

## Система электродвижения с двухканальным непосредственным преобразованием частоты и встроенным коммутатором

КОПТЯЕВ Е.Н., ПОПКОВ Е.Н.

*В основе современных систем электродвижения — преобразователь частоты, осуществляющий плавный запуск и регулирование частоты вращения двигателя. Широко применяемые преобразователи с широтно-импульсной модуляцией отличаются простой схематехники, однако имеют проблемы электромагнитной совместимости с питающей сетью и оборудованием, причем существует прямая зависимость между себестоимостью преобразователя частоты и качеством напряжения. Использование разного рода фильтров в преобразователе частоты позволяет решить вопрос качества электроэнергии, но ведет к увеличению массы, габаритов и стоимости всей системы электропривода. Существует разновидность непосредственного преобразователя частоты, состоящего из двух каналов и формирующего синусоидальное выходное напряжение, не имеющее разрывов. Это позволяет отказаться от применения дорогостоящих фильтров и улучшить технические характеристики системы в целом. Однако использование двухканального преобразования частоты в общем случае связано с увеличением числа коммутирующих ключей (IGBT), что повышает себестоимость установки и снижает ее надежность. Предлагаемый в статье вариант построения системы обеспечивает 1,5-кратное уменьшение числа ключей при использовании для преобразования частоты всего лишь двух многофазных обмоток трансформатора или генератора.*

*Ключевые слова: преобразователь частоты, двухканальное преобразование частоты, трехфазная обмотка, многофазный коммутатор, электропривод*

Причинами перехода в системах движения судов к электроприводу переменного тока и практически полного отказа от двигателей постоянного тока послужили как успехи полупроводниковой электроники, так и преимущества электрических машин переменного тока [1, 2]. Это позволило создать электропривод малого объема и массы, имеющий высокую надежность при низкой стоимости. Успешно решается и проблема сложности управления электроприводами переменного тока с преобразователями частоты.

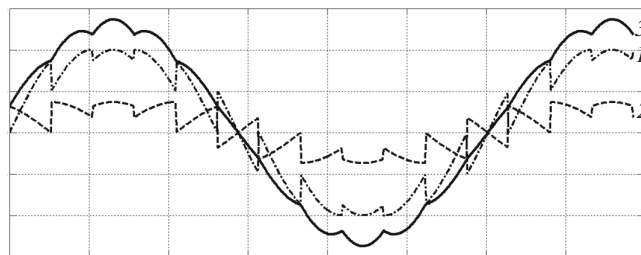
Основным недостатком используемых в электроприводе переменного тока преобразователей частоты с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) можно назвать дискретный характер выходного напряжения при модуляции выходного напряжения, обеспечиваемой скважностью импульсов [2, 3]. Для улучшения технических характеристик иногда применяют многоуровневые преобразователи частоты [4], однако это не решает полностью проблемы электромагнитной совместимости и ведет к увеличению стоимости, снижению надежности установки и др.

Одним из возможных путей развития электропривода вообще и, в частности, мощных систем электродвижения может стать двухканальное преобразование частоты [5, 6]. В его основе лежит использование многофазных реверсивных мостов (полупроводниковых коммутаторов), соединяемых

