

## Двухканальный непосредственный преобразователь частоты

КОПТЯЕВ Е.Н.

*Основой современного регулируемого электропривода являются преобразователи частоты, обеспечивающие преобразование частоты напряжения питающей сети в переменное выходное напряжение другой частоты. При этом большинство современных преобразователей частоты имеет промежуточное звено постоянного тока. Такое дополнительное преобразование ухудшает энергетические характеристики из-за потерь на коммутацию и требует установки сглаживающих фильтров. Существует также известный класс преобразователей с непосредственной связью, использующих разновидность кусочно-синусоидальной модуляции для формирования выходного напряжения переменного тока другой частоты. Основное отличие таких преобразователей – отсутствие промежуточных преобразований, в том числе выпрямления. Выходное напряжение формируется из коммутируемых фрагментов напряжения питающей сети, однако до сих пор главным недостатком таких преобразователей было ограничение по качеству выходного напряжения. В статье предлагается вариант двухканального трехфазного преобразователя частоты с непосредственной связью, лишённого упомянутого недостатка. Управление крутизной фрагментов выходного напряжения позволило сформировать гладкую функцию на выходе преобразователя, имеющую точки равенства ЭДС, т.е. возможность квазиестественной коммутации полупроводниковых ключей без разрывов кривой тока и соответствующих им коммутационных выбросов.*

*Ключевые слова: непосредственный преобразователь частоты, двухканальный преобразователь частоты с непосредственной связью, кусочно-синусоидальная модуляция, многофазный реверсивный коммутатор, качество выходного напряжения*

Основной областью применения преобразователей частоты для получения выходного напряжения переменного тока [1, 2] является электропривод. Все большее распространение получает регулируемый электропривод исполнительных механизмов средней и малой мощности, однако основное применение преобразователи частоты получили в системах электродвижения большой мощности, в том числе судов [2–4].

На практике наиболее часто применяются преобразователи частоты с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) выходного напряжения [1], использующие промежуточное преобразование (выпрямление) для питания звена постоянного тока и многофазный реверсивный мост – для инвертирования напряжения звена постоянного тока в переменный ток заданных параметров. Необходимое для питания нагрузки качество выходного напряжения в таком случае обеспечивается увеличением частоты ШИМ и применением сглаживающих фильтров на выходе [2]. Последнее ведет к увеличению массы и габаритов установки, а также ее стоимости, что особенно актуально для мощных преобразователей систем электродвижения. Для улучшения качества выходного напряжения используются различные алгоритмы ШИМ, не имеющие однозначных преимуществ [5], а также многоуровневые преобразователи [1, 2, 6], что по-

зволяет улучшить гармонический состав выходного напряжения и снизить уровень электромагнитных излучений.

Однако задача создания преобразователя частоты, имеющего синусоидальное выходное напряжение, низкий уровень электромагнитных излучений и минимальные габариты, до сих пор окончательно не решена.

Перечисленные критерии во многом являются взаимоисключающими в случае использования уже известных решений. Улучшение фильтрации выходного напряжения преобразователя частоты ведет к росту габаритов (и стоимости) выходных фильтров; повышение качества напряжения увеличением частоты несущей ШИМ повышает уровень электромагнитных излучений и тепловых потерь; введение сдвига уровней при формировании выходного напряжения увеличивает число полупроводниковых ключей, требует использования конденсаторов большой емкости, при этом надежность в целом снижается.

Таким образом, перед современной преобразовательной техникой стоит задача улучшить качество выходного напряжения и токов при общем упрощении схемотехники и снижении частоты коммутации. На практике это означает использование естественной коммутации полупроводниковых ключей в моменты равенства ЭДС, отказ от ис-

