

Система электродвижения с непосредственным преобразованием частоты*

Коптяев Е.Н., Попков Е.Н.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
evgkop79@mail.ru, ENPopkov@gmail.com

Аннотация. Использование гребного электропривода переменного тока со статическим преобразователем частоты является общепринятой практикой в мировом судостроении. Применение переменного тока позволяет снизить габариты двигателя и улучшить эксплуатационные характеристики системы в целом, что обусловило практически полное вытеснение систем постоянного тока при проектировании новых судов. В качестве основы системы электродвижения чаще всего используют автономные инверторы напряжения с широтно-импульсной модуляцией, с промежуточным звеном постоянного тока. Эксплуатация таких установок связана с возникновением значительных электромагнитных излучений, а при отсутствии фильтра накладывает повышенные требования к изоляции электродвигателя. Повышение качества выходного напряжения и токов ограничивается пределом скорости коммутации ключей с одной стороны, и ростом тепловыделения, с другой стороны. Также применяются системы с непосредственным преобразованием частоты. К их достоинствам относятся низкая частота коммутации полупроводниковых ключей, отсутствие промежуточного преобразования и связанных с этим потерь, а также кусочно-синусоидальная модуляция выходных токов и напряжений – имеющая более низкий коэффициент искажений выходного напряжения. В сравнении с преобразователями на ШИМ-модуляции, преимущество непосредственных преобразователей частоты в качестве напряжения нивелируется меньшей гибкостью в управлении гармоническим составом токов, и сложностью дальнейшего улучшения характеристик преобразования. Предлагаемая работа посвящена развитию технических характеристик систем электродвижения с непосредственным преобразованием частоты, и решает задачу дальнейшего совершенствования их характеристик.

Ключевые слова: непосредственный преобразователь частоты, электропривод, электроэнергетическая система, система электродвижения судов.

ВВЕДЕНИЕ

Мировой тенденцией является использование электродвижения судов и применение гребных рулевых колонок с электродвигателями большой мощности [1, 2]. Системы электродвижения реализуют основной режим хода судна, в котором используются в длительном режиме, а также при маневрировании. Мощность таких установок сравнима с мощностью всей судовой электроэнергетической системы [3].

Преимущественное распространение получили системы электродвижения переменного тока, которым свойственны недостатки: наличие промежуточного преобразования (выпрямление) для питания звена постоянного тока,

большой уровень электромагнитных излучений (использование импульсной модуляции) [3, 4]. Менее очевидным недостатком является наличие силовых трансформаторов, номинальная мощность которых соответствует мощности всей системы электродвижения. Перечисленные выше недостатки приводят к проблемам электромагнитной совместимости (ЭМС) с судовым электрооборудованием и системами автоматики, а также ощутимому увеличению себестоимости установки из-за необходимости использования сглаживающих фильтров и силовых трансформаторов большой мощности [5].

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Используемые на гражданских судах, например, арктических ледоколах, системы электродвижения переменного тока обеспечивают работу гребного электропривода в основных эксплуатационных режимах – как при статических, так и динамических нагрузках на линии вала. Наибольшее распространение получили благодаря своей простоте и надежности гребные асинхронные электродвигатели, управление оборотами которых реализуется применением полупроводниковых преобразователей частоты с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ).

Наиболее распространенным типом преобразователя частоты с ШИМ является автономный инвертор напряжения (АИН) с промежуточным звеном постоянного тока [6]. Для АИН с ШИМ характерна высокая частота коммутации полупроводниковых ключей, что вызывает повышенный нагрев IGBT-модулей, а импульсная коммутация с разрывом номинальных токов требует снабженных цепей для гашения коммутационных выбросов [6, 7]. Также недостатком является невысокое качество выходного напряжения таких АИН в случае использования без фильтров, что привело к появлению многоуровневых преобразователей, в которых тем или иным способом достигается смещение напряжения звена постоянного тока на несколько уровней. Это позволило в определенной степени приблизить форму выходного напряжения к синусоиде и улучшить гармонический состав токов. Недостатком является использование высоковольтных конденсаторов значительной емкости, что ведет к ухудшению габаритов преобразователя и снижению его надежности ввиду относительно невысокой вероятности безотказной работы таких конденсаторов [8]. Гармонический состав токов и напряжений также напрямую зависит от частоты несущей ШИМ, и с одной стороны ограничен коммутационной способностью IGBT-транзисторов, с другой – проблемой

* Статья публикуется по рекомендации программного комитета Международной научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг" (ICIE-2018), <http://icie-rus.org>

тепловых потерь. Повышение частоты коммутации полупроводниковых ключей ведет к росту уровня радиоизлучений и ухудшению электромагнитной совместимости.