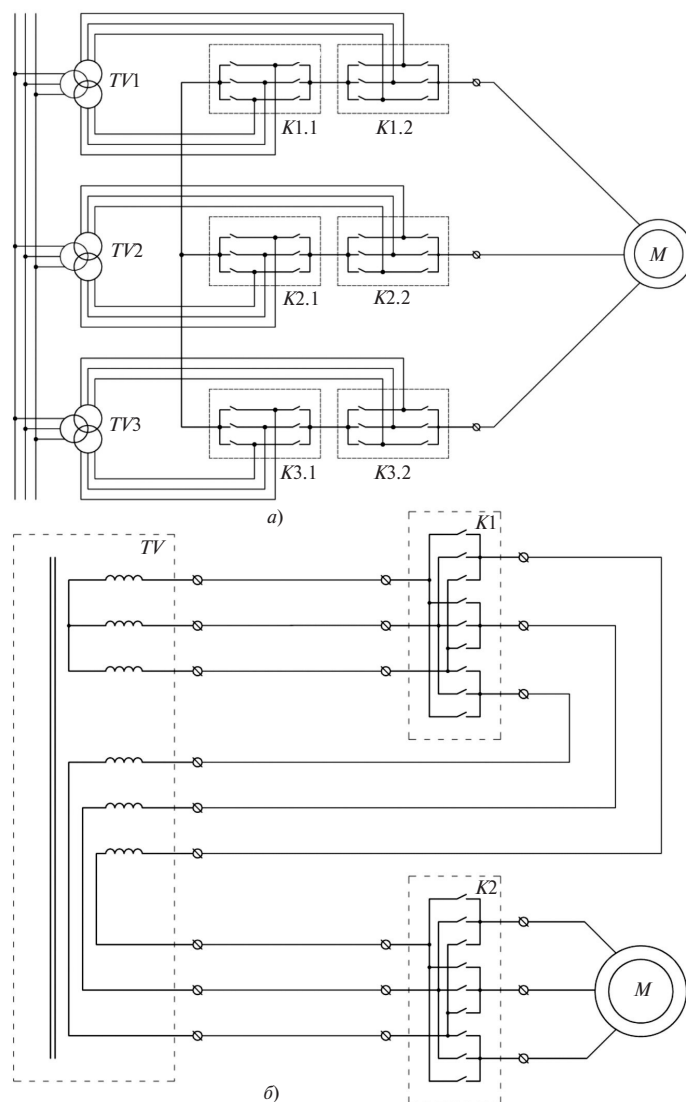
последовательно. Такое преобразование частоты основано на суммировании двух выходных функций, формируемых полупроводниковыми коммутаторами независимо друг от друга по взаимно-обратному алгоритму, причем восходящий фронт каждого фрагмента одного коммутатора соответствует нисходящему фронту другого коммутатора.

Такое решение основано на непосредственном преобразовании частоты (НПЧ) и позволяет реализовать приближенное к синусоиде выходное напряжение, не имеющее разрывов. Работа алгоритма двухканального преобразования частоты наглядно показана на рис. 1.

Однако применение этого метода в общем случае требует наличия работающих независимо полупроводниковых коммутаторов для получения трехфазного выходного напряжения [7].



**Рис. 1.** Выходное напряжение каналов (коммутаторов): 1 — основной канал; 2 — вспомогательный канал; 3 — суммарное выходное напряжение



**Рис. 2.** Схема двухканального преобразования частоты с независимыми коммутаторами в каждой фазе (а) и встроенным коммутатором (б)

Из рис. 2,а следует, что общее число полупроводниковых коммутаторов равняется удвоенному числу фаз, а число полупроводниковых ключей (IGBT-транзисторов) – 12-кратному числу коммутаторов. Это означает необходимость использования 72 транзисторов для формирования выходного напряжения, что ограничивает область применения такого решения. Кроме того, требуется питание каждого коммутатора от гальванически развязанного источника трехфазного напряжения (т.е. вторичной обмотки трансформатора), что не всегда возможно.

От перечисленных выше недостатков свободен вариант, представленный на рис. 2,б и имеющий в составе два многофазных коммутатора. Отличительной особенностью является наличие разомкнутой трехфазной обмотки, не имеющей нейтрали и коммутируемой отдельно по фазам, причем в любой период коммутации задействована каждая из фаз. Такое решение позволило уменьшить число полупроводниковых ключей, необходимых для ре-

ализации преобразования, с 72 до 36 IGBT-транзисторов, а также снизить число питающих трехфазных обмоток с 12 до 2.

Главным достоинством предлагаемого решения являются меньшие габариты, что важно при применении электроприводов малой и средней мощности, а также для систем электродвижения судов. К особенностям можно отнести полное использование фаз питающих обмоток (трансформатора или генератора) по времени работы, как и полупроводниковых ключей, периодичность использования которых возрастает обратно пропорционально снижению их числа. Это означает уменьшение числа витков питающих обмоток и габаритов, но при большем тепловыделении в каждом элементе.

Таким образом, схема двухканального НПЧ на рис. 2,б имеет встроенный в источник электроэнергии (генератор, трансформатор) многофазный коммутатор. В отличие от трехфазного реверсивного моста, позволяющего сформировать на выходе

только однофазное напряжение, в предлагаемом решении задействованы одновременно три фазы обмоток (основной с нейтралью и дополнительной), а суммирование каналов происходит поочередно — алгоритмы коммутации чередуются от фазы к фазе. В таком варианте повышается использование обмоток и коммутаторов и одновременно уменьшается число периодов коммутации за период выходного напряжения. Например, на рис. 1 изображено выходное напряжение, имеющее 12 периодов при коэффициенте деления частоты 1:2, что соответствует встроенному коммутатору. В случае использования схемы по рис. 2,а возможно формирование 24 периодов коммутации на выходе.

