромагнитной совместимости с питающей сетью [11], [12].

Всем вышеизложенным требованиям и возможностью реализации электрического преобразователя неограниченной мощности обладает только один тип электрического преобразователя – каскадный преобразователь частоты (КПЧ). Более подробно рассмотрим его достоинства и недостатки, пути устранения недостатков, а также возможность повышения качества вырабатываемой и потребляемой электроэнергии.

Принцип работы каскадного преобразователя частоты основан на последовательном соединении элементарных ячеек – однофазных преобразователей частоты в каждой из фаз каскадного преобразователя частоты (рис. 1).

Такое соединение однофазных преобразователей частоты позволяет увеличить количество уровней синтезируемого напряжения и, следовательно, улучшить его качество, а также увеличить максимальное значение напряжения на выходе каскадного преобразователя частоты [13]. Таким образом, улучшение качества синтезируемого напряжения, а также рост установленной мощности в таком преобразователе частоты обеспечиваются увеличением значения напряжения в каждой фазе каскадного преобразователя частоты путем суммирования напряжения элементарных ячеек. Более подробно принцип работы каскадного преобразователя частоты описан во многих источниках [6–7], [14–19] и не требует дополнительного пояснения.

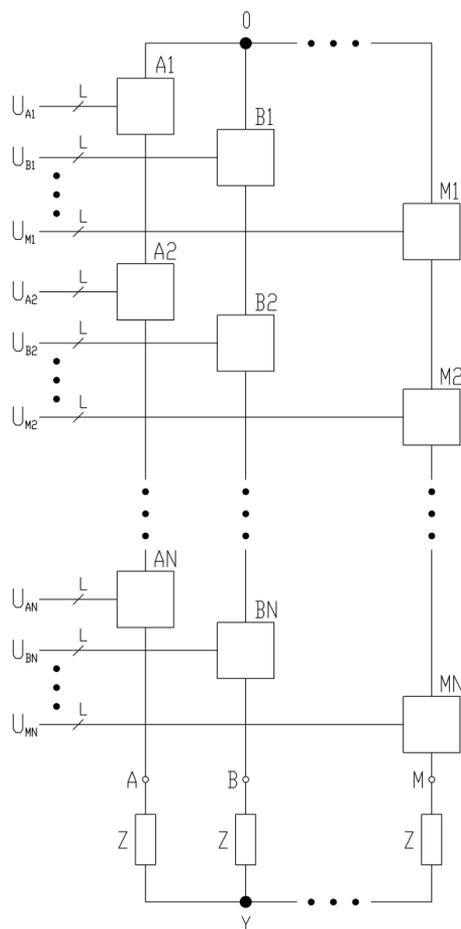


Рис. 1. Структурная схема соединения элементарных ячеек каскадного преобразователя частоты

Следует отметить, что элементарные ячейки – однофазные преобразователи частоты могут быть построены по схеме двухзвенных преобразователей частоты с инверторами напряжения (рис. 2, б, в, г) [20] и непосредственных преобразователей частоты (рис. 2, а) [14].

Однако из-за постоянного возникновения коммутационных перенапряжений на полностью управляемых полупроводниковых ключах в непосредственных преобразователях частоты последние не получили широкого распространения, хотя и обладают потенциальными возможностями улучшения массогабаритных характеристик, улучшения энергетической и электромагнитной совместимости преобразователя с питающей сетью и нагрузкой, а также возможностями двухстороннего обмена энергией [21].

