Интернет-журнал «Наукоедение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 7, №2 (2015) <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol7-2>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/111TVN215.pdf>

DOI: 10.15862/111TVN215 (<https://doi.org/10.15862/111TVN215>)

УДК 621.314.572

Коптяев Евгений Николаевич

ОАО «Северное Производственное Объединение «Арктика»»

Российская Федерация, г. Северодвинск¹

Инженер по наладке и испытаниям 1 категории

Старший преподаватель

E-mail: evgenijkoptyaev@gmail.com

РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=792304

Евсеев Роман Игоревич

ВУНЦ ВМФ «ВМА», НИИ КиВ ВМФ

Российская Федерация, г. Санкт-Петербург²

Специалист

Аспирант

E-mail: niikv44k@mail.ru

Балашевич Вячеслав Михайлович

НИИ Энергетики ЮРГТУ

Российская Федерация, г. Новочеркасск³

Ведущий инженер

E-mail: bmashka@gmail.com

Система электродвижения судов на базе матричного непосредственного преобразователя частоты

¹ 164522, г. Северодвинск, ул. Трухинова, 11, кв. 106

² 197101, Санкт-Петербург, ул. Чапаева, 30

³ 346428, Ростовская область г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132

Аннотация. Многие современные суда оснащаются системами электродвижения, что обуславливает актуальность статьи. Общей тенденцией является использование систем электродвижения переменного тока, что обусловлено более надежной конструкцией асинхронного двигателя и несколько лучшими массогабаритными показателями. Использование асинхронного двигателя требует статического преобразователя частоты для регулирования оборотов и плавного пуска. В настоящее время используются ШИМ-преобразователи разных типов. Возможности классических непосредственных преобразователей частоты ограничены из-за ряда принципиальных недостатков, в частности недостаточного качества выходного напряжения и наличия разрыва тока при коммутации. Предлагаемая в статье система электродвижения с непосредственным преобразователем частоты позволяет реализовать режим естественной коммутации вентилей, а также существенно улучшить гармонический состав выходного напряжения и токов преобразователя. Отсутствие несущей частоты широтно-импульсной модуляции улучшает акустические характеристики и электромагнитную совместимость с судовым оборудованием. Режим с питанием от двух независимых генераторов улучшает виброакустические характеристики.

Ключевые слова: система электродвижения; статический преобразователь; трехфазный трансформатор с вращающимся полем; непосредственный преобразователь частоты; электромагнитная совместимость; круговая обмотка; коммутация; igbt-модуль; виброакустика; асинхронный двигатель.

Ссылка для цитирования этой статьи:

Коптяев Е.Н., Евсеев Р.И., Балашевич В.М. Система электродвижения судов на базе матричного непосредственного преобразователя частоты // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 7, №2 (2015) <http://naukovedenie.ru/PDF/111TVN215.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/111TVN215

Современные суда, чаще всего оснащаются системой электродвижения. В зависимости от их специфики различают основные, и вспомогательные (резервные) системы электродвижения. В случае использования комбинированного способа движения корабля, гребной винт может быть подключен постоянно или через муфту к двум приводам – механическому движителю, и гребному электродвигателю [3]. Вспомогательные системы электродвижения реализуют режим с длительным малощумным экономичным ходом, и, как правило, имеют значительно меньшую по сравнению с механическим приводом (турбиной), мощность.

Первое применение систем электродвижения судов практически совпало с появлением электричества на судах [3]. В начале 20 века, с развитием техники, увеличивалась насыщенность судов электрооборудованием, что дало предпосылки развитию систем электродвижения. В дальнейшем, произошло значительное увеличение мощности судовых электроэнергетических систем (СЭЭС), сопровождаемое увеличением числа потребителей. Появление атомных энергетических установок, например на ледоколах, открыло новые перспективы систем электродвижения судов.

В настоящее время мировой тенденцией является использование систем электродвижения переменного тока – как на кораблях, так и на гражданских судах, например арктических ледоколах. Системы электродвижения с двигателями постоянного тока (ДПТ) имеют несколько большие габариты, и меньший ресурс из-за наличия коллектора и щеточного аппарата. Последнее делает затруднительным создание особо мощных гребных приводов на основе ДПТ для атомных ледоколов [3, 9].