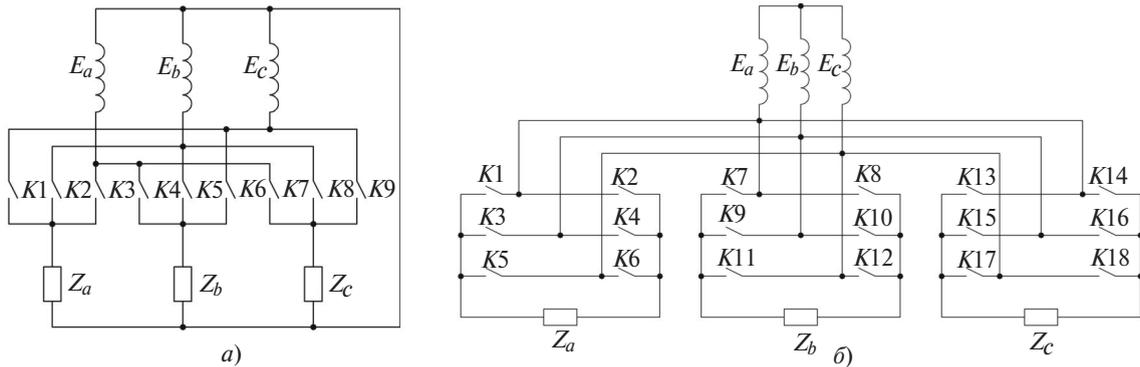


Рис. 1. Функциональная схема трехфазного НПЧ с нулевым отводом (а) и мостовыми вентильными группами (б)

пользования сложных коммутирующих цепей, достижение высокого качества напряжения без увеличения числа фаз питающей сети. Решение поставленной задачи приведет к снижению стоимости установки за счет упрощения конструкции, значительному уменьшению создаваемых помех, повышению надежности работы по причине облегчения режимов работы комплектующих и снижения их общего числа.

Известны примеры промышленного применения преобразователей частоты такого класса, как преобразователи с непосредственной связью или непосредственные преобразователи частоты (НПЧ) [2, 7]. В основе любого преобразователя с непосредственной связью лежит многофазный реверсивный коммутатор с полностью управляемыми (IGBT, IGCT, GTO) полупроводниковыми ключами или тиристорами.

Таким образом, схематически НПЧ ничем не отличается от выпрямителя с реверсивным выходом, кроме способа управления вентильными группами [2]. Использование таких преобразователей при питании от однофазной сети нецелесообразно из-за низкого качества выходного напряжения и большей нагрузки на элементы в сравнении с преобразователями, работающими от многофазной сети.

На рис. 1,а показана принципиальная схема преобразователя частоты с непосредственной связью, отводом от общей точки нагрузки и питанием от трехфазной сети.

Такой преобразователь представляет собой простейший вариант НПЧ и в отличие от случая использования отдельных мостовых вентильных групп (рис. 1,б) не требует потенциального разделения фаз нагрузки. Такие преобразователи находят применение в мощных промышленных установках – сталеплавильных и рудовосстановительных печах [7].

В преобразователях частоты с непосредственной связью возможны различные алгоритмы управления – как с естественной коммутацией тока (для схем с тиристорами), так и с искусственной коммутацией (в схемах на полностью управляемых ключах). В первом случае требуется соблюдение условия естественной коммутации, а именно, обеспечения превышения напряжения подключаемой фазы над напряжением текущей фазы. Во втором случае возможна реализация алгоритма управления с произвольным законом регулирования, что позволяет улучшить качество выходного напряжения и токов без увеличения числа фаз питающей сети.

На рис. 2 показана принципиальная схема силовой части электропривода с НПЧ («циклоконвертер» в иностранной литературе) и трехфазным синхронным двигателем. Трансформаторы  $TV1$ – $TV4$  обеспечивают не только согласование уровней напряжения, но и гальваническую развяз-