Таким образом, можно сформулировать основную техническую задачу судовой преобразовательной техники – уменьшение уровня излучаемых помех и повышение электромагнитной совместимости с питающей сетью, без значительного повышения себестоимости и габаритов. При проектировании поставленная задача должна решаться схмотехнически, а не за счет усложнения системы введением фильтрующих элементов.

Осциллограмму выходного напряжения судового многоуровневого преобразователя частоты системы электродвижения можно увидеть на рис. 1. Стоит отметить, что по массогабаритным показателям в данном случае не удалось разместить фильтры для улучшения качества выходного напряжения и ограничения уровня излучаемых помех.

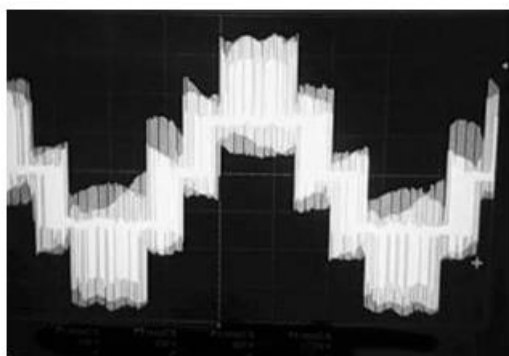


Рис. 1. Осциллограмма выходного напряжения.

Показанное на рис. 1 напряжение с ШИМ подается непосредственно на гребной электродвигатель по неэкранированным кабельным трассам, приводя к значительному уровню воздействующих на окружающее оборудование помех и сбоям систем автоматики. Согласно современной трактовке ЭМС, в ее основе лежит способность оборудования функционировать без внесения искажений, превышающих допустимый уровень [9], однако соответствие этому критерию судовых систем электродвижения обеспечивается не всегда.

Помимо обеспечения ЭМС, актуальным вопросом мощного частотно-управляемого электропривода является обеспечение надежной работы электродвигателя [10], обусловленное импульсным характером выходного напряжения. Как известно, работа преобразователей с ШИМ сопровождается возникновением перенапряжений на обмотке статора при высокой крутизне фронтов напряжений dU/dt вплоть до 10 кВ/мкс, что ведет к ускоренному износу и выходу из строя изоляции.

В системах электродвижения, используемых на судах, одной из составных частей гребного электропривода являются силовые трансформаторы. Их применение обусловлено необходимостью согласования напряжения питающей сети с напряжением звена постоянного тока преобразователя частоты, а также стремлением к увеличению качества выпрямленного напряжения. Однако распространение единых электроэнергетических систем (ЕЭЭС) привело к появлению бестрансформаторных систем электродвижения [11-13].

СИСТЕМА ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЯ С ДВУКАНАЛЬНЫМ НЕПОСРЕДСТВЕННЫМ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ ЧАСТОТЫ

Известны системы электродвижения, основанные на преобразовании переменного напряжения одной частоты в переменное напряжение другой частоты без промежуточных звеньев [9, 11]. Подобные системы без промежуточного звена постоянного тока основаны на использовании непосредственной связи, то есть преобразователей с непосредственным преобразованием частоты (НПЧ).

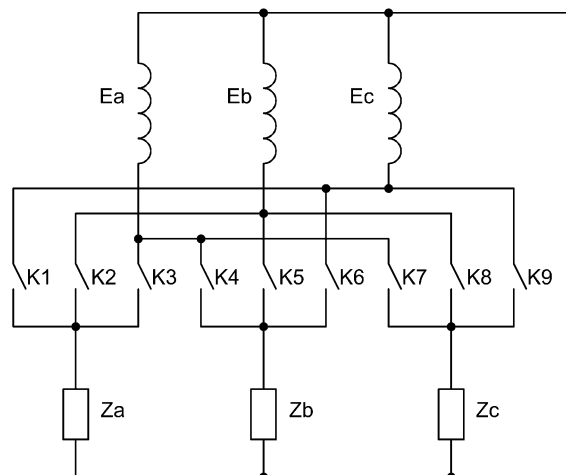


Рис. 2. Схема коммутатора простейшего НПЧ

Основу любого НПЧ составляет трехфазный реверсивный коммутатор, подключенный к источнику переменного напряжения и к нагрузке (рисунок 2). Трехфазные НПЧ образуются соединением трех многофазных реверсивных мостов, которые хорошо известны и подробно описаны в учебной литературе по преобразовательной технике, например, [6]. При этом для соединения фаз нагрузки в звезду используют трансформаторы с отдельными вторичными обмотками, как это показано на рис. 3.