В последнее десятилетие полупроводниковой промышленностью освоено производство мощных полностью управляемых вентилях с высокой частотой коммутации, что привело к развитию схемотехники импульсных статических преобразователей, и поиску различных алгоритмов управления ими.

Наиболее распространенным типом являются преобразователи частоты с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). К их достоинствам относятся хорошие массогабаритные показатели, низкая себестоимость и возможность регулирования частоты выходного напряжения в широких пределах. Вместе с тем, в основе ШИМ лежит принцип коммутации с разрывом кривой тока, а содержание основной гармоники в выходном напряжении ограничивается предельной частотой коммутации полупроводниковых вентилях, которая для IGBT-модулей не превышает 20 кГц и чаще всего несущая частота ШИМ составляет от 1 до 8 кГц. Более высокая по сравнению с классическими преобразователями частота коммутации вентилях вызывает повышенный нагрев и снижает долговечность модулей, а разрыв тока требует снабберных цепей для гашения коммутационных выбросов [1, 2, 10, 11].

Одним из путей повышения качества ШИМ является применение многоуровневых преобразователей, в которых тем или иным способом достигается разделение напряжения питания на несколько уровней, что позволяет приблизить форму выходного напряжения к синусоидальной и улучшить его гармонический состав. Чаще всего в многоуровневых преобразователях используют высоковольтные конденсаторы на большую емкость, что ведет к ухудшению габаритов преобразователя и снижения его надежности ввиду относительно низкой вероятности безотказной работы таких конденсаторов.

Появление новых способов широтно-импульсного управления позволило создать выпрямители, инверторы и преобразователи частоты с улучшенными характеристиками – повышению коэффициента потребляемой мощности, качеством выходного напряжения и тока, сниженными массой и габаритами. Одновременно с этим произошло повышение частоты коммутации вентилях, которая во много раз превышает частоту питающей сети, и еще больше

– по сравнению с классическими преобразователями. Это ведет к повышенному тепловыделению вентилях, ухудшению электромагнитной совместимости и снижению надежности их работы – поскольку процесс коммутации является самым напряженным режимом работы, сопровождаемым кроме того, выбросами напряжения при разрыве кривой тока.

Таким образом, главной технической проблемой современной силовой преобразовательной техники можно признать процесс коммутации тока, и, следовательно – снижение коммутационных выбросов. Форму выходного напряжения одного из таких преобразователей, реализующих многоуровневую широтно-импульсную модуляцию, можно увидеть на рисунке 1.

Рисунок 1. Напряжение на выходе многоуровневого ШИМ-преобразователя

Спектральный анализ виброшумовых характеристик (ВШХ) при работе такого преобразователя показан на рисунке 2. Из него следует, что наличие несущей частоты ШИМ приводит появлению частотных составляющих, кратных частоте несущей ШИМ, имеющих вид резких всплесков, что ухудшает виброакустические и эксплуатационные характеристики системы электродвижения.

Одним из путей улучшения ВШХ многоуровневых импульсных преобразователей является модуляция частоты коммутации по случайному закону. Если в обычном преобразователе частота тактов в течение периода выходного напряжения является константой, то в случае случайной модуляции частота тактов отклоняется добавлением случайного сигнала с математическим ожиданием, равным нулю [2].

Рисунок 2. Спектр частот на выходе преобразователя частоты с ШИМ

Подобные алгоритмы известны отечественным и зарубежным производителям, и позволяют размыть спектр частот на выходе преобразователя, таким образом, что он становится непериодическим или квази-периодическим. Тем не менее, существует ряд ограничений аппаратного характера, в частности необходимо учитывать параметры снабберных цепочек, что ограничивает глубину модуляции несущей частоты ШИМ.

В результате использования случайной модуляции удается распределить спектр выходных частот по 1/3 октавы, при сохранении общей энергии высших гармоник. Это снижает шумы от магнитострикции стали двигателя и механических резонансов элементов.