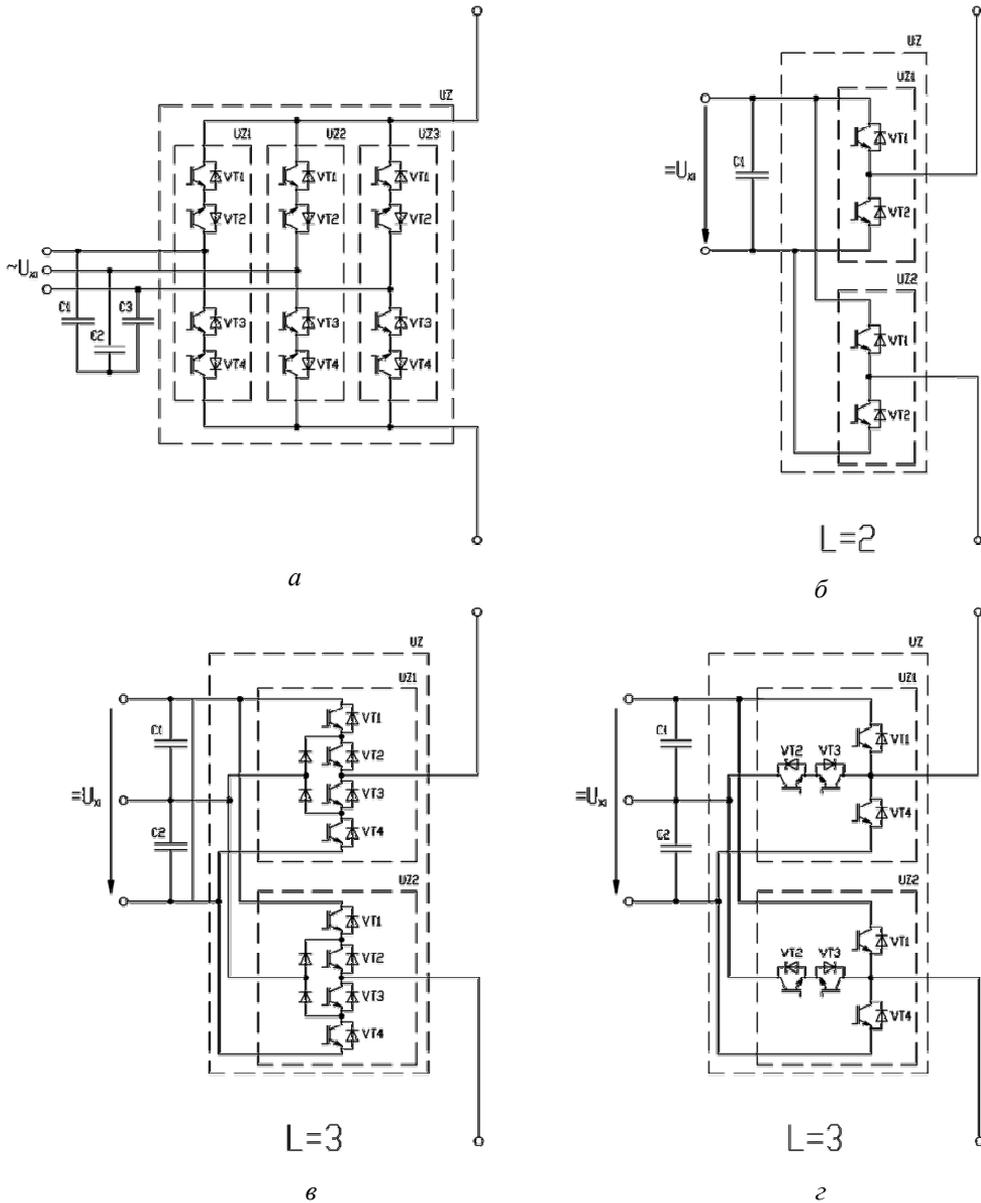


Рис. 2. Схемы построения элементарных ячеек каскадного преобразователя частоты на базе: *а* – непосредственного преобразователя частоты; *б* – двухуровневого инвертора напряжения; *в* – трехуровневого инвертора напряжения с нулевой точкой; *г* – трехуровневого инвертора напряжения с Т-образной схемой соединения транзисторов

В данной статье будут рассмотрены структуры построения и алгоритмы синтеза выходного напряжения и управления ячейками каскадного преобразователя частоты на основе инверторов напряжения.

Тем не менее предложенные в статье алгоритмы могут быть использованы и при проектировании и синтезе алгоритмов управления каскадного преобразователя частоты на основе элементарных ячеек, построенных по схеме непосредственных преобразователей частоты.

Более подробно рассмотрим достоинства и недостатки каскадных преобразователей частоты. Каскадные преобразователи частоты (КПЧ) обладают следующими достоинствами:

- 1) возможность создания электрического преобразователя неограниченной мощности;
- 2) возможность синтеза выходного напряжения высокого качества благодаря многоуровневой схеме;
- 3) унификация используемых элементарных ячеек – однофазных преобразователей частоты, модульность конструкции, взаимозаменяемость и простая замена вышедшей из строя ячейки;
- 4) высокая степень надежности;
- 5) использование низковольтной элементной базы;
- 6) высокое качество потребляемого из сети тока и, соответственно, хорошая электромагнитная совместимость с питающей сетью;
- 7) высокий коэффициент мощности и КПД;
- 8) возможность шунтирования вышедшей из строя ячейки без выключения КПЧ из работы.

Несмотря на многочисленные достоинства, по сравнению с остальными схемами электрических преобразователей КПЧ имеют и ряд недостатков:

- 1) большое количество силовых полупроводниковых приборов, конденсаторов звена постоянного тока; более сложная система управления, которая, как правило, имеет иерархическую структуру построения с разделением на систему управления всем КПЧ и системы управления силовыми полупроводниковыми ключами в каждой из элементарных ячеек;
- 2) при использовании ячеек с неуправляемым выпрямителем невозможно осуществить режим рекуперации электроэнергии в питающую сеть;
- 3) при коэффициенте мощности электрической нагрузки, отличном от единицы, поток энергии в инверторах элементарных ячеек периодически изменяет свое направление. При этом энергия, поступающая в звено постоянного тока, подзаряжает конденсатор элементарной ячейки. Следовательно, для компенсации реактивной мощности

нагрузки емкость данных конденсаторов требуется значительно больше, чем в схеме классического трехфазного инвертора напряжения, где потоки энергии от каждой из фаз взаимно компенсируют друг друга;

4) наличие сложного многообмоточного силового согласующего трансформатора, рассчитанного на полную мощность каскадного преобразователя частоты.

Следует отметить, что второй и третий пункты представленных недостатков КПЧ могут быть устранены использованием иной схемотехники построения входной части элементарных ячеек, а именно с использованием активных выпрямителей, имеющих возможность рекуперации энергии в питающую сеть [22–24]. Кроме того, такие выпрямители позволяют осуществлять работу КПЧ с заданным коэффициентом мощности питающей сети и потреблять из сети практически синусоидальные фазные токи, что также благоприятно отразится на электромагнитной совместимости КПЧ с питающей сетью.

Четвертый пункт недостатков может быть устранен при построении автономной электроэнергетической системы при ее комплексном проектировании и с питанием элементарных ячеек КПЧ от гальванически изолированных источников питания [25, 26], например, аккумуляторов, электрических генераторов и т.д.

Структура построения КПЧ обладает широчайшими потенциальными возможностями в части улучшения качества синтезируемого напряжения, улучшения энергетической и электромагнитной совместимостей КПЧ с питающей сетью и нагрузкой и т.д.

Более подробно рассмотрим возможности повышения качества синтезируемого напряжения на выходе КПЧ.

Потенциально повышение качества синтезируемого напряжения на выходе КПЧ может быть достигнуто:

- последовательным соединением элементарных ячеек в фазе КПЧ;
- использованием многоуровневых инверторов напряжения при построении элементарных ячеек КПЧ;
- использованием дифференцированных напряжений питания ячеек КПЧ;
- использованием как суммы, так и разности дифференцированных выходных напряжений ячеек при формировании фазного напряжения КПЧ.

Более подробно рассмотрим каждый из предложенных вариантов повышения качества синтезируемого напряжения на выходе КПЧ.

Последовательное соединение двухуровневых ячеек с одинаковым уровнем напряжения питания и суммированием их выходных напряжений в каждой фазе КПЧ. При последовательном соединении N одинаковых ячеек, реализованных на двухуровневых инверторах напряжения, в каждой фазе КПЧ максимальное значение напряжения на выходе каждой элементарной ячейки должно быть следующим:

$$u_i = \frac{u_{\max}}{N},$$

где i – номер ячейки уровня в фазе КПЧ, $i = 1..N$; u_{\max} – максимальное значение напряжения выходной фазы КПЧ относительно его «0» точки (см. рис. 1). Максимально возможное число уровней синтезируемого напряжения на выходе фазы КПЧ равно $2N + 1$.

Как видно из данной формулы, для получения большого количества уровней синтезируемого напряжения требуется значительное количество последовательно соединенных ячеек в фазе КПЧ.