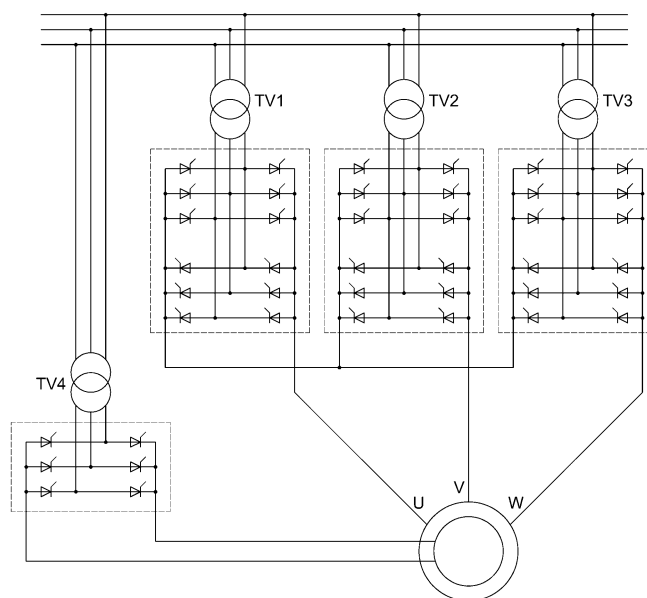


Рис. 3. Схема электропривода простейшего НПЧ

Показанная на рис. 3 принципиальная схема электропривода с НПЧ характеризуется большим числом полупроводниковых ключей, а также использованием силовых трансформаторов для гальванической развязки, что обуславливает ее повышенную себестоимость.

Системы с непосредственным преобразованием частоты можно охарактеризовать как частный случай кусочно-синусоидальной модуляции, поскольку выходное напряжение формируется из фрагментов синусоиды с частотой питающей сети. При этом на выходе преобразователя возможно получение фрагментов как спадающего, так и возрастающего фронта синусоиды, в том числе в произвольный момент времени, что объясняется многофазной системой на входе.

Существует несколько различных алгоритмов формирования выходного напряжения НПЧ, один из них показан на рис. 4 и может быть обозначен как “обратный”, поскольку фрагменты коммутируемого напряжения всегда обратны к фронтам синусоиды формируемого напряжения. Этот вариант имеет наихудшие гармонические искажения, более 15%.

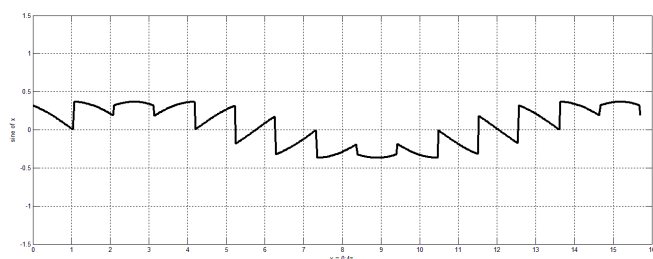


Рис. 4. График “обратного” алгоритма формирования выходного напряжения НПЧ

На рис. 5 показан алгоритм формирования выходного напряжения НПЧ, при котором восходящий фронт синусоиды формируемого напряжения состоит из фрагментов восходящих фронтов, а нисходящий фронт – из фрагментов нисходящих фронтов. Другими словами, при таком способе управления НПЧ фронты фрагментов всегда совпадают с фронтами полуволны формируемого напряжения. В таком случае обеспечивается заметно лучшее качество выходного напряжения, а гармонические искажения составляют около 5%.

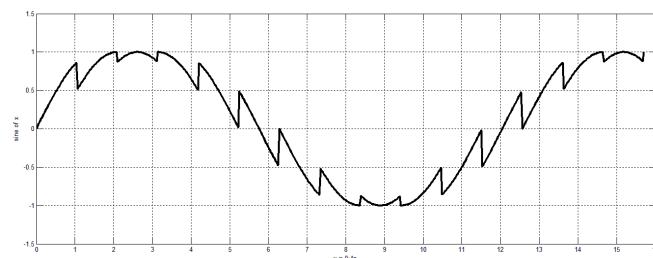


Рис. 5. График “основного” алгоритма формирования выходного напряжения НПЧ

В настоящей работе предлагается использовать в системах электродвижения новый способ преобразования, при котором обеспечивается сходимость функции выходного напряжения НПЧ, формируемого из суммы обратных относительно друг друга фрагментов двух каналов, как это показано на рис. 5.