На рис. 3 изображены выходное напряжение двухканального НПЧ и его спектр для различных случаев коэффициента деления частоты входного напряжения в 1,5, 2, 3 и 4 раза. Результаты моделирования показывают низкое содержание гармоник в спектре напряжения двухканального НПЧ, при этом суммарный коэффициент THD находится на уровне 2–4% при различных коэффициентах деления, в том числе при понижении частоты в 4 раза.

Перечисленные выше преимущества (низкий коэффициент гармоник без использования фильтров, малое с учетом качества напряжения число полупроводниковых ключей, отсутствие конденсаторов для сдвига уровней) делают двухканальное преобразование эффективным для питания мощ-

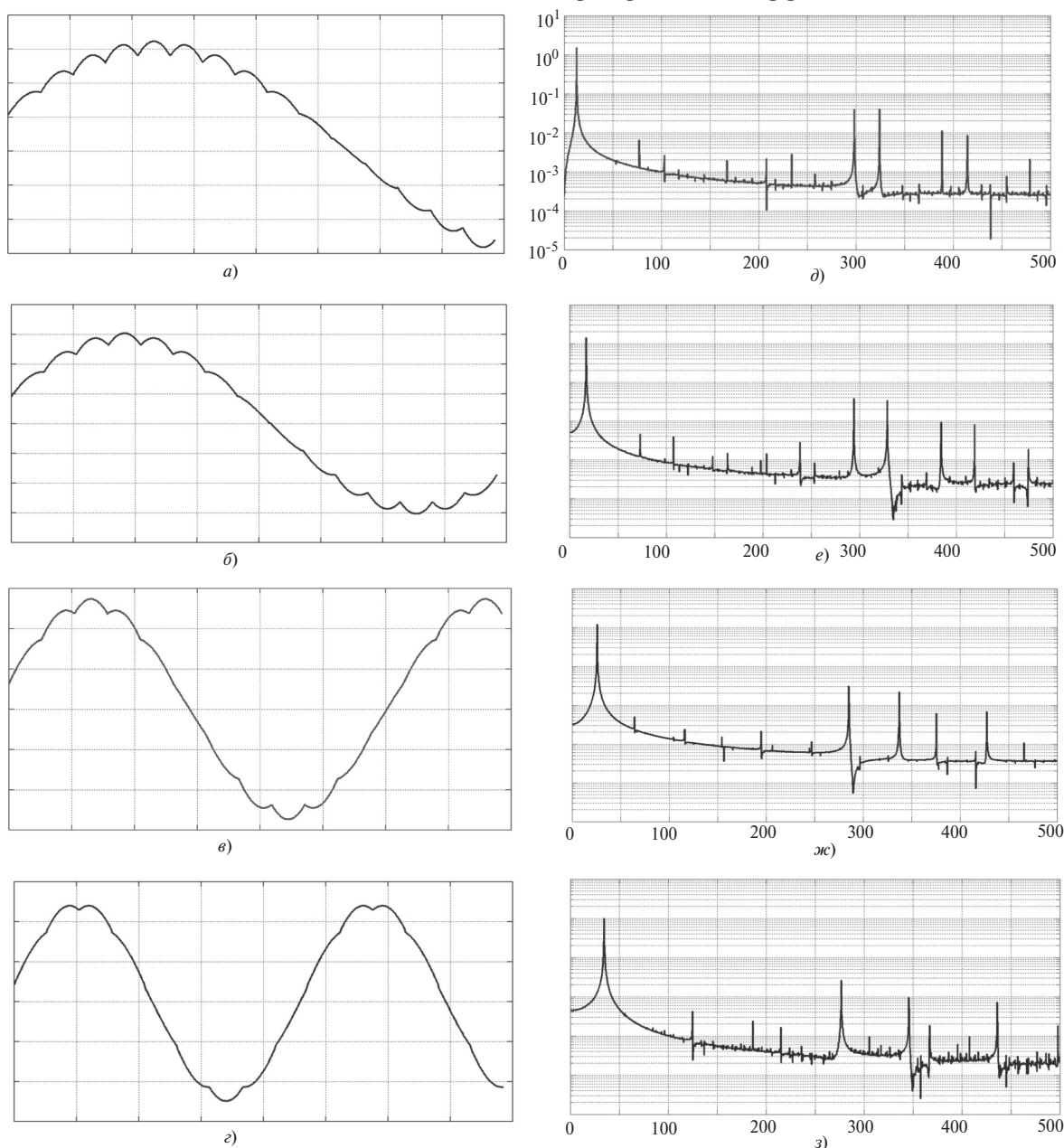


Рис. 3. Графики напряжения для различных значений частоты выходного напряжения двухканального НПЧ (а, б, в, г — для случаев деления входной частоты в 4, 3, 2 и 1,5 раза соответственно) и соответствующего спектрального состава (д, е, ж, з)