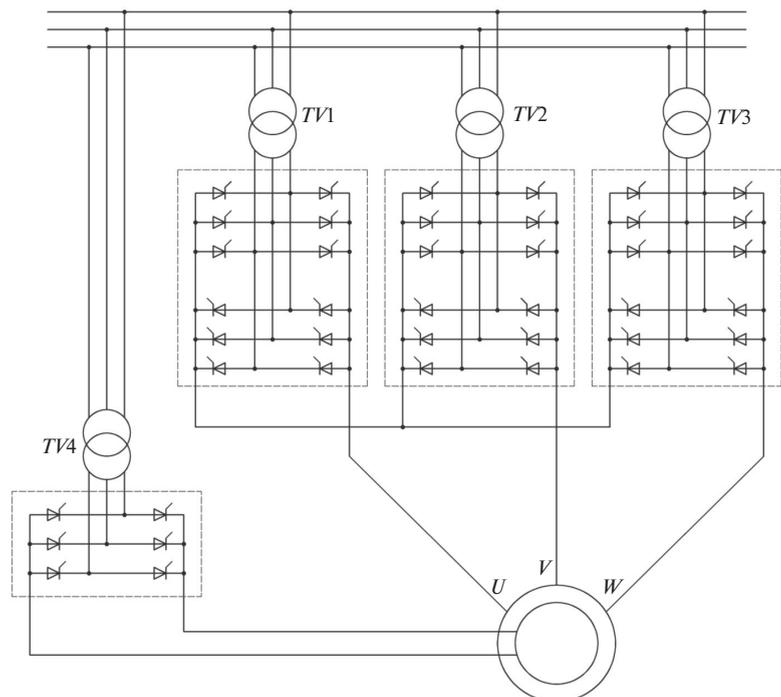


Рис. 2. Функциональная схема электропривода с НПЧ и СД

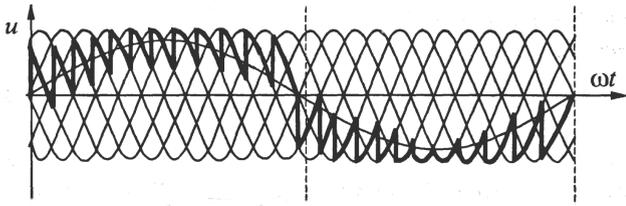


Рис. 3. График выходного напряжения НПЧ с неполностью управляемыми полупроводниковыми ключами (тиристорами)

ку между собой включенных в общую точку мостовых вентиляльных групп преобразователя. Область применения таких систем — электропривод с невысокой номинальной частотой вращения и большой мощностью (например, системы электродвижения судов). При этом возможно использование подобного преобразователя с невысоким уровнем искажений формы тока в случае работы на индуктивную нагрузку обмотки двигателя. Однако гармонические искажения выходного напряжения всех подобных преобразователей значительны и зависят от алгоритма коммутации полупроводниковых ключей.

Изображенный на рис. 3 график соответствует алгоритму работы НПЧ с неполностью управляемыми ключами и естественной коммутацией в моменты превышения напряжения. Из графика видно, что на протяжении периода повторяемости изменяется полярность фронта фрагментов относительно текущего фронта выходного напряжения.

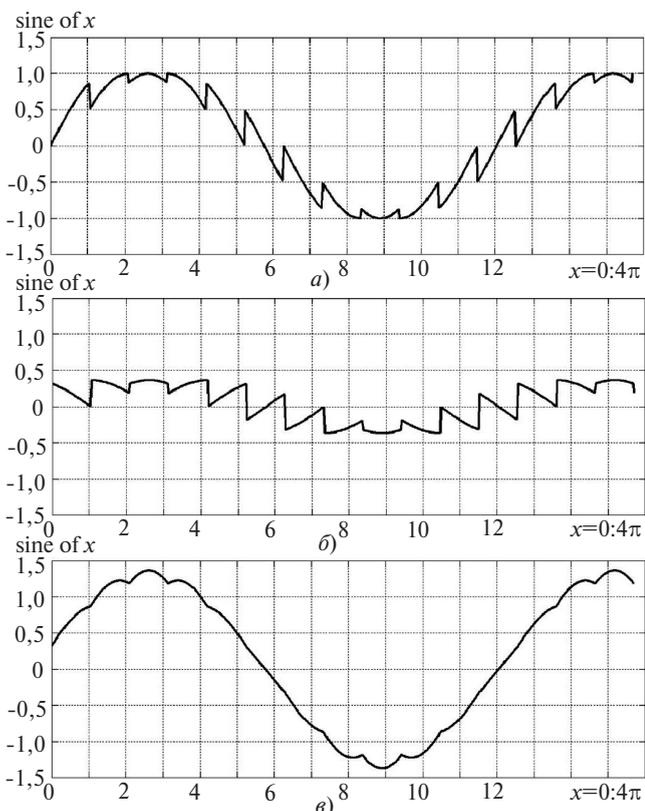


Рис. 4. График выходного напряжения двухканального НПЧ

При использовании полностью управляемых ключей (например, IGBT или GTO) появляется возможность формирования выходного напряжения произвольным образом не только в точках естественной коммутации. На рис. 4, а и б показаны два возможных варианта комбинированных алгоритмов управления. Очевидно, они формируют полностью симметричные по фронту полуволны выходного напряжения.