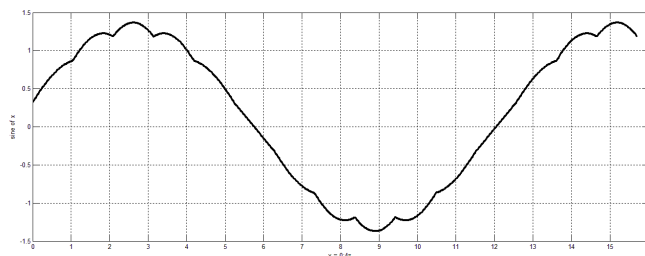


Рис. 6. График напряжения двухканального НПЧ

Данный вариант характеризуется наилучшим (искажения менее 1,7%) приближением формы выходного напряжения преобразователя к синусоидальной, и обеспечивает режим квази-естественной коммутации без разрыва кривой тока. Реализация такого алгоритма преобразования возможна только при использовании полупроводниковых коммутаторов с полностью управляемыми ключами (например, IGBT транзисторами). На рисунках 7-9 показан спектральный состав выходного напряжения для различных вариантов НПЧ. Значения оси ординат на графиках (соответствующие напряжению на выходе НПЧ) приведены в логарифмической шкале для большей наглядности.

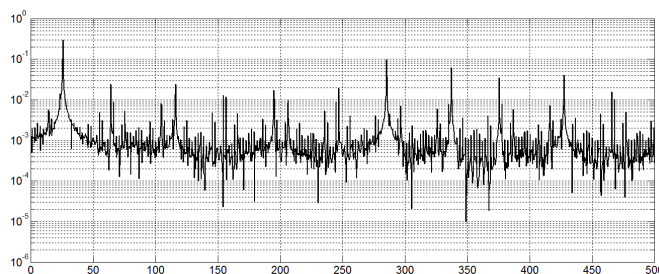


Рис. 7. Анализ спектра выходного напряжения НПЧ с “обратным” алгоритмом формирования

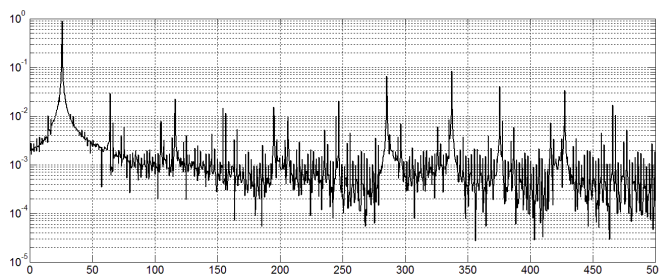


Рис. 8. Анализ спектра выходного напряжения НПЧ с “прямым” алгоритмом формирования

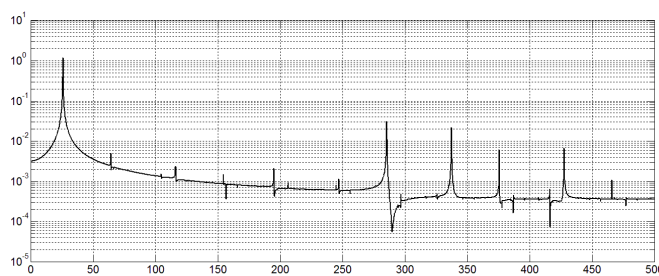


Рис. 9. Анализ спектра выходного напряжения двухканального НПЧ

Суммированием напряжений двух последовательно соединенных реверсивных мостов, формируется гладкая выходная функция без разрывов, как это показано на рис. 6 и коммутация вентилях происходит в моменты равенства напряжений, что соответствует коммутации без разрыва кривой тока. Простейший вариант схемы такого суммирования приведен на рис. 10.