С целью не допустить превышения максимально допустимого значения напряжения на конденсаторе должно выполняться условие:

$$C > \frac{i_m (\sin(\varphi) - \cos(\varphi) \varphi)}{2\omega \left(u_{\lim} - \frac{u_{\max}}{N} \right)},$$

где C – емкость конденсатора в ячейке, u_{\lim} – максимально допустимое напряжение на конденсаторе, i_m – максимальная амплитуда фазного тока, φ – максимальный угол между током и напряжением фазы, ω – минимальная циклическая частота напряжения фазы.

Следует отметить, что при такой топологии и схеме питания ячеек КПЧ широтно-импульсная модуляция (ШИМ) осуществляется во всех ячейках каждой фазы КПЧ поочередно и равномерно, что обеспечивает более равномерную загрузку ячеек. Кроме того, такая топология и организация питания ячеек КПЧ позволяют использовать абсолютно одинаковые ячейки и отличаются простотой, унификацией и высокой степенью надежности. Однако для получения большого количества уровней и высокого качества синтезируемого напряжения требуется использование значительного количества последовательно соединенных ячеек в фазе КПЧ.

Последовательное соединение L -уровневых ячеек с одинаковым уровнем напряжения питания и суммированием их выходных напряжений в каждой фазе КПЧ. При последовательном соединении N одинаковых ячеек, реализованных на L -уровневых инверторах напряжения с одинаковым напряжением питания, в каждой многоуровневой ячейке реализуется уровень напряжения $2L - 1$. Максимально возможное число уровней синтезируемого напряжения на выходе фазы КПЧ равно: $2(L - 1)N + 1$.

Согласно полученной зависимости увеличение числа уровней, реализуемых многоуровневым инвертором напряжения в каждой элементарной ячейке, улучшает качество синтезируемого напряжения и позволяет использовать низковольтные полупроводниковые элементы. Следует заметить, что при этом усложняется схемотехническая реализация такой элементарной ячейки, а также требуется организация многоуровневого источника питания для работы L -уровневого инвертора напряжения.

При одинаковом уровне напряжений питания элементарных ячеек КПЧ ШИМ осуществляется во всех ячейках каждой фазы КПЧ поочередно и равномерно, что так же, как и в предыдущем варианте, обеспечивает более равномерную загрузку ячеек. Однако по сравнению с предыдущим вариантом повышения качества синтезируемого напряжения на выходе КПЧ данный вариант позволяет увеличить число уровней и улучшить качество синтезируемого напряжения на выходе фазы КПЧ.

Последовательное соединение L -уровневых ячеек с дифференцированным уровнем напряжения питания и суммированием их выходных напряжений в каждой фазе КПЧ. При такой схеме и организации питания КПЧ значительно усложняются как сама элементарная ячейка КПЧ, так и источник электропитания КПЧ. Однако такая структура и дифференцированное питание ячеек позволяют значительно увеличить количество уровней мгновенно синтезируемого напряжения, а следовательно, улучшить его качество. Более подробно опишем методику выбора напряжений ячеек в фазе КПЧ и алгоритм формирования фазного напряжения КПЧ.

Пусть каждая фаза КПЧ содержит NL -уровневых ячеек, при этом в каждой многоуровневой ячейке реализуется уровень напряжения $2L - 1$. Тогда минимальный по модулю уровень напряжения, синтезируемого ячейкой с номером i , должен быть следующим:

$$\frac{u_{\max} \cdot L^{i-1}}{(L^N - 1)},$$

где u_{\max} – максимальное значение напряжения фазы каскадного преобразователя относительно общей точки каскадов («0» преобразователя).

При этом ячейка должна формировать значения напряжений на своём выходе от $-\frac{u_{\max} \cdot L^{i-1}}{L^N - 1} \cdot (L - 1)$ до значения $\frac{u_{\max} \cdot L^{i-1}}{L^N - 1} \cdot (L - 1)$.

Для определения значений напряжения, которые требуется формировать каждой многоуровневой ячейкой, предлагается использовать следующий алгоритм.

Введем коммутационную переменную – целое число z :

$$z = \left\lfloor \frac{|u|}{u_{\max}} \cdot (L^N - 1) \right\rfloor,$$

где $\lfloor x \rfloor$ – целая часть числа, u – требуемое мгновенное значение напряжения фазы каскадного преобразователя относительно общей точки каскадов («0» преобразователя).

Представим z в позиционной системе счисления с основанием L и числом разрядов, равным N : $z = \sum_{i=0}^{i=N-1} b_i \cdot L^i$, где b_i – целые неотрицательные числа, меньшие L . Для нахождения b_i используются следующие рекуррентные формулы:

$$d_0 = z, d_{i+1} = \left\lfloor \frac{d_i}{L} \right\rfloor, \text{ для } i \text{ от } 0 \text{ до } N - 1, b_i = d_i - d_{i+1} \cdot L.$$

Если $z = L^N - 1$, положим $c_i = L - 1$, для i от 0 до $N - 1$. В противном случае представим $z + 1$ в позиционной системе счисления с основанием L и числом разрядов, равным N :

$$z + 1 = \sum_{i=0}^{i=N-1} c_i \cdot L^i,$$

где c_i – целые неотрицательные числа, меньшие L .

Тогда для формирования мгновенного значения напряжения фазы каскадного преобразователя относительно общей точки каскадов («0» преобразователя) ячейки с номерами i должны на периоде ШИМ T_{PWM} одновременно формировать значения напряжений:

$$ul_i = \frac{u_{\max} \cdot b_{i-1} \cdot L^{i-1} \cdot \text{sign}(u)}{L^N - 1}$$

в течение времени

$$t_l = \left(1 - \left\{ \frac{|u|}{u_{\max}} \cdot (L^N - 1) \right\} \right) \cdot T_{PWM},$$

и одновременно формировать значения напряжений

$$uh_i = \frac{u_{\max} \cdot c_{i-1} \cdot L^{i-1} \cdot \text{sign}(u)}{L^N - 1}$$

в течение времени

$$t_h = \left\{ \frac{|u|}{u_{\max}} \cdot (L^N - 1) \right\} \cdot T_{PWM},$$

где T_{PWM} – период широтно-импульсной модуляции, $\{x\}$ – дробная часть числа x , а $\text{sign}(x)$ – знаковая функция.