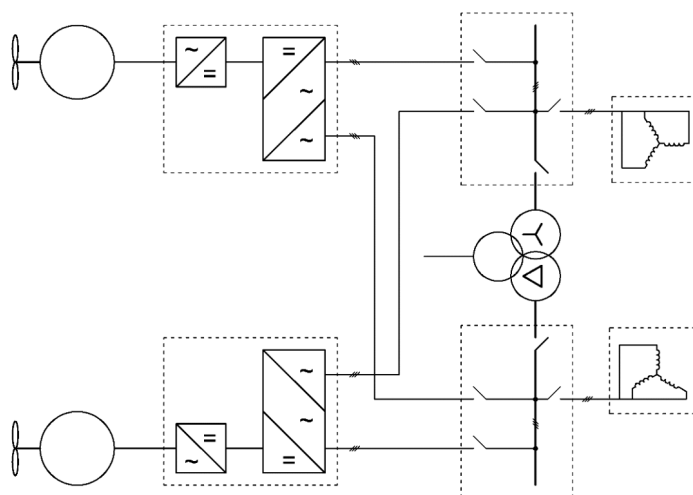


Рис. 4. Схема бестрансформаторной ЕЭЭС типа LLC

ных электроприводов судовых гребных установок [6].

Во вновь проектируемых судах, как правило, используется принцип построения единой электроэнергетической системы (ЕЭЭС), используемой для питания всех судовых потребителей, включая системы электродвижения. От структуры используемой схемы ЕЭЭС зависят надежность питания потребителей, удобство эксплуатации, экономичность и габариты [2, 7, 8], а также выполнение требований Морского регистра в части качества электроэнергии. В составе ЕЭЭС многих судостроителей используются трансформаторы для согласования уровня напряжений и гальванической развязки питающих сетей, в том числе в составе систем электродвижения. Их использование ведет к росту габаритов и массы, а главное – увеличению себестоимости оборудования и эксплуатационных затрат.

В последние годы наметилась тенденция к упрощению системы электродвижения и судовых ЕЭЭС, что позволяет уменьшить число единиц требуемого оборудования и избежать потерь, связанных с дополнительным преобразованием электроэнергии.

Один из вариантов построения гребных электроустановок ГЭУ [7] предполагает использование судовых генераторов с трехфазными обмотками, имеющими взаимный фазовый сдвиг, что позволяет отказаться от силовых трансформаторов с вторичными обмотками, включенными по схемам «звезда» и «треугольник». В качестве полупроводникового преобразователя частоты в составе ГЭУ предлагается использовать многоуровневый автономный инвертор напряжения, сдвиг уровней в котором обеспечивается последовательным включением выпрямительных мостов, питаемых от шин

электростанции, подключенных к обмоткам генератора.

Одним из мировых судостроителей [8, 9] была предложена структура бестрансформаторной ЕЭЭС, основанной на принципе Low Loss Concept (LLC). Упрощенная схема такой системы представлена на рис. 4. Судовые генераторы разделены на две группы и питают каждую ГЭУ без использования силовых трансформаторов. Необходимое число пульсаций выпрямленного напряжения в звене постоянного тока преобразователя частоты ГЭУ обеспечивается двойным питанием от обоих генераторов, имеющих между собой фазовый сдвиг  $30^\circ$ . Последовательное соединение выпрямительных мостов в таком случае обеспечивает равномерную загрузку по току обоих источников. Питаться общесудовые потребители предлагается от единственного силового трансформатора, входящего в состав ЕЭЭС и имеющего две первичные обмотки, соединенные в «звезду» и «треугольник», что позволяет синхронизировать оба судовых генератора с учетом фазового сдвига между их напряжениями.