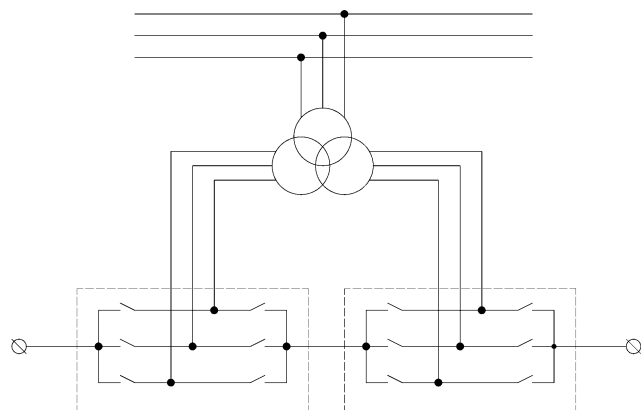


Рис. 10. Схема одной фазы двухканального НПЧ

Из схемы на рис. 10 очевидно, что для суммирования напряжений двух каналов НПЧ требуется гальванически развязанные источники многофазной ЭДС, и двойной комплект реверсивных коммутаторов. Показанная схема соответствует одной фазе выходного напряжения двухканального НПЧ, а принципиальная схема всей системы будет соответствовать рис. 3. Таким образом, для реализации двухканального НПЧ потребуется 6 комплектов трехфазных реверсивных коммутаторов, получающих питание от 6 трехфазных вторичных обмоток трансформаторов [14, 15]. Суммарное число IGBT транзисторов будет составлять 72, что в реальной установке приведет к громоздкости, повышенным габаритам и массе, а также избыточному числу силовых кабельных линий.

В качестве решения упомянутой выше проблемы, предлагается использование системы электродвижения судов, показанной на рис. 11. Для получения трехфазного напряжения на выходе НПЧ в ней предлагается использование комплекта последовательно соединенных реверсивных мостов.

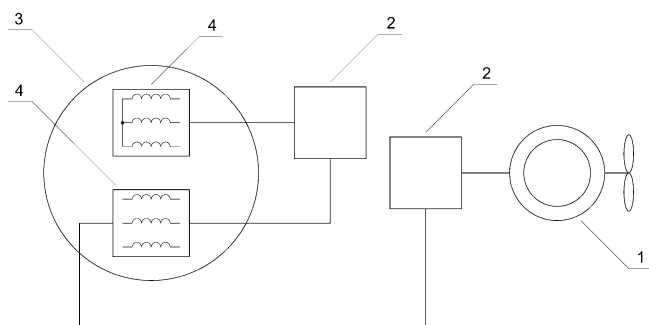


Рис. 11. Функциональная схема электродвижения

Функциональный состав такой системы электродвижения судов следующий: 1 – гребной электродвигатель переменного тока, 2 – коммутаторы на полупроводниковых ключах, 3 – судовой источник (генератор), 4 – трехфазные обмотки источника. Такая система является глубоко интегрированной в судовую электроэнергетическую систему, составляя единое целое с источником электроэнергии. В этом случае размывается граница между преобразователем и системой электродвижения, что позволяет ввести понятие о непосредственном преобразовании частоты.

Главное достоинство такой системы электродвижения судов – обеспечение технических преимуществ при сохранении малого числа комплектующих изделий, особенно IGBT модулей. За счет отсутствия силовых трансформаторов снижается себестоимость системы в целом, что повышает ее привлекательность, а отказом от промежуточных звеньев преобразования электроэнергии – повышается общий коэффициент полезного действия, и эффективность системы. Реализуемый в ней способ преобразования частоты позволяет улучшить гармонический состав токов и напряжений – что ведет к снижению потерь в электродвигателе и кабельных трассах, позволяет отказаться от использования громоздких выходных фильтров. Также можно отметить низкую частоту коммутации полупроводниковых ключей, а также возможность коммутации в моменты равенства напряжений обмоток – что позволяет избежать разрыва кривой тока и коммутационных выбросов.

Известные ранее варианты систем электродвижения, реализующие двухканальный НПЧ с улучшенным качеством напряжения [14, 15], отличаются значительной громоздкостью, большим количеством ключей, и использованием многообмоточных трансформаторов большой мощности. Например, для реализации системы, описанной в [15] требуется 72 IGBT транзистора на трехфазный канал, и 144 IGBT транзистора для работы в шестифазном режиме. Такая система технически реализуема, однако не является оптимальной.

Изображенная на рис. 12 принципиальная схема системы электродвижения соответствует функциональной схеме, показанной на рис. 11. На изображены трехфазные обмотки генератора (4), одна из которых включается по схеме “звезда” и имеет общую точку, вторая является разомкнутой и подключена началом – к выходу первого коммутатора, выходом – к входу второго коммутатора. То есть фазы второй трехфазной обмотки генератора служат в качестве добавочной ЭДС и подключаются поочередно к фазам первой обмотки. Для сохранения сходимости выходной функции (отсутствия разрывов выходного напряжения) необходимо обеспечение соотношения числа витков обмоток, равного натуральному числу (приблизленно 2,72). Выход второго коммутатора подключен к обмотке статора гребного электродвигателя.