В результате в фазе каскадного преобразователя частоты будет сформировано напряжение, равное заданному значению u :

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^N \left(ul_i \frac{t_l}{T_{PWM}} + uh_i \frac{t_h}{T_{PWM}} \right) = \\ & = \frac{u_{\max}}{L^N - 1} \left(\left(1 - \left\{ \frac{|u|}{u_{\max}} (L^N - 1) \right\} \right) \sum_{i=1}^N (b_{i-1} \cdot L^{i-1}) + \left\{ \frac{|u|}{u_{\max}} (L^N - 1) \right\} \sum_{i=1}^N (c_{i-1} \cdot L^{i-1}) \text{sign}(u) \right) = \\ & = \frac{u_{\max}}{L^N - 1} \left(\left\lfloor \frac{|u|}{u_{\max}} (L^N - 1) \right\rfloor + \left\{ \frac{|u|}{u_{\max}} (L^N - 1) \right\} \right) \text{sign}(u) = u. \end{aligned}$$

Количество уровней, формируемых в фазе КПЧ, состоящего из NL -уровневых ячеек, равно $2L^N - 1$.

Если синтезируемое фазное напряжение и ток нагрузки КПЧ имеют разные знаки, то энергия будет передаваться от нагрузки в источники постоянного напряжения ячеек фазы КПЧ. Если указанные источники не могут принять энергию, то она перейдет в энергию заряда конденсатора.

С целью не допустить превышения максимально допустимого значения напряжения на конденсаторе звена постоянного тока элементарной ячейки должно выполняться приближенное условие:

$$C_i > \frac{i_m (1 - \cos(\varphi))}{2\omega \left(i_{\text{lim}} - \frac{u_{\text{max}} \cdot L^{i-1}}{L^N - 1} \right)},$$

для всех ячеек, удовлетворяющих условию:

$$\sin(\varphi) > \frac{L^{i-1} - 1}{L^N - 1},$$

где C_i – емкость конденсатора в i -й ячейке, u_{lim} – максимально допустимое напряжение на конденсаторе, i_m – максимальная амплитуда фазного тока, φ – максимальный угол между током и напряжением фазы, ω – минимальная циклическая частота напряжения фазы.

Если такое условие не выполняется, то данная проблема может быть решена следующим образом. В каждую фазу КПЧ нужно добавить ячейку с номером $N + 1$, способную принимать энергию рекуперации от нагрузки и способную формировать одно из трех значений напряжений: $-u_{\text{max}}$; 0 ; u_{max} .

Значение напряжения, формируемое этой ячейкой, определяется по формуле:

$$u_{N+1} = \begin{cases} 0, & \text{если } u \cdot i \geq 0, \\ u_{\text{max}} \cdot \text{sign}(u), & \text{если } u \cdot i < 0. \end{cases}$$

Суммарное значение напряжения, формируемое ячейками с номерами от 1 до N , равно $u - u_{N+1}$.

Формирование последнего осуществляется по рассмотренному выше алгоритму.

Использование дифференцированных напряжений питания элементарных ячеек КПЧ позволит значительно увеличить количество уровней в синтезируемом выходном напряжении КПЧ, а следовательно, улучшить качество напряжения и, соответственно, электромагнитную совместимость КПЧ с нагрузкой.

Последовательное соединение L-уровневых ячеек с дифференцированным уровнем напряжения питания как с суммированием, так и с разностью выходных напряжений ячеек в каждой

из фаз КПЧ. Такая топология и организации питания КПЧ являются самыми сложными при реализации как самих элементарных ячеек, так и всего КПЧ в целом. Структура построения силовой части ячейки подразумевает использование обратимого электрического преобразователя, способного осуществлять регулирование потока энергии в обе стороны.

Более подробно опишем методику выбора напряжений ячеек в фазе КПЧ и алгоритм формирования фазного напряжения КПЧ.

Рассмотрим такую постановку, при которой каждая фаза КПЧ содержит NL -уровневых ячеек, при этом в каждой многоуровневой ячейке реализуется уровень напряжения $2L - 1$. Тогда минимальный по модулю уровень напряжения, синтезируемого ячейкой с номером i , должен вычисляться по формуле:

$$\frac{2u_{\max}(2L-1)^{i-1}}{(2L-1)^N - 1},$$

где u_{\max} – максимальное значение напряжения фазы каскадного преобразователя относительно общей точки каскадов («0» преобразователя).

При этом ячейка должна формировать значения напряжений на своём выходе от

$$\frac{u_{\max} 2(2L-1)^{i-1} (L-1)}{(2L-1)^N - 1}$$

до значения

$$\frac{u_{\max} 2(2L-1)^{i-1} (L-1)}{(2L-1)^N - 1}.$$

Для определения значений напряжения, которые требуется формировать каждой многоуровневой ячейкой, предлагаем использовать следующий алгоритм.

Введем коммутационную переменную – целое число z :

$$z = \left\lfloor \left(\frac{u}{u_{\max}} + 1 \right) \frac{(2L-1)^N - 1}{2} \right\rfloor,$$

где $\lfloor x \rfloor$ – целая часть числа, u – требуемое мгновенное значение напряжения фазы каскадного преобразователя относительно общей точки каскадов («0» преобразователя).

Представим z в позиционной системе счисления с основанием $2L - 1$ и числом разрядов, равным N : $z = \sum_{i=0}^{i=N-1} b_i (2L - 1)^i$, где b_i – целые неотрицательные числа, меньшие $2L - 1$. Для нахождения b_i используются следующие рекуррентные формулы:

$$d_0 = z, d_{i+1} = \left\lfloor \frac{d_i}{2L - 1} \right\rfloor, \text{ для } i \text{ от } 0 \text{ до } N - 1, b_i = d_i - d_{i+1} (2L - 1).$$

Если $z = (2L - 1)^N - 1$, положим $c_i = 2L - 1$, для i от 0 до $N - 1$. В противном случае представим $z + 1$ в позиционной системе счисления с основанием $2L - 1$ и числом разрядов, равным N :

$$z + 1 = \sum_{i=0}^{i=N-1} c_i (2L - 1)^i,$$

где c_i – целые неотрицательные числа, меньшие $2L - 1$.