Данный метод не получил широкого распространения из-за консерватизма разработчиков, и усложнения алгоритмов коммутации, связанных со снижением общей надежности преобразователя.

Система электродвижения на базе матричного непосредственного преобразователя частоты с квази-естественной коммутацией

Как правило, в существующих статических преобразователях, трансформаторы применяются главным образом для согласования напряжения питающей сети с напряжением на выходе преобразователя [1, 2, 9, 11, 12]. В мощных статических преобразователях частоты, чаще всего, используется звено постоянного тока, получаемое выпрямлением переменного напряжения сети, а для гальванической развязки и согласования напряжения используется силовой трансформатор.

Также существует класс преобразователей переменного напряжения одной частоты в переменное напряжение другой частоты [1, 2]. Подобные устройства однокаскадного преобразования частоты без промежуточного звена постоянного тока получили название преобразователей с непосредственной связью (непосредственных преобразователей частоты, НПЧ). В последние годы их стали называть иногда матричными преобразователями.

Основу любого НПЧ составляет многофазный реверсивный выпрямитель, поскольку он работает от источника переменного напряжения и может работать с любым из четырех возможных сочетаний полярностей выходного напряжения и тока. Трехфазные НПЧ образуются соединением трех многофазных реверсивных выпрямителей, при этом для соединения фаз нагрузки в звезду требуется наличие развязывающего трансформатора с отдельными вторичными обмотками.

Рисунок 3. Форма выходного напряжения матричного НПЧ

В целом, непосредственные преобразователи можно охарактеризовать как случай кусочно-синусоидальной модуляции выходного напряжения, поскольку выходное напряжение формируется из фрагментов синусоиды с частотой питающей сети. При этом, возможно получение фрагментов как спадающего, так и возрастающего фронта синусоиды [1, 2].

Как правило, выходное напряжение формируется из соответствующих фрагментов (рисунок 3), при этом восходящий фронт выходного напряжения состоит из аналогичных фрагментов питающего напряжения, а нисходящий фронт – из нисходящих фрагментов. Это обеспечивает максимальное качество выходного напряжения.

Рисунок 4. Форма обратной функции матричного НПЧ

Возможен альтернативный способ преобразования, когда выходное напряжение формируется из обратных фрагментов питающего напряжения (рисунок 4). Данный вариант характеризуется худшим приближением формы выходного напряжения непосредственного преобразователя к синусоиде, и максимальной амплитудой разрыва кривой функции напряжения.

Очевидно, что обоим способам присущи следующие недостатки, а именно:

- разрыв кривой функции выходного напряжения, следовательно – невозможность естественной коммутации тока;
- качество выходного напряжения сильно зависит от числа фаз, из которых формируется выходное напряжение;
- значительная амплитуда разрывов кривой функции выходного напряжения приводит к появлению широкого спектра высших гармонических составляющих, в том числе неканонических.

Тем не менее, существует возможность улучшения характеристик матричных НПЧ за счет комбинации обоих алгоритмов преобразования. В его основу положено следующее: в случае сложения двух фрагментов синусоидальных функций, представляющих восходящий и нисходящий фронты, формируется результирующая синусоидальная функция, фаза которой определяется соотношением двух исходных функций. Это позволяет улучшить технические характеристики непосредственных преобразователей частоты следующим образом: формируется два кусочно-синусоидальных напряжения, одно из них формируется по основному алгоритму, второе – обратному. Таким образом, каждому фрагменту на выходе первого реверсивного моста соответствует фрагмент обратного, так что восходящему фронту одного канала напряжения соответствует нисходящий фронт другого. Это наглядно видно на рисунке 5, где так же показан результат суммирования двух каналов напряжения. Точками на графике выходного напряжения отмечены моменты коммутации реверсивных многофазных мостов.

В результате суммирования напряжений двух реверсивных мостов, формируется гладкая выходная функция без разрывов, и коммутации вентилях в моменты равенства ЭДС, что соответствует квази-естественной коммутации без разрыва кривой тока.