Основное достоинство предлагаемого варианта – снижение числа полупроводниковых ключей, обусловленное следующим. В известных ранее решениях, описанных в работах [14, 15], применены трехфазные реверсивные коммутаторы (трехфазные мосты), осуществляющие в режиме формирования однофазного напряжения. Напряжения включенных таким образом упомянутых коммута-

торов суммируются, формируя выходное напряжение только одной фазы. Получение трехфазной системы в таком случае требует включения по схеме “звезда” трех пар коммутаторов. Это и является причиной столь большого числа ключей (72 транзистора для трехфазного выхода). Говоря другими словами, проблема заключается в использовании 3-фазных коммутаторов для формирования 1-фазного напряжения. Предлагаемая на рисунке 12 система электродвижения повышает коэффициент использования, как обмоток источника электроэнергии, так и ключей. Можно заключить, что в таком случае 3-фазные коммутаторы используются для формирования 3-фазного выходного напряжения, без образования промежуточного 1-фазного.

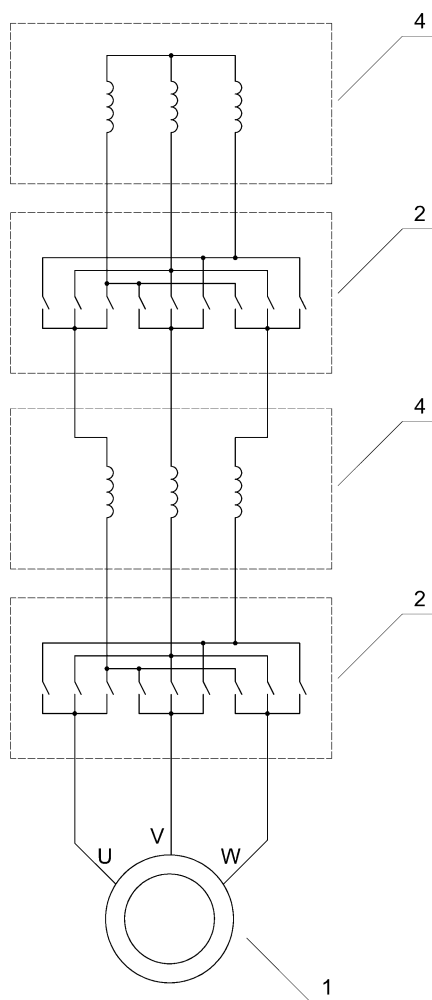


Рис. 12. Функциональная схема системы электродвижения судов с двухканальным НПЧ

Достигнутое таким образом снижение числа полупроводниковых ключей в 2 раза является существенным техническим преимуществом системы, одновременно решается задача повышения надежности.

Как известно, использование в регулируемом по оборотам электроприводе преобразователя частоты требует возможности изменения значения выходного напряжения [6, 7, 10], в функции от скорости вращения. Такое регулирование невозможно в системах электродвижения, построенных на основе обычных НПЧ. Причина заключает-

ся, в том числе, в использовании трансформаторов для питания полупроводниковых коммутаторов. Поскольку все основные параметры трансформаторов нелинейным образом зависят от уровня напряжения питающей сети, затруднено регулирование выходного напряжения НПЧ путем изменения напряжения питающего источника.

В предлагаемом варианте система электродвижения получает питание непосредственно от обмоток судового генератора переменного тока, образуя неразрывно связанную систему с непосредственным преобразованием частоты. Главное преимущество такой системы – в возможности регулирования выходного напряжения, подаваемого на гребной электродвигатель, путем регулирования тока возбуждения источника (генератора). Поскольку в системе отсутствуют трансформаторы, а обмотки генератора подключены к полупроводниковым коммутаторам, изменение напряжения питания не приводит к нарушению режима работы системы.

Можно перечислить выявленные выше достоинства предлагаемой системы электродвижения:

- существенно (в 2 раза) уменьшено количество полупроводниковых ключей;
- интеграция с источником электроэнергии (генератором), и возможность плавного регулирования напряжения электропривода;
- отсутствие силовых трансформаторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, можно сделать вывод, что предложенная система электродвижения переменного тока на базе непосредственного преобразователя частоты существенно улучшает эксплуатационные качества гребного электропривода – относительно известных ранее систем.

К числу достоинств можно отнести улучшение гармонического состава токов и напряжений, что позволяет отказаться от применения громоздких фильтров на выходе преобразователя частоты и этим снизить себестоимость установки в целом.

Упомянутое выше улучшение качества токов и напряжений достигается путем глубокой интеграции преобразователя частоты и судового источника электроэнергии (генератора), что позволяет не только избежать роста числа полупроводниковых ключей, но и отказаться от силовых трансформаторов, обеспечив изменения напряжения гребного электропривода за счет регулирования тока в обмотке возбуждения генератора.