Тогда для формирования мгновенного значения напряжения фазы каскадного преобразователя относительно общей точки каскадов («0» преобразователя) ячейки с номерами i должны на периоде ШИМ T_{PWM} одновременно формировать значения напряжений

$$ul_i = u_{\max} \left(\frac{2b_{i-1} (2L - 1)^{i-1}}{(2L - 1)^N - 1} - 1 \right)$$

в течение времени

$$t_i = \left(1 - \left\{ \left(\frac{u}{u_{\max}} + 1 \right) \frac{(2L - 1)^N - 1}{2} - 1 \right\} \right) T_{PWM}$$

и одновременно формировать значения напряжений

$$ul_i = u_{\max} \left(\frac{2c_{i-1} (2L - 1)^{i-1}}{(2L - 1)^N - 1} - 1 \right)$$

в течение времени

$$t_h = \left\{ \left(\frac{u}{u_{\max}} + 1 \right) \frac{(2L - 1)^N - 1}{2} - 1 \right\} T_{PWM},$$

где T_{PWM} – период широтно-импульсной модуляции, $\{x\}$ – дробная часть числа x .

В результате в фазе каскадного преобразователя частоты будет сформировано напряжение, равное заданному значению u :

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^N \left(ul_i \frac{t_l}{T_{PWM}} + uh_i \frac{t_h}{T_{PWM}} \right) = \\ & = u_{\max} \left(\frac{2}{(2L-1)^N - 1} \left(\left(1 - \left\{ \left(\frac{|u|}{u_{\max}} + 1 \right) \frac{(2L-1)^N - 1}{2} \right\} \right) \cdot \sum_{i=1}^N (b_{i-1} (2L-1)^{i-1}) + \right. \right. \\ & \left. \left. + \left(1 - \left\{ \left(\frac{|u|}{u_{\max}} + 1 \right) \frac{(2L-1)^N - 1}{2} \right\} \right) \cdot \sum_{i=1}^N (c_{i-1} (2L-1)^{i-1}) \right) - 1 \right) = \\ & = u_{\max} \left(\frac{2}{(2L-1)^N - 1} \left(\left[\left(\frac{|u|}{u_{\max}} + 1 \right) \cdot \frac{2}{(2L-1)^N - 1} \right] + \left\{ \left(\frac{|u|}{u_{\max}} + 1 \right) \frac{(2L-1)^N - 1}{2} \right\} \right) - 1 \right) = u. \end{aligned}$$

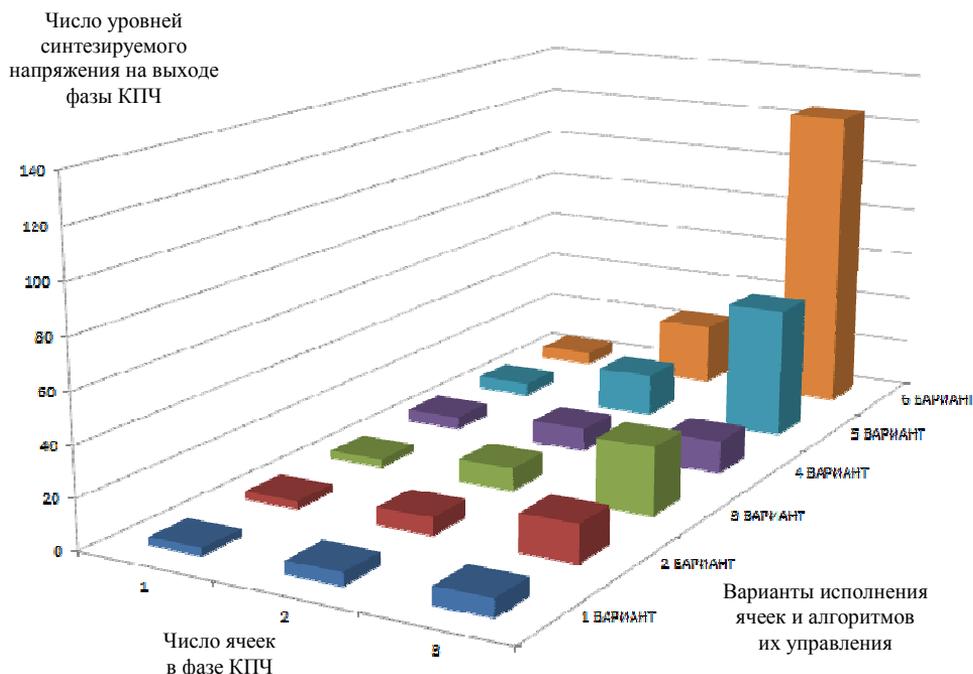
Количество уровней, формируемых в фазе КПЧ, состоящей из NL -уровневых ячеек, равно $(2L-1)^N$.

Такая структура построения элементарных ячеек КПЧ с дифференцированными уровнями питания при использовании обратимых электрических преобразователей позволяет осуществлять как суммирование выходных напряжений элементарных ячеек фазы КПЧ, так и вычитание. В результате качество синтезируемого напряжения значительно улучшается, а форма синтезируемого напряжения может быть максимально приближена к заданной.

Предложенные варианты построения элементарных ячеек и их дифференцированное питание позволяют получить максимально возможное количество уровней напряжения, а, соответственно, при оптимальных алгоритмах управления и прочих равных условиях получить экстремум показателя качества синтезируемого напряжения среди всех рассмотренных вариантов.

На рис. 3 представлено количественное сравнение различных вариантов повышения качества синтезируемого фазного напряжения КПЧ в зависимости от числа ячеек в каждой из фаз КПЧ.

На рис. 4 представлен результат синтеза выходного синусоидального напряжения фазы КПЧ, состоящей из трех двухуровневых ячеек с дифференцированным напряжением питания с возможностью суммирования и вычитания выходных напряжений.