Основой для нового класса статических преобразователей электроэнергии стали трансформаторы с вращающимся полем (ТВП), как попытка улучшить электромагнитную совместимость с питающей сетью и качество выходного напряжения выпрямителей и инверторов на базе ТВП [4, 5, 6, 7, 8, 12]. Это привело к появлению вторичной круговой обмотки (КО), выполненной по типу якорной обмотки машины постоянного тока, и изменению схемы соединений полупроводникового коммутатора. Возможность получения большого числа пульсаций выпрямленного и ступеней синусоидального напряжения за счет увеличения числа отводов КО – один из способов улучшения качества напряжения на выходе выпрямителей и инверторов на базе ТВП. Дальнейшим развитием идеи управляемого статического преобразователя на базе ТВП с КО стал непосредственный преобразователь частоты (НПЧ) с напряжением, формируемым из фрагментов синусоиды основной частоты [10].

Создаваемое первичной обмоткой вращающееся магнитное поле наводит во вторичной замкнутой КО переменную ЭДС, при этом сумма ее во всех секция КО равняется нулю, а знак ЭДС при переходе геометрической нейтрали (точки максимума ЭДС) обмотки меняется на противоположный. Коммутируя отводы КО, совпадающие с геометрической нейтралью КО, получаем выпрямленное пульсирующее напряжение, а введя коэффициент скольжения – понижение частоты выходного напряжения, представляя разновидность матричного НПЧ.

Подобное решение, несмотря на использование ТВП, сохраняет недостатки классических статических преобразователей – разрыв кривой тока и соответствующие ему коммутационные выбросы ЭДС, что ухудшает электромагнитную совместимость с другим оборудованием и снижает надежность самого преобразователя.

Рисунок 5. Графики напряжений матричного НПЧ с естественной коммутацией

В случае применения ТВП в предлагаемом матричном НПЧ с естественной коммутацией, свойство круговой обмотки с ее замкнутой кольцевой симметрией, позволяет

получить обратную функцию к любому фрагменту. Таким образом, становится возможно реализовать плавное регулирование частоты выходного напряжения в определенных пределах.

На рисунке 6 представлена принципиальная схема системы электродвижения с предлагаемым способом преобразования частоты. Здесь Г1, Г2 – генераторы, ТВП1, ТВП2 – трансформаторы с вращающимся полем с двумя вторичными круговыми обмотками, ПЧ1, ПЧ2 – каналы матричного преобразователя частоты, АД – шестифазный асинхронный электродвигатель.

Штатным режимом работы является питание от корабельных генераторов, работающих каждый на свой ГРЩ побортно. При этом возможно получение максимальных оборотов и полной мощности СЭД. Питание от генераторов поступает на первичные трехфазные обмотки трансформаторов с вращающимся полем. Каждый трансформатор имеет вторичные круговые обмотки с соотношением витков, равным натуральному числу. Выходы круговых обмоток подключены к преобразователю частоты, реализующему режим естественной коммутации; реверсивные мосты получают питание от пар круговых обмоток и соединяются последовательно. Три пары реверсивных мостов образуют трехфазный выход канала преобразования частоты, и подключаются к обмотке статора гребного двигателя. Два канала ПЧ обеспечивают шестифазный режим работы асинхронного двигателя.

В случае срабатывания аварийных защит и отключения одного генератора, система электродвижения переходит на работу с пониженными оборотами с одним каналом преобразователя частоты. Этот режим может приводить к некоторому ухудшению ВШХ, что, однако не существенно, поскольку штатным режимом работы ЭЭС является работа обоих генераторов на свой борт.

Рисунок 6. Блок-схема СЭД на базе матричного НПЧ

В системе электродвижения отсутствует звено постоянного тока, что делает невозможным работу от аккумуляторной батареи, что также не существенно из-за наличия резервных движительных комплексов на некоторых судах, либо механического привода линии вала.

Штатный режим работы от двух генераторов отличается случайными колебаниями частоты и фазового сдвига между генераторами, что дает непредсказуемые отклонения спектра виброакустических излучений системы электродвижения.