Также надо отметить, что улучшение основных характеристик системы не сопровождается однозначным проигрышем по другим параметрам. Остается небольшим количество полупроводниковых ключей, а рост качества напряжений и токов сопровождается общим упрощением функционального состава системы электродвижения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Логачев С.И. Мировое судостроение: современное состояние и перспективы развития. – 2-е изд., перераб. и доп. / С.И. Логачев, В.В. Чугунов. – СПб: Судостроение, 2001. – 312 с.
2. Гребные электрические установки: учеб. для вузов. / А.Б. Дарьенков, Г.М. Мирясов, В.Г. Титов и др. – Ниж. Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО НГТУ, 2014. – 219 с.

3. Дмитриев Б.Ф. Импульсные преобразователи для современных систем электродвижения / Б.Ф. Дмитриев, С.Я. Галушин, А.Н. Калмыков // Труды IX международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016. – Пермь: Издательство Пермского национального исследовательского политехнического университета, 2016. – С. 274.-276.

4. Дмитриев Б.Ф. Методы и средства обеспечения электромагнитной совместимости в судовых системах электропитания / Б.Ф. Дмитриев, П.А. Воршевский, В.В. Резниченко // Электротехника. – 2017. – №12. – С. 24-29.

5. Дядик А.Н. Корабельные энергетические системы. / А.Н. Дядик, Б.В. Никифоров. – Новочеркасск: ЛИК, 2012. – 680 с.

6. Зиновьев Г.С. Силовая электроника. – М.: Издательство Юрайт, 2012. – 667 с.

7. Muhammad H.R. Power Electronics Handbook, Second Edition: Devices, Circuits and Applications. – N.Y.: Academic Press, 2006. – 1192 p.

8. Чеканов А.Н. Расчеты и обеспечение надежности электронной аппаратуры. – М.: Изд-во КНОРУС, 2014. – 438 с.

9. Судовые полупроводниковые преобразователи: учебник. / Б.Ф. Дмитриев, В.М. Рябенский, А.И. Черевко, М.М. Музыка. – Архангельск: Изд-во САФУ, 2015. – 556 с.

10. Новиков Г.В. Частотное управление асинхронными электродвигателями. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – 498 с.

11. Голубев К.Г. Энергетические установки кораблей с электродвижением // Морской вестник. – 2013. – №2. – С. 38-39.

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

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

14. Коптяев Е.Н. Система электродвижения судов на базе матричного непосредственного преобразователя частоты / Е.Н. Коптяев, Р.И. Евсеев, В.М. Балашевич // Интернет-журнал "Науковедение". – 2015. – Т.7, №2. – С. 1-13.

15. Вечеров И.А., Евсеев Р.И., Коптяев Е.Н., Сажин А.В., Хомяк В.А. Система электродвижения судов // Патент России №157368. 2015. Бюл. №33.

DOI: 10.24892/RIJEE/20180204

Direct-Conversion Electric Propulsion System

Koptjaev E.N., Popkov E.N.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

St. Petersburg, Russian Federation

evgkop79@mail.ru. ENPopkov@gmail.com

Abstract. The use of an AC propulsion motor with a static frequency converter is a common practice in the world shipbuilding industry. The use of alternating current allows to reduce the dimensions of the engine and improve the operational characteristics of the system as a whole, which led to the almost complete replacement of DC systems in the design of new vessels. As the basis of the electromotive system, autonomous voltage inverters with pulse-width modulation, with an intermediate DC link, are most often used. Operation of such installations is associated with the occurrence of significant electromagnetic emissions, and in the absence of a filter imposes increased requirements for the insulation of the motor. The improvement in the quality of the output voltage and currents is limited by the limit of the switching speed of the keys on one side, and the increase in heat release on the other hand. Systems with direct frequency conversion are also used. Their advantages include a low switching frequency of semiconductor switches, no intermediate conversion and associated losses, as well as piecewise sinusoidal modulation of output currents and voltages - which has a lower distortion of the output voltage. In comparison with PWM modulators, the advantage of direct frequency converters as a voltage is offset by less flexibility in controlling the harmonic composition of the currents, and the complexity of further improving the conversion characteristics. The proposed work is devoted to the development of the technical characteristics of electromotive systems with direct frequency conversion, and solves the problem of further improving their characteristics.

Keywords: direct frequency converter, electric drive, electric power system, ship electrical propulsion system.

REFERENCES

1. Logachev S.I., Chugunov V.V. *Mirovye sudostroenie: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya. – 2-e izd., pererab. i dop.* [World shipbuilding: current state and development prospects. - 2nd ed., Pererab. and add.], Saint Petersburg, Shipbuilding, 2001, 312 p. (in Russ.)