Развитие силовой электроники привело к появлению матричных преобразователей частоты [8, 9]. В таких преобразователях ключи коммутируются на высокой частоте, что требует применения фильтров и принятия мер по обеспечению электромагнитной совместимости, а увеличение частоты коммутации ведет к росту тепловых потерь.

Таким образом, существующие преобразователи частоты имеют те или иные достоинства, но ощутимое улучшение их характеристик достижимо главным образом за счет увеличения частоты коммутации, что всегда ведет к росту коммутационных потерь и необходимости использовать фильтрацию выходного напряжения.

Преобразователи частоты с непосредственной связью получили ограниченное применение из-за относительно невысокого качества выходного напряжения и невозможности его дальнейшего улучшения по мере совершенствования элементной базы силовых полупроводников.

Выходное напряжение НПЧ представляет собой частный случай кусочно-синусоидальной модуляции выходного напряжения и состоит из фрагментов синусоиды с частотой питающей сети. При этом существенным фактом является то, что использование реверсивного коммутатора дает возможность получения на выходе любого фронта синусоидального напряжения. Показанные на рисунке 4, а и б варианты формирования выходного напряжения являются взаимно обратными. Фронты полуволн выходного напряжения, изображенные на рис. 4, а, состоят из совпадающих по фронту фрагментов питающего напряжения. Обратный вариант представлен на рис. 4, б.

Для улучшения основных технических характеристик НПЧ предлагается использовать двухканальное преобразование. В таком случае используются два независимых канала напряжения: один управляется по основному алгоритму (рис. 4, а), второй — по обратному (рис. 4, б). Таким образом, каждому фрагменту на выходе основного канала напряжения соответствует фрагмент канала обратного напряжения, т.е. восходящему фронту одного канала соответствует нисходящий фронт другого. Это наглядно видно на рисунке 4, в, где показан результат суммирования двух каналов напряжения (выход двухканального НПЧ).

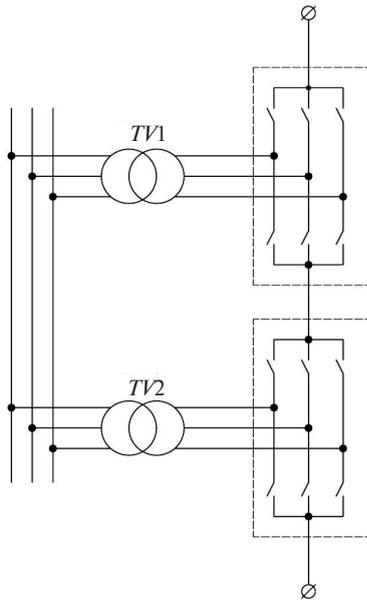


Рис. 5. Функциональная схема одной фазы двухканального НПЧ

Схема одной фазы такого НПЧ представлена на рис. 5 и основана на последовательном включении (суммировании) трехфазных вентильных групп, питаемых от гальванически развязанных трехфазных источников. Схемотехнически реализация такого НПЧ не представляет сложности, а увеличение числа полупроводниковых ключей компенсируется ростом качества выходного напряжения и возможностью реализации естественной коммутации в моменты равенства напряжений.