В завершение можно сделать следующие выводы:

1. Системы электродвижения являются основным потребителем электроэнергии корабельной ЭЭС, преимущественное распространение получили системы электродвижения переменного тока;
2. Использование классических НПЧ ограничено из-за ряда недостатков, в частности зависимости качества выходного напряжения от числа фаз на входе и наличие разрывов кривой выходного напряжения и тока;
3. Последние годы ознаменованы рядом работ по тематике трансформаторов с вращающимся полем, как средству улучшить параметры статических преобразователей и решить вопросы ЭМС;
4. Использование предлагаемой системы электродвижения с преобразователем частоты на базе ТВП с круговыми обмотками позволяет реализовать режим естественной коммутации клапанов, и таким образом улучшить качество выходного напряжения и токов преобразователя, избавиться от характерной частоты модуляции ШИМ на акустических характеристиках и улучшить электромагнитную совместимость с питающей сетью;
5. Предлагаемой система электродвижения предполагает резервирование с питанием двух каналов от независимых генераторов, что повышает безотказность работы СЭД при авариях в ЭЭС, а использование шестифазного асинхронного двигателя дополнительно улучшает акустические характеристики;
6. Использование матричного НПЧ с естественной коммутацией улучшает ЭМС и уровень радиопомех, что повышает совместимость с корабельным электрооборудованием;
7. Питание двух каналов матричного НПЧ от независимых генераторов позволяет избавиться от повторяемости характеристики ВШХ, и делает спектр непредсказуемым, что улучшает эксплуатационные характеристики системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черевко А.И., Дмитриев Б.Ф., Рябенский В.М., Музыка М.М., Солуянов П.В. Судовые полупроводниковые преобразователи: учебник. СПб: СПбГМТУ, 2011. – 526 с.
2. Зиновьев Г.С. Силовая электроника. М.: Издательство Юрайт, 2012. – 667 с.
3. Дядик А.Н., Никифоров Б.В. Корабельные энергетические системы. – Новочеркасск: ЛИК, 2012. – 680 с.
4. Гайтов Б.Х., Прасько Д.Г., Гайтова Т.Б. Разработка многофазных трансформаторов. Электротехника, 2000, №8, с.42.
5. Гайтов Б.Х., Гайтова Т.Б., Кашин Я.М. Перспективные конструкции аксиальных многофазных трансформаторов и регуляторов с вращающимся магнитным полем. Электромеханика, 2005, №3, с.44.
6. Забудский Е.И. Совмещенные регулируемые реакторы: монография М.: ФГОУ ВПО МГАУ, Энергоатомиздат, 2003, 436 с.
7. Алмазов В.В., Кирьян Л.Н., Мушлян А.А. Преобразователи частоты автономных систем электроснабжения. Ползуновский вестник, 2011, №2, с.35.
8. Грачев П.Ю. Математические модели электромеханических и электромагнитных преобразователей для автономных энергетических установок. Электротехника, 2010, №3, с.35.
9. Калмыков А.И., Кузнецов В.И., Сеньков А.И., Токарев Л.Н. Судовые бестрансформаторные гребные электрические установки. Морской вестник, 2013, №1 (45), с.40.
10. Атрашкевич П.В., Балашевич В.М., Коптяев Е.Н. Непосредственный понижающий преобразователь частоты на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем. Интернет-журнал Наукovedение, 2014, №6.
11. Ситников В.Ф. Силовая электроника в системах электроснабжения переменного тока. Электричество, 2008, №2, с.39.
12. Грачев П.Ю., Костырев М.Л., Мягков Ф.Н., Кунцевич П.А. Многообмоточные преобразователи энергии для автономных объектов. Электротехника, 2005, №12, с.24.

Рецензент: Каплин В.Н., зам. главного конструктора по спецтехнике НИИ Энергетики ЮРГПУ (НПИ).