2. Darienkov A.B., Miryasov G.M., Titov V.G. et al. *Grebnye elektricheskie ustanovki: ucheb. dlya vuzov* [Rowing electrical installations: studies. for universities], Nizh. Novgorod: Publishing house of FSBEI HE NGTU, 2014, 219 p. (in Russ.)

3. Dmitriev B.F., Galushin S.Ya., Kalmykov A.N. Pulse converters for modern electric propulsion systems [Impul'snye preobrazovateli dlya sovremennykh sistem elektrodvizheniya], *Trudy IX mezhdunarod-noy (XX Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2016. – Perm': Izdatel'stvo Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of the IX International (XX All-Russian) Conference on the automated electric drive AEP-2016], Perm: Publishing house of the Perm National Research Polytechnic University, 2016, pp. 274.-276. (in Russ.)

4. Dmitriev B.F., Vorshevskii P.A., Reznichenko V.V. Methods and Equipment to Provide Electromagnetic Compatibility in Marine Power-Supply Systems, *Russian Electrical Engineering*, 2017, vol. 88, no.12, pp. 795-799. DOI: 10.3103/S1068371217120033

5. Uncle A.N., Nikiforov B.V. *Korabel'nye energeticheskie sistemy* [Ship energy systems], Novochoerkassk, LIC, 2012, 680 p. (in Russ.)

6. Zinoviev G.S. *Silovaya elektronika* [Power electronics], Moscow, Publishing Yurayt, 2012, 667 p. (in Russ.)

7. Muhammad H.R. *Power Electronics Handbook*, Second Edition: Devices, Circuits and Applications, N.Y., Academic Press, 2006, 1192 p.

8. Chekanov A.N. *Raschety i obespechenie nadezhnosti elektronnoy apparatury* [Calculations and ensuring the reliability of electronic equipment], Moscow, Publishing house KNORUS, 2014, 438 p. (in Russ.)

9. Dmitriev B.F., Ryabenky V.M., Cherevko A.I., Muzyka M.M. *Sudovye poluprovodnikovye preobrazovateli: uchebnik* [Ship semiconductor converters: a textbook], Arkhangelsk, NArFU Publishing House, 2015, 556 p. (in Russ.)

10. Novikov G.V. *Chastotnoe upravlenie asinkhronnymi elektrodvigatelyami* [Frequency control of asynchronous electric motors], Moscow, Publishing House of Moscow State Technical University. N.E. Bauman, 2016, 498 p. (in Russ.)

11. Golubev K.G. *Power plants of ships with electric propulsion* [Energeticheskie ustanovki korablye s el-

ektrodvizheniem], *Morskoy vestnik* [Morskoy Vestnik], 2013, no.2, pp. 38-39. (in Russ.)

12. Kalmykov A.N., Kuznetsov V.I., Senkov A.P., Tokarev L.N. *Shipless transformer rowing electrical installations* [Sudovye bestransformatornye grebnye elektricheskie ustanovki], *Morskoy vestnik* [Marine Bulletin], 2013, no.1, pp. 40-42. (in Russ.)

13. Senkov A.P., Dmitriev B.F., Kalmykov A.N., Tokarev L.N. *Ship unified electric-power systems*, *Russian Electrical Engineering*, 2017, vol. 88, no.5, pp. 253-258. DOI: 10.3103/S1068371217050108

14. Koptyaev E.N., Evseev R.I., Balashevich V.M. *Electric Propulsion system on the basis of the matrix direct frequency converter* [Sistema elektrodvizheniya sudov na baze matrichnogo neposredstvennogo preobrazovatelya chastoty], *Internet-zhurnal "Naukovedenie"* [Internet journal "Naukovedenie"], 2015, vol.7, no.2. pp. 1-13. (in Russ.)

15. Vecherov I.A., Evseev R.I., Koptyaev E.N., Sazhin A.V., Khomyak V.A. *Sistema elektrodvizheniya sudov* [Ship propulsion system], Patent of Russia 157368, 2015, Bull. No. 33. (in Russ.)

Библиографическое описание статьи

Коптяев Е.Н. Система электродвижения с непосредственным преобразованием частоты / Е.Н. Коптяев, Е.Н. Попков // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. – 2018. – Т.5, №2. – С. 23-29. DOI: 10.24892/RIJEE/20180204

Reference to article

Koptyaev E.N., Popkov E.N. Direct-conversion electric propulsion system, *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 2018, vol.5, no.2, pp. 23-29. DOI: 10.24892/RIJEE/20180204