Число уровней синтезируемого напряжения на выходе фазы КПЧ					
Количество ячеек в фазе КПЧ	1	2	3	...	N
1-й вариант (двухуровневые ячейки фазы КПЧ с одинаковым напряжением питания и суммированием выходных напряжений)	3	5	7	...	$2N+1$
2-й вариант (двухуровневые ячейки фазы КПЧ с дифференцированным напряжением питания и суммированием выходных напряжений)	3	7	15	...	$2^{N+1}-1$
3-й вариант (двухуровневые ячейки фазы КПЧ с дифференцированным напряжением питания с суммированием и с разностью выходных напряжений)	3	9	27	...	3^N
4-й вариант (трехуровневые ячейки фазы КПЧ с одинаковым напряжением питания и суммированием выходных напряжений)	5	9	13	...	$4 \cdot N+1$
5-й вариант (трехуровневые ячейки фазы КПЧ с дифференцированным напряжением питания и суммированием выходных напряжений)	5	17	53	...	$2 \cdot 3^N - 1$
6-й вариант (трехуровневые ячейки фазы КПЧ с дифференцированным напряжением питания с суммированием и с разностью выходных напряжений)	5	25	125	...	5^N

Рис. 3. Количественное сравнение различных вариантов повышения качества синтезируемого фазного напряжения КПЧ в зависимости от числа ячеек в фазе КПЧ

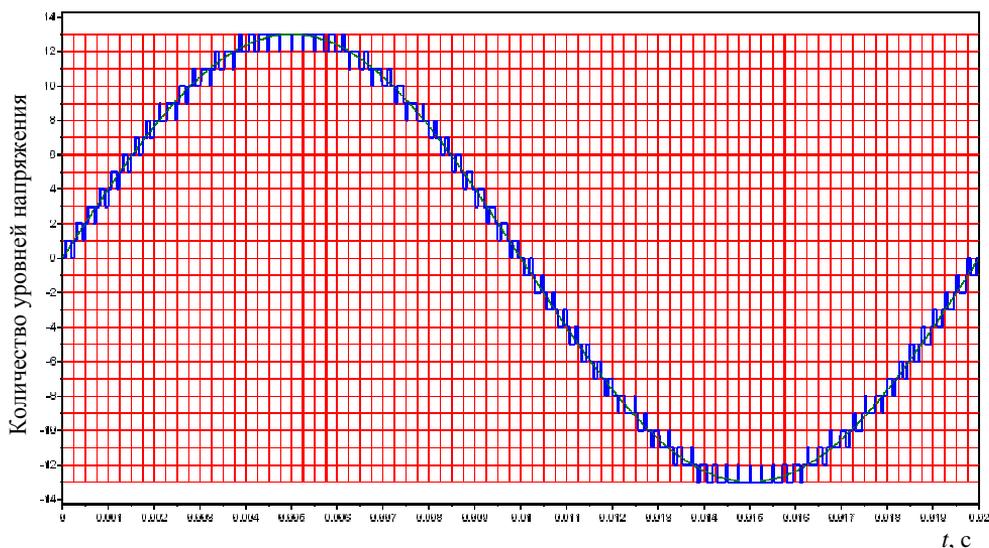


Рис. 4. Результат синтеза выходного синусоидального напряжения фазы КПЧ состоящей из трех двухуровневых ячеек с дифференцированным напряжением питания с возможностью суммирования и вычитания выходных напряжений

Выводы. Предложенные схемные решения и алгоритмы при проектировании и разработке КПЧ открывают качественно новые технические возможности по синтезу выходного напряжения высокого качества. При этом отпадает необходимость в установке дополнительных фильтров высших гармоник для получения электроэнергии с требуемыми показателями качества. Использование предложенных вариантов схем элементарных ячеек КПЧ, а также вариантов их электропитания позволит осуществить питание особо ответственных нагрузок, требующих высокого качества питающего напряжения.

Библиографический список

1. Москаленко В.В. Энергоэффективность как важнейшая характеристика электропривода и обслуживаемых им технологических процессов // Энергосбережение средствами электропривода: докл. науч.-метод. семинара. – М.: Изд. дом МЭИ, 2011. – С. 4–15.
2. Ильинский Н.Ф. Электропривод в современном мире // Труды 5-й Междунар. конф. по автоматизированному электроприводу (АЭП–2007). – СПб., 2007. – С. 17–19.

3. ГОСТ Р 54130-2010. Национальный стандарт Российской Федерации. Качество электрической энергии. Термины и определения // Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.

4. Управление качеством электроэнергии / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов [и др.]; под ред. Ю.В. Шарова. – М.: Изд. дом МЭИ, 2006. – 320 с.

5. Агунов А.В. Управление качеством электроэнергии при несинусоидальных режимах. – СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2009. – 134 с.

6. Пронин М.В., Воронцов А.Г. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет) / под ред. Е.А. Крутякова. – СПб.: Электросила, 2003. – 172 с.

7. Широотно-импульсные преобразователи электрической энергии (монография) / И.В. Белоусов, Ф.А. Гельвер, В.Ф. Самосейко, В.А. Хомяк. – СПб.: Изд-во Крыловск. гос. науч. центра, 2019. – 228 с.

8. Многоуровневые автономные инверторы для электропривода и энергетики / Н. Донской, А. Иванов, В. Матисон, И. Ушаков // Силовая электроника. – 2008. – № 1. – С. 43–46.

9. Бурдасов Б.К., Нестеров С.А., Федотов Ю.Б. Многоуровневые и каскадные преобразователи частоты для высоковольтных электроприводов переменного тока // *Argioi. Сер.: Естественные и технические науки.* – 2015. – № 5.

10. Лазарев Г.Б. Высоковольтные преобразователи для частотно-регулируемого электропривода. Построение различных схем // *Новости электротехники.* – 2005. – № 2(32). – С. 30–36.

11. Михеев К.Е., Томасов В.С. Анализ энергетических показателей многоуровневых полупроводниковых преобразователей систем электропривода // *Научно-техн. вестник информац. технологий, механики и оптики.* – 2012. – № 1(77). – С. 46–52.

12. Шавёлкин А.А. Каскадные многоуровневые преобразователи частоты с улучшенными энергетическими характеристиками // *Технічна електродинаміка: наук.-приклад. журнал. Тем. випуск. Силова електроніка і енергоефективність.* – Киев, 2010. – Ч. 1. – С. 65–70.

13. Многоуровневый преобразователь частоты с дифференцированными напряжениями уровней и байпасными полупроводниковыми ключами: пат. RU2510769 / Хакимьянов М.И., Шабанов В.А.; заяв. 2012148481/07 от 14.11.2012.

14. Шрейнер Р.Т., Кривовяз В.К., Калыгин А.И. Развитие высоковольтных каскадных преобразователей частоты для электропривода Труды V Междунар. (16-й Всерос.) конф. по автоматизир. электроприводу СПГУ (18–21 сентября 2007 г.). – СПб., 2007. – С. 186–189.