К недостаткам принципа LLC можно отнести отсутствие резервирования общесудовых потребителей, получающих питание от одного силового трансформатора, в случае отказа которого возможно обесточение важных для живучести судна механизмов. Кроме того, могут потребоваться дополнительные меры для втягивания в синхронизм судовых генераторов, а мощность согласующего трансформатора не должна быть намного меньше мощности судовой ЕЭЭС. Однако считается, что такое построение судовой ЕЭЭС обеспечивает требуемое Российским морским регистром судоходства качество электроэнергии.

На кафедре электрических сетей и систем Санкт-Петербургского политехнического универ-

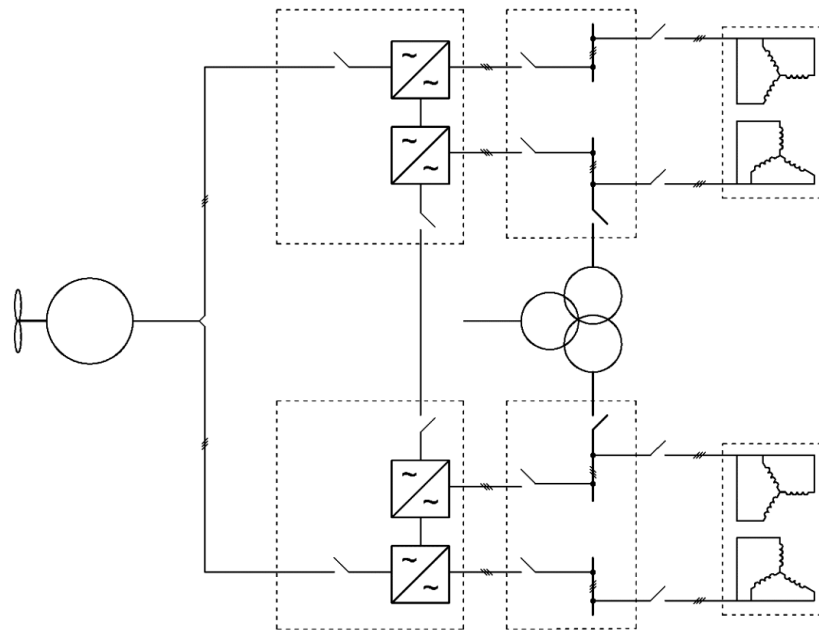


Рис. 5. Функциональная схема ЕЭЭС с двухканальным НПЧ

система ведется разработка судовой системы электродвижения, интегрированной в ЕЭЭС и реализующей двухканальное непосредственное преобразование частоты без использования согласующих силовых трансформаторов [10, 11]. Такая система обладает рядом технических преимуществ: снижение потерь и отказ от промежуточного преобразования, упрощение схемотехники системы электродвижения, возможность улучшения электромагнитной совместимости с судовым оборудованием. Упрощенная схема такой ЕЭЭС с электродвижением показана на рис. 5.

Двухканальное преобразование в такой системе может функционировать в двух режимах работы —

от одного генератора и в сдвоенном режиме, когда реализуется суммирование выходного напряжения. В последнем случае возможно некоторое улучшение гармонического состава напряжения (при условии наличия фазового сдвига между генераторами), как это изображено на рис. 6.

**Выводы.** 1. Схемотехника системы электродвижения судов с двухканальным непосредственным преобразованием частоты и встроенным коммутатором значительно снижает требуемое число полупроводниковых ключей и питающих обмоток, что позволяет создавать регулируемый электропривод с минимальными габаритами, массой и себестоимостью.