Koptjaev Evgenij Nikolaevich

JSC "Northern Industrial Association" Arctic"
Russian Federation, Severodvinsk
E-mail: evgkop79@mail.ru

Evseev Roman Igorevich

Research Institute of Shipbuilding and Navy
Russian Federation, St. Petersburg
E-mail: niikv44k@mail.ru

Balashevich Vyacheslav Mikhailovich

Energy Research Institute YURGPU
Russian Federation, Novocherkassk
E-mail: bmashka@gmail.com

Electric Propulsion system on the basis of the matrix direct frequency converter

Abstract. Many of today's ships are equipped with electric propulsion systems, which leads to the relevance of the article. The general trend is the use of electric propulsion systems AC, due to a more robust design of an asynchronous motor and slightly better weight and dimensions. The use of asynchronous motor requires a static frequency converter for speed control and soft start. In the currently used PWM converters different types. Opportunities classical direct frequency converters are limited due to a number of fundamental shortcomings, particularly the lack of quality of the output voltage and the presence of the gap current during switching. Offered in Article electric propulsion system with direct frequency converter allows for a natural mode switching valves, as well as significantly improve the harmonic composition of output voltage and current of the inverter. The absence of a carrier frequency pulse-width modulation improves acoustics and electromagnetic compatibility with the ship's equipment. Mode powered by two independent generators improves vibro-acoustic characteristics.

Keywords: electric propulsion; inverter; three-phase transformer with a rotating field; direct frequency converter; electromagnetic compatibility; the circular coil; switching; igbt-module vibroacoustics; induction motor.

REFERENCES

1. Cherevko A.I., Dmitriev B.F., Ryaben'kiy V.M., Muzyka M.M., Soluyanov P.V. Sudovye poluprovodnikovye preobrazovateli: uchebnik. SPb: SPbGMTU, 2011. – 526 s.
2. Zinov'ev G.S. Silovaya elektronika. M.: Izdatel'stvo Yurayt, 2012. – 667 s.
3. Dyadik A.N., Nikiforov B.V. Korabel'nye energeticheskie sistemy. – Novocherkassk: LIK, 2012. – 680 s.
4. Gaytov B.Kh., Pras'ko D.G., Gaytova T.B. Razrabotka mnogofaznykh transformatorov. Elektrotehnika, 2000, №8, s.42.
5. Gaytov B.Kh., Gaytova T.B., Kashin Ya.M. Perspektivnye konstruksii aksial'nykh mnogofaznykh transformatorov i regulyatorov s vrashchayushchimsya magnitnym polem. Elektromekhanika, 2005, №3, s.44.
6. Zabudskiy E.I. Sovmeshchennye reguliruemye reaktory: monografiya M.: FGOU VPO MGAU, Energoatomizdat, 2003, 436 s.
7. Almazov V.V., Kir'yan L.N., Mushlyan A.A. Preobrazovateli chastoty avtonomnykh sistem elektrosnabzheniya. Polzunovskiy vestnik, 2011, №2, s.35.
8. Grachev P.Yu. Matematicheskie modeli elektromekhanicheskikh i elektromagnitnykh preobrazovateley dlya avtonomnykh energeticheskikh ustanovok. Elektrotehnika, 2010, №3, s.35.
9. Kalmykov A.I., Kuznetsov V.I., Sen'kov A.I., Tokarev L.N. Sudovye bestransformatornye grebnye elektricheskie ustanovki. Morskoy vestnik, 2013, №1 (45), s.40.
10. Atrashkevich P.V., Balashevich V.M., Koptyaev E.N. Neposredstvennyy ponizhayushchiy preobrazovatel' chastoty na baze transformatora s vrashchayushchimsya magnitnym polem. Internet-zhurnal Naukovedenie, 2014, №6.
11. Sitnikov V.F. Silovaya elektronika v sistemakh elektrosnabzheniya peremennogo toka. Elektrichestvo, 2008, №2, s.39.
12. Grachev P.Yu., Kostyrev M.L., Myagkov F.N., Kuntsevich P.A. Mnogoobmotochnye preobrazovateli energii dlya avtonomnykh ob"ektov. Elektrotehnika, 2005, №12, s.24.