15. Irusapparajan G., Periyaazhagar D. Asymmetric three-phase cascading trinary-DC source multilevel inverter topologies for variable frequency PWM // *Circuits and Systems*. – 2016. – 7. – P. 506–519. – URL: <http://dx.doi.org/10.4236/cs.2016.74043>

16. Corzine K.A., Wielebski M.W., Peng, F.Z. Control of Cascaded Multilevel Inverters // *IEEE Transaction on Power Electronic*. – 2004. – 19. – P. 732–738. – URL: <http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2004.826495>

17. PWM Method to Eliminate Power Sources in a Nonredundant 27-Level Inverter for Machine Drive Applications / Mauricio Rotella, Gonzalo Peñailillo, Javier Pereda, Juan Dixon // *IEEE transactions on industrial electronics*. – January 2009. – Vol. 56. – No. 1. – P. 194–201.

18. Ramani K., Krishnan A. New hybrid 27 level multilevel inverter fed induction motor drive // *International Journal of Recent Trends in Engineering*. – 2009. – 2. – P. 38–42.

19. Mahato B., Mittal S., Nayak P. N-Level Cascade Multilevel Converter with optimum number of switches // *International Conference on Recent Trends in Electrical, Control and Communication (RTECC)*. – 2018. – P. 228–233.

20. Филатов В. Двух- и трехуровневые инверторы на IGBT. Перспективные решения // *Силовая электроника*. – 2012. – № 4. – С. 38–41.

21. Чехет Э.М., Мордач В.В., Соболев В.Н. Непосредственные преобразователи частоты для электропривода. – Киев: Наукова думка, 1988. – 222 с.

22. Ефимов А.А., Шрейнер Р.Т. Активные преобразователи в регулируемых приводах переменного тока. – Новоуральск: Изд-во НГТИ, 2001. – 250 с.

23. Гельвер Ф.А. Активный преобразователь как средство повышения энергетической эффективности систем электропривода // Труды науч.-техн. конф. молод. ученых сотрудников СПГУВК; 1–7 июня 2005 г. – СПб., 2005. – Т. 1. – С. 100–104.

24. Математическое моделирование и испытания опытного образца активного выпрямителя напряжения / А.А. Ефимов, А.А. Базарнов, В.А. Глухов, Г.С. Зиновьев. – Красноярск: Изд-во Сиб. федер. унта, ИКИТ, 2013. – С. 128–134.

25. Гельвер Ф.А., Белоусов И.В., Самосейко В.Ф. Гребные электрические установки судов большой мощности // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2019. – № 2(30). – С. 7–27.

26. Гельвер Ф.А. Структура электродвигательной установки судна большой мощности // Речной транспорт (XXI век). – 2018. – № 4(88). – С. 44–49.

References

1. Moskalenko V.V. Energoeffektivnost' kak vazhneishaia kharakteristika elektroprivoda i obsluzhivaemykh im tekhnologicheskikh protsessov [Energy efficiency as the most important characteristic of an electric drive and its technological processes]. Energoberezhenie sredstvami elektroprivoda. Doklady nauchno-metodicheskogo seminar. Moscow: Moskovskii energeticheskii institut, 2011, pp. 4-15.

2. П'инский N.F. Elektroprivod v sovremennom mire [Electric drive in the modern world]. *Trudy 5-i Mezhdunarodnoi konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu (AEP-2007)*. Saint Petersburg, 2007, pp. 17-19.

3. GOST R 54130-2010. Natsional'nyi standart Rossiiskoi Federatsii. Kachestvo elektricheskoi energii. Terminy i opredeleniia [GOST R 54130-2010. National standard of the Russian Federation. The quality of electrical energy. Terms and Definitions]. Dostup iz spravochno-pravovoi sistemy Konsul'tantPlius.

4. Kartashev I.I., Tul'skii V.N., Shamonov R.G. et al. Upravlenie kachestvom elektroenergii [Power quality management]. Ed. Iu.V. Sharova. Moscow: Izdatel'skii dom Moskovskogo energeticheskogo instituta, 2006. 320 p.

5. Agunov A.V. Upravlenie kachestvom elektroenergii pri nesinusoidal'nykh rezhimakh [Power quality management in non-sinusoidal modes]. Saint Petersburg: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi morskoi tekhnicheskii universitet, 2009. 134 p.

6. Pronin M.V., Vorontsov A.G. Silovye polnost'iu upravliaemye poluprovodnikovye preobrazovateli (modelirovanie i raschet) [Power fully controlled semiconductor converters (modeling and calculation)]. Ed. E.A. Krutiakova. Saint Petersburg: Elektrosila, 2003. 172 p.

7. Belousov I.V., Gel'ver F.A., Samoseiko V.F., Khomiak V.A. *Shirotno-impul'snye preobrazovateli elektricheskoi energii* [Pulse-width converters of electrical energy]. Saint Petersburg: Krylovskii gosudarstvennyi nauchnyi tsentr, 2019. 228 p.

8. Donskoi N., Ivanov A., Matison V., Ushakov I. *Mnogourovnevye avtonomnye inventory dlia elektroprivoda i energetiki* [Multilevel autonomous inverters for electric drives and energy]. *Silovaia elektronika*, 2008, no. 1, pp. 43-46.

9. Burdasov B.K., Nesterov S.A., Fedotov Iu.B. *Mnogourovnevye i kaskadnye preobrazovateli chastoty dlia vysokovol'tnykh elektroprivodov peremennogo toka* [Multilevel and cascade frequency converters for high-voltage electric drives of alternating current]. *Apriori. Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2015, no. 5.

10. Lazarev G.B. *Vysokovol'tnye preobrazovateli dlia chastotno-reguliruemogo elektroprivoda. Postroenie razlichnykh skhem* [High voltage converters for variable frequency drive. The construction of various schemes] *Novosti elektrotehniki*, 2005, no. 2(32), pp. 30-36.

11. Mikheev K.E., Tomasov V.S. *Analiz energeticheskikh pokazatelei mnogourovnevnykh poluprovodnikovyykh preobrazovatelei sistem elektroprivoda* [Analysis of energy indicators of multilevel semiconductor converters of electric drive systems]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2012, no. 1(77), pp. 46-52.

12. Shavelkin A.A. *Kaskadnye mnogourovnevye preobrazovateli chastoty s uluchshennymi energeticheskimi kharakteristikami* [Cascade multilevel frequency converters with improved energy characteristics]. *Tekhnichna elektrodinamika: naukovoprikladnii zhurnal. Tem. vipusk. Silova elektronika i energoefektivnist'*. Kiev, 2010. part 1, pp. 65-70.