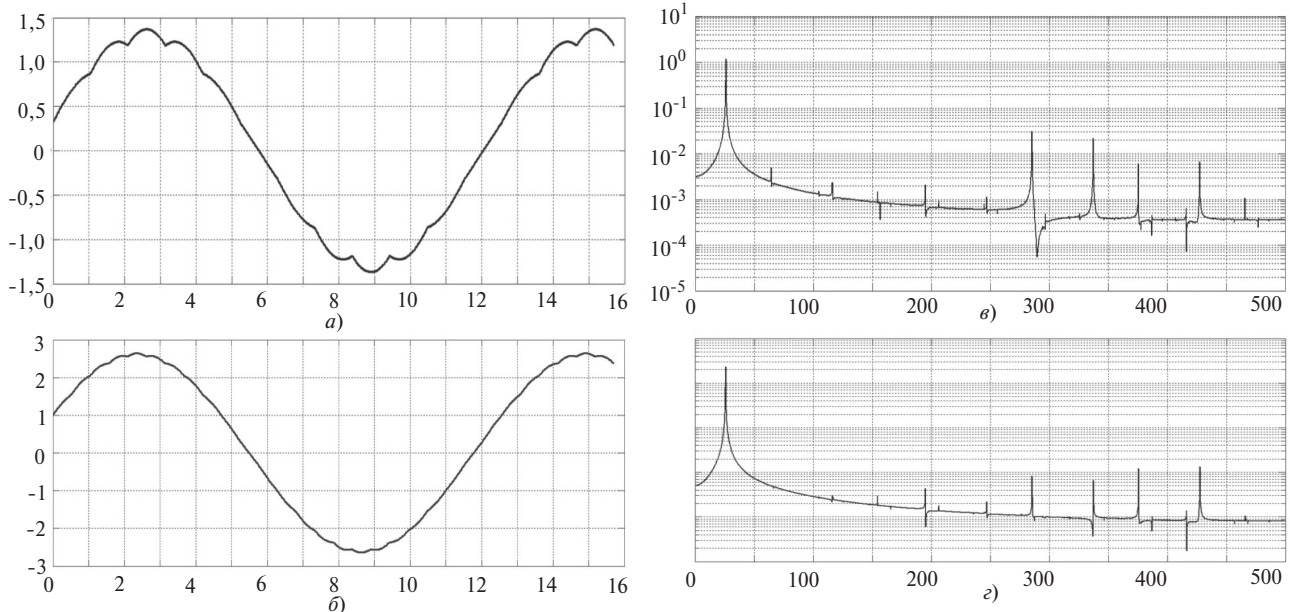


Рис. 6. Графики выходного напряжения НПЧ и его спектра при работе ЕЭЭС от одного судового генератора (а), двух генераторов (б) и соответствующих им спектральных составов выходного напряжения (в, г)

2. Алгоритм работы встроенного коммутатора обеспечивает получение синусоидальной функции выходного напряжения при полном использовании питающих обмоток по времени работы, что ведет к повышенной нагрузке на элементы схемы, но компенсируется ее простотой.

3. Анализ качества выходного напряжения в зависимости от коэффициента преобразования (деления) частоты подтвердил преимущества двухканального преобразования частоты. Это позволяет сделать вывод о возможности создания систем электродвижения судов большой мощности, не требующих наличия громоздких фильтров, что понизит их себестоимость.

4. Предложенная схема системы электродвижения обеспечивает работу гребного электродвигателя как от одного судового генератора, так и в сдвоенном режиме — при последовательном включении непосредственных преобразователей частоты, что улучшит качество напряжения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Muhammad H.R. Power Electronics Handbook, Second Edition: Devices, Circuits and Applications. N.Y.: Academic Press, 2006, 1192 p.
2. Дмитриев Б.Ф., Рябенский В.М., Черевко А.И., Музыка М.М. Судовые полупроводниковые преобразователи: Учебник. Архангельск: Изд-во Северного (Арктического) федерального университета, 2015, 556 с.
3. Обухов С.Г., Чаплыгин Е.Е., Кондратьев Д.Е. Широтно-импульсная модуляция в трехфазных инверторах напряжения. — Электричество, 2008, №7, с. 23–31.

4. Шавелкин А.А. Вариант схемы многоуровневого преобразователя частоты для электропривода среднего напряжения. — Электротехника, 2005, № 11, с. 9–15.

5. Коптяев Е.Н., Ивлев М.Л. Перспективы систем с двухканальным преобразованием частоты. — Научно-технические ведомости Севмашвуза, 2018, № 1, с. 12–17.

6. Коптяев Е.Н. Двухканальный непосредственный преобразователь частоты. — Электричество, 2018, № 3, с. 33–37.

7. Калмыков А.Н., Кузнецов В.И., Сеньков А.П., Токарев Л.Н. Судовые бестрансформаторные гребные электрические установки. — Морской вестник, 2013, № 1, с. 40–42.

8. Сеньков А.П., Дмитриев Б.Ф., Калмыков А.Н., Токарев Л.Н. Судовые единые электроэнергетические системы. — Электротехника, 2017, № 5, с. 8–13.

9. Голубев К.Г. Энергетические установки кораблей с электродвижением. — Морской вестник, 2013, № 2, с. 38–39.