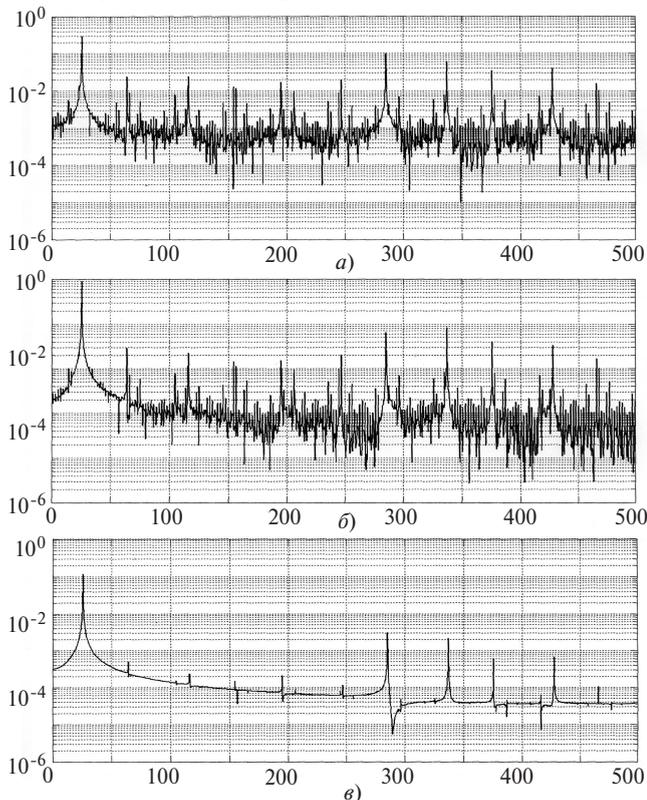


Рис. 6. Гармонический состав выходного напряжения НПЧ

Отличительной особенностью является соотношение числа витков согласующих трансформаторов ( $TV1$  и  $TV2$  на рис. 5), так что гладкая функция выходного напряжения достигается при соотношении напряжений, равном натуральному числу  $e$  (приблизительно 2,72). В таком случае выходное напряжение двухканального НПЧ не имеет разрывов и максимально приближено к синусоидальному (рис. 4, в).

Улучшение гармонического состава выходного напряжения НПЧ очевидно на рис. 6, где представлен спектр выходного напряжения при основном алгоритме управления (рис. 6, а, THD = 5,1%), обратном алгоритме управления (рис. 6, б, THD = 11%) и для случая двухканального НПЧ с суммированием напряжений, изображенных на рис. 6, а и б (рис. 6, в, THD = 4,6%). Графики получены для трехфазной сети и искусственной коммутации полупроводниковых ключей, используется логарифмическая шкала по оси ординат.

**Выводы.** 1. Известные преобразователи частоты с непосредственной связью обладают высокой эффективностью по причине отсутствия промежуточных преобразований электроэнергии и низкого значения частоты коммутации вентилей, а также низкой себестоимостью, обусловленной простотой схемотехники.

2. Предлагаемый двухканальный НПЧ с непосредственной связью имеет лучшее качество выходного напряжения без использования фильтров. Формирование гладкой функции выходного напряжения, не имеющей разрывов, позволяет реализовать близкий к естественной коммутации режим.

3. Установлено, что сходимость функции выходного напряжения двухканального НПЧ обеспечивается при вполне определенном соотношении питающих напряжений, равном натуральному числу  $e$  (приблизительно 2,72).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Muhammad H.R. Power Electronics Handbook, Second Edition: Devices, Circuits and Applications. — New York: Academic Press, 2006, 1192 p.
2. Дмитриев Б.Ф., Рябенкий В.М., Черевко А.И., Музыка М.М. Судовые полупроводниковые преобразователи: Учебник. — Архангельск: Изд-во Северного арктического федерального университета, 2015, 556 с.
3. Коптяев Е.Н., Евсеев Р.И., Балашевич В.М. Система электродвижения судов на базе матричного непосредственного преобразователя частоты. — Интернет-журнал «Науковедение», 2015, т. 7, № 2, с. 1–13.
4. Коптяев Е.Н. The system of electrical motion of marine vessels. The Impact of Enterprise Systems on Organizational Resilience. The Development of Science in the 21st Century: Natural and Technical Sciences. — New York: Ron Bee & Associates, 2015, pp. 77–86.
5. Обухов С.Г., Чаплыгин Е.Е., Кондратьев Д.Г. Широтно-импульсная модуляция в трехфазных инверторах напряжения. — Электричество, 2008, № 7, с. 23–31.

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

7. Нехамин С.Б., Бруковский И.П., Машьянов В.Г. Регулировочные характеристики источников питания пониженной частоты для промышленных рудовосстановительных печей. — Электротехника, 1985, № 10, с. 12–17.