13. Khakim'ianov M.I., Shabanov V.A. *Mnogourovnevyy preobrazovatel' chastoty s differentsirovannymi napriazheniiami urovnei i baipasnymi poluprovodnikovymi kliuchami* [Multilevel frequency converter with differentiated voltage levels and bypass semiconductor switches]. Patent Rossiiskaia Federatsiia RU2510769 (2012).

14. Shreiner R.T., Krivoviaz V.K., Kalygin A.I. *Razvitie vysokovol'tnykh kaskadnykh preobrazovatelei chastoty dlia elektroprivoda* [Development of high-voltage cascade frequency converters for electric drive]. *Trudy V Mezhdunarodnoi (16-i Vserossiiskoi) konferentsii po*

avtomatizirovannomu elektroprivodu Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta, 18-21 September 2007. Saint Petersburg, 2007, pp. 186-189.

15. Irusapparajan G., Periyazhagar D. Asymmetric three-phase cascading trinary-DC source multilevel inverter topologies for variable frequency PWM. *Circuits and Systems*, 2016, 7, pp. 506-519, available at: <http://dx.doi.org/10.4236/cs.2016.74043>

16. Corzine K.A., Wielebski M.W., Peng, F.Z. Control of Cascaded Multilevel Inverters. *IEEE Transaction on Power Electronic*, 2004, 19, pp. 732-738, available at: <http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2004.826495>

17. Mauricio Rotella, Gonzalo Peñailillo, Javier Pereda, Juan Dixon. PWM Method to Eliminate Power Sources in a Nonredundant 27-Level Inverter for Machine Drive Applications. *IEEE transactions on industrial electronics*. January 2009, vol. 56, no. 1, pp. 194-201.

18. Ramani K., Krishnan A. New hybrid 27 level multilevel inverter fed induction motor drive. *International Journal of Recent Trends in Engineering*, 2009, 2, pp. 38-42.

19. Mahato B., Mittal S., Nayak P. N-Level Cascade Multilevel Converter with optimum number of switches. *International Conference on Recent Trends in Electrical, Control and Communication (RTECC)*, 2018, pp. 228-233.

20. Filatov V. Dvukh- i trekhurovnevye inventory na IGBT. Perspektivnye resheniia [Two- and three-level inverters on IGBT. Promising solutions]. *Silovaia elektronika*, 2012, no. 4, pp. 38-41.

21. Chekhet E.M., Mordach V.V., Sobolev V.N. Neposredstvennye preobrazovateli chastoty dlia elektroprivoda [Direct frequency converters for electric drive]. Kiev: Naukova dumka, 1988. 222 p.

22. Efimov A.A., Shreiner R.T. Aktivnye preobrazovateli v reguliruemymkh privodakh peremennogo toka [Active Converters in AC Drives]. Novoural'sk: Novosibirskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2001. 250 p.

23. Gel'ver F.A. Aktivnyi preobrazovatel' kak sredstvo povysheniia energeticheskoi effektivnosti sistem elektroprivoda [Active converter as a means of increasing the energy efficiency of electric drive systems]. *Trudy nauchno-tekhnicheskoi konferentsii molodykh uchenykh sotrudnikov Sankt-*

Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta vodnykh kommunikatsii, 1-7 June 2005. Saint Petersburg, 2005, vol. 1, pp. 100-104.

24. Efimov A.A., Bazarnov A.A., Glukhov V.A., Zinov'ev G.S. Matematicheskoe modelirovanie i ispytaniia opytного obraztsa aktivного выпрямителя napriazheniia [Mathematical modeling and testing a prototype of an active voltage rectifier]. Krasnoiar'sk: Sibirskii federal'nyi universitet, IKIT, 2013, pp. 128-134.

25. Gel'ver F.A., Belousov I.V., Samoseiko V.F. Grebnye elektricheskie ustanovki sudov bol'shoi moshchnosti [Rowing electrical installations of high power vessels]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnikha, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2019, no. 2(30), pp. 7-27.

26. Gel'ver F.A. Struktura elektrodvizhitel'noi ustanovki sudna bol'shoi moshchnosti [The structure of the electromotive installation of a ship of high power]. *Rechnoi transport (XXI vek)*, 2018, no. 4(88), pp. 44-49.

Сведения об авторах

Гельвер Фёдор Андреевич (Санкт-Петербург, Россия) – кандидат технических наук, доцент, начальник лаборатории филиала «ЦНИИ СЭТ» Крыловского государственного научного центра (196128, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, 6), доцент кафедры «Электропривод и электрооборудование береговых установок» Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова (198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: gelver@bk.ru).

Белоусов Игорь Владимирович (Санкт-Петербург, Россия) – доцент кафедры «Электропривод и электрооборудование береговых установок» Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова (198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7), ведущий инженер филиала «ЦНИИ СЭТ» Крыловского государственного научного центра (196128, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, 6, e-mail: ibel@bk.ru).

Самосейко Вениамин Францевич (Санкт-Петербург, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Электропривод и электрооборудование береговых установок» Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова (198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7), e-mail: samoseyko@mail.ru).

About the authors

Gelver Fedor Andreevich (Saint Petersburg, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Head of the laboratory of the branch “TsNII SET” Krylov State Research Center (196128, Saint Petersburg, 6, Blagodatnaya str.), Associate Professor “Electric drive and electrical equipment of shore installations” GUMRF named after Admiral S.O. Makarov (198035, Saint Petersburg, 5/7, Dvinskaya str., e-mail: gelver@bk.ru).

Belousov Igor Vladimirovich (Saint Petersburg, Russian Federation) is a Associate Professor of the Department “Electric Drive and Electrical Equipment of Coastal Installations” FSBEI HE “GUMRF named after Admiral S.O. Makarov (196128, Saint Petersburg, 1980, 5/7, Dvinskaya str.), leading engineer of the branch “TsNII SET” FGUP “Krylovskiy gosudarstvennyy nauchnyy tsentr” (196128, Saint Petersburg, 6, Blagodatnaya str., e-mail: ibel@bk.ru).

Samoseiko Veniamin Frantsevich (Saint Petersburg, Russian Federation) is a Doctor of Technical Sciences, Professor Department of the electric drive and electrical equipment onshore installations Admiral S.O. Makarov State University of Maritime and Inland Shipping (198035, Saint Petersburg, 5/7, Dvinskaya str., e-mail: samoseyko@mail.ru).

Получено 27.01.2020