10. Патент РФ № 157368. Система электродвижения судов/Е.Н. Коптяев, И.А. Вечеров, Р.И. Евсеев, А.В. Сажин, В.А. Хомяк. — БИ, 2015, №33.

11. Патент РФ № 181202. Система электродвижения судов/Е.Н. Коптяев, Е.Н. Попков. — БИ, 2018, №19.

[22.08.2018]

Авторы: Коптяев Евгений Николаевич окончил в 2002 г. Санкт-Петербургский государственный морской технический университет. Аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

Попков Евгений Николаевич окончил в 1977 г. Ленинградский политехнический институт (ЛПИ). В 2004 г. защитил докторскую диссертацию «Теория и алгоритмы имитационного моделирования машинно-вентильных систем методом структурных ориентированных чисел» в ЛПИ. Заведующий кафедрой «Электрические системы и сети» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

*Elektrichestvo*, 2019, No. 2, pp. 33–39

DOI:10.24160/0013-5380-2019-2-33-39

## An Electric Propulsion System with Two-Channel Direct Frequency Conversion and a Built-in Switch

KOPTYAYEV Eugene N. (Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia) — Post-graduate student

POPKOV Eugene N. (Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia) — Head of the Department, Dr. Sci. (Eng.)

Modern electrical propulsion systems have at the heart a frequency converter serving to perform smooth starting and control of the motor rotation frequency. Widely used converters with pulse-width modulation feature a simple circuit design but have certain problems relating to electromagnetic compatibility with the power supply network and equipment, and it should be noted that there is a direct link between the frequency converter net cost and voltage quality. The problem of electric power quality can be solved by using various filters, but such solutions entail a growth of weight, dimensions, and cost of the entire electric drive system. The rekind of direct frequency converter that contains two channels and produces a continuous sinusoidal output voltage. The use of this solution makes it possible to do without expensive filters and to improve the technical characteristics of the system as a whole. However, the use of two-channel frequency conversion is generally associated with the need to use a larger number of switching devices (IGBT), which makes the system more costly and less reliable. A system design version is proposed

that make it possible to decrease the number of switch esbyafactor of 1.5 at the expense of using only two multiphase transformer or generator windings for frequency conversion.

Key words: frequency converter, two-channel frequency conversion, three-phase winding, multiphase switch, electric drive

## REFERENCES

1. **Muhammad H.R.** Power Electronics Handbook, Second Edition: Devices, Circuits and Applications. N.Y.: Academic Press, 2006, 1192 p.
2. **Dmitriyev B.F., Ryaben'kiy V.M., Cherevko A.I., Muzyka M.M.** *Sudovye poluprovodnikovye preobrazovateli: Uchebnik* (Ship semiconductor converters: A Handbook). Arkhangel'sk, Publ. of Northern (Arctic) University, 2015, 556 p.
3. **Obukhov S.G., Chaplygin Ye.Ye., Kondrat'yev D.Ye.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2008, No. 7, pp. 23–31.
4. **Shavelkin A.A.** *Elektrotehnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 2005, No. 11, pp. 9–15.
5. **Koptyayev Ye.N., Ivlev M.L.** *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti Sevmashvtuza – in Russ. (Scientific and Technical Bulletin Sevmashvtuz)*, 2018, No. 1, pp. 12–17.
6. **Koptyayev Ye.N.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2018, No. 3, pp. 33–37.
7. **Kalmykov A.N., Kuznetsov V.I., Sen'kov A.P., Tokarev L.N.** *Morskoi vestnik – in Russ. (Marine Bulletin)*, 2013, No. 1, pp. 40–42.
8. **Sen'kov A.P., Dmitriyev B.F., Kalmykov A.N., Tokarev L.N.** *Elektrotehnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 2017, No. 5, pp. 8–13.
9. **Golubev K.G.** *Morskoi vestnik – in Russ. (Marine Bulletin)*, 2013, No. 2, pp. 38–39.
10. **Pat. RF No. 157368.** *Sistema elektrodvizheniya sudov* (A ship electric propulsion system)/Ye.N. Koptyayev, I.A. Vecherov, R.I. Yevseyev, A.V. Sazhin, V.A. Khomyak. Bulletin of inventions, 2015, No. 33.
11. **Pat. RF No. 181202.** *Sistema elektrodvizheniya sudov* (A ship electric propulsion system)/Ye.N. Koptyayev, Ye.N. Popkov. Bulletin of inventions, 2018, No. 19.

[22.08.2018]