8. Шрейнер Р.Т., Ефимов А.А., Калыгин А.И., Коряков К.Н., Мухаматшин И.А. Концепция построения двухзвенных непосредственных преобразователей частоты для электроприводов переменного тока. — Электротехника, 2002, № 2, с. 30–39.

9. Во Минь Тьин. Матричный непосредственный преобразователь частоты и его моделирование в системе Matlab. — Практическая силовая электроника, 2005, № 20, с. 16–20.

[13.11.2017]

А в т о р: **Коптяев Евгений Николаевич** окончил в 2002 г. СПб Государственный морской технический университет. Технический руководитель испытательной АО «СПО «Арктика».

*Elektrichestvo (Electricity)*, 2018, No. 3, pp. 33–37

DOI:10.24160/0013-5380-2018-3-33-37

## A Two-Channel Direct Frequency Converter

КОПТЯЕВ Evgenii N. (Public Company «Arktika», Severodvinsk, Russia) — Technical Test Manager

*Frequency converters, i.e., devices converting the power network voltage frequency into an AC output voltage of another frequency, constitute the basis of modern variable-speed drives. The majority of modern frequency converters involve an intermediate DC link. However, this additional conversion link entails certain degradation in the power performance characteristics due to switching losses and generates the need to install smoothing filters. There is also a well-known class of converters with a direct link, which use a sort of piecewise-sinusoidal modulation to produce an AC voltage of another frequency. The main distinctive feature of such converters is that they do not involve any intermediate conversions, including rectification. The output voltage is produced from the switched fragments of the power network voltage. However, limited quality of the output voltage has hitherto been the main drawback of such converters. The article describes a two-channel three-phase frequency converter with a direct link that is free from the above-mentioned drawback. In particular, the proposed system includes means to control the slope of output voltage fragments, due to which it became possible to produce a smooth function having points with equal EMFs at the converter output. As a result, the semiconductor switches can be switched in a quasi natural manner without interrupting the current waveform and, hence, without the switching overshoots accompanying such interruptions.*

**Key words:** *direct frequency converter, two-channel frequency converter with a direct link, piecewise-sinusoidal modulation, multiphase reversible switch, output voltage quality*

### REFERENCES

1. Muhammad H.R. Power Electronics Handbook, Second Edition: Devices, Circuits and Applications. — New York: Academic Press, 2006, 1192 p.

2. Dmitriyev B.F., Ryabenskii V.M., Cherevko A.I., Muzyka M.M. Sudovye poluprovodnikovye preobrazovateli: Uchebnik — in Russ. (Ship semiconductor transformers: Textbook). Arkhangelsk, Publ. Severnogo arkticheskogo federalnogo universiteta, 2015, 556 p.

3. Koptayev Ye.N., Yevseyev R.I., Balashevich V.M. Internet-zhurnal «Naukovedeniye» — in Russ (Internet-magazine «Research-on-research»), 2015, vol. 7, No. 2, pp. 1–13.

4. Koptayev Ye.N. The system of electrical motion of marine vessels. The Impact of Enterprise Systems on Organizational Resilience. The Development of Science in the 21st Century:

Natural and Technical Sciences. — New York: Ron Bee & Associates, 2015, pp. 77–86.

5. Obukhov S.G., Chaplygin Ye.Ye., Kondrat'yev D.Ye. — *Elektrichestvo* — in Russ. (Electricity), 2008, No. 7 pp. 23–31.

6. Shavelkin A.A. *Elektrotehnika* — in Russ. (Electrical engineering), 2005, No. 11 pp. 9–15.

7. Nekhamin S.M., Brukovskii I.P., Mashyanov V.G. *Elektrotehnika* — in Russ. (Electrical engineering), 1985, No 10, pp. 12–17.

8. Shreiner R.T., Yefimov A.A., Kalygin A.I., Koryukov K.N., Mukhamatshin I.A. *Elektrotehnika* — in Russ. (Electrical Engineering), 2002, No. 2, pp. 30–39.

9. Vo Min Tin. *Prakticheskaya silovaya elektronika* — in Russ. (Practical power electronics), 2005, No. 20, pp. 16–20.

[13.11.2017]