

Преобразователь частоты для гребного электродвигателя

Мустафа Г. М., Волков С. В., Ершов А. А., Сеннов Ю. М., Минаев Г. М.

Представлены описание и основные показатели преобразователя частоты (ПЧ) для питания гребного двухобмоточного асинхронного электродвигателя на базе трехуровневого инвертора с выходным фильтром, обеспечивающим синусоидальность напряжения на статоре. Рассмотрены строение силовой части и основные принципы векторного управления по подстраиваемой модели с многоконтурным регулированием и обеспечением синхронной работы двух каналов ПЧ на две обмотки статора, сдвинутые друг относительно друга на 30 эл. градусов. Приведены результаты испытаний опытного образца.

Ключевые слова:

Преобразователь частоты, гребной электропривод, судовой электропривод, векторное управление, двухобмоточный асинхронный электродвигатель, совместная работа преобразователей, параллельная работа преобразователей.

Frequency converter for ship main propulsion motor

Mustafa G.M., Volkov S.V., Ershov A.A., Sennov Y.M., Minaev G.M.

Presented description and main technical features of a frequency converter for power supplying of two-winding asynchronous motor based on two-channel three level static converter with the output filtering to provide sinusoidal voltage on stator. Here reviewed converter power stage and main principles for vector control based on self-adjusted model with multiple-loop regulation. Power supplying of electric motor separate windings that shifted on 30 electric degrees are provided by synchronous joint operation of two converter channels. The tests of a prototype results are presented.

Key words:

Frequency converter, electric drive for ship propulsion, marine electric drive, vector control, two-winding asynchronous motor, joint operation of converters, parallel operation of converters.

Введение. Регулируемые электроприводы движения все шире применяются в судостроении. Их распространение стимулируется с одной стороны – эксплуатационными преимуществами и гибкостью, которые дает регулируемый электропривод, и с другой стороны – усовершенствованиями и удешевлением оборудования регулируемых электроприводов, обеспечиваемых современными средствами и принципами преобразования и регулирования электрической энергии [1]. Одним из наиболее перспективных типов регулируемых электроприводов является электропривод с короткозамкнутым асинхронным двигателем, питаемым от транзисторного конвертора напряжения (voltage sourced converter, VSC), который регулируется по принципу широтно-импульсной модуляции (pulse-width modulation, PWM). По заданию Центрального научно-исследовательского института судовой электротехники и технологии («ЦНИИ СЭТ») консорциум трех предприятий (ОАО «Электровыпрямитель», г. Саранск; ООО «Электротяжмаш-Привод», г. Лысьва; ООО «НПП ЛМ Инвертор», г. Москва) разработал и подготовил производство оборудования такого электропривода, составленного из гребного электродвигателя с номинальной мощностью на валу 3500 кВт и преобразователей частоты, питающих и регулирующих электродвигатель.

Электроприводы с PWM-конвертором и асинхронным двигателем широко применяются. В рассматриваемом классе мощностей чаще всего применяется схема трехуровневого конвертора, каждая фаза которого содержит квадригу мощных транзисторов с изолированным затвором (isolated gate bipolar transistor, IGBT). Именно эта схема взята в качестве базовой и в рассматриваемом проекте. В настоящей статье описывается спроектированный и изготовленный преобразователь частоты электропривода гребного винта. Имея общую базу с многочисленными аналогичными электроприводами, он имеет особенности, связанные отчасти со спецификой применения, а отчасти – с выбором между равнозначными альтернативами.

Номинальные параметры. Гребной электродвигатель имеет следующие основные параметры:

- номинальная мощность на валу: 3500 кВт;
- число обмоток статора, сдвинутых на 30° 2;
- номинальное линейное напряжение на статоре: 1800 В;
- номинальный ток каждой из двух обмоток статора: 680 А;
- номинальная частота тока: 50 Гц;
- номинальная частота вращения ротора: 746,5 об/мин;
- коэффициент мощности: 0,85;
- коэффициент полезного действия (к.п.д.): 97 %;
- число фаз: 2×3;
- номинальное скольжение: 0,534 %.

Для данного двигателя являются характерными следующие особенности:

- двигатель является двухобмоточным, со сдвинутыми на 30° обмотками;
- двигатель является сравнительно низкооборотным и соответственно – низко-косинусным ($\cos\varphi_N \approx 0,85$).

Предусматривается возможность ограниченной по времени полуторакратной перегрузки по току каждой из обмоток.

Суммарная установленная номинальная мощность преобразователя частоты составляет

$$S_{\text{конв}} = \frac{3500}{0,97 \cdot 0,85} = 4245 \text{ кВА}$$

Структурная схема и конструктивное исполнение. Согласно правилам устройства электрического оборудования морских судов Российского морского регистра судоходства, гребной электрический двигатель имеет две системы статорных обмоток, получающих питание каждая от своего полупроводникового

преобразователя частоты, и каждая из которых может независимо отключаться от соответствующего ПЧ. При этом каждый из двух ПЧ должен быть рассчитан, по крайней мере, на 50 % номинальной мощности гребной электрической установки.

Соответственно этому требованию преобразователь частоты ВПЧ-4000 состоит из двух каналов, выполняющих функции полноценных преобразователей частоты, подключенных каждый к своей системе статорных обмоток. В обычном режиме оба канала работают совместно, но в случае необходимости любой из каналов может быть отключен и второй продолжит работу автономно.

Укрупненная структурная схема силовой части ВПЧ-4000 представлена на рис. 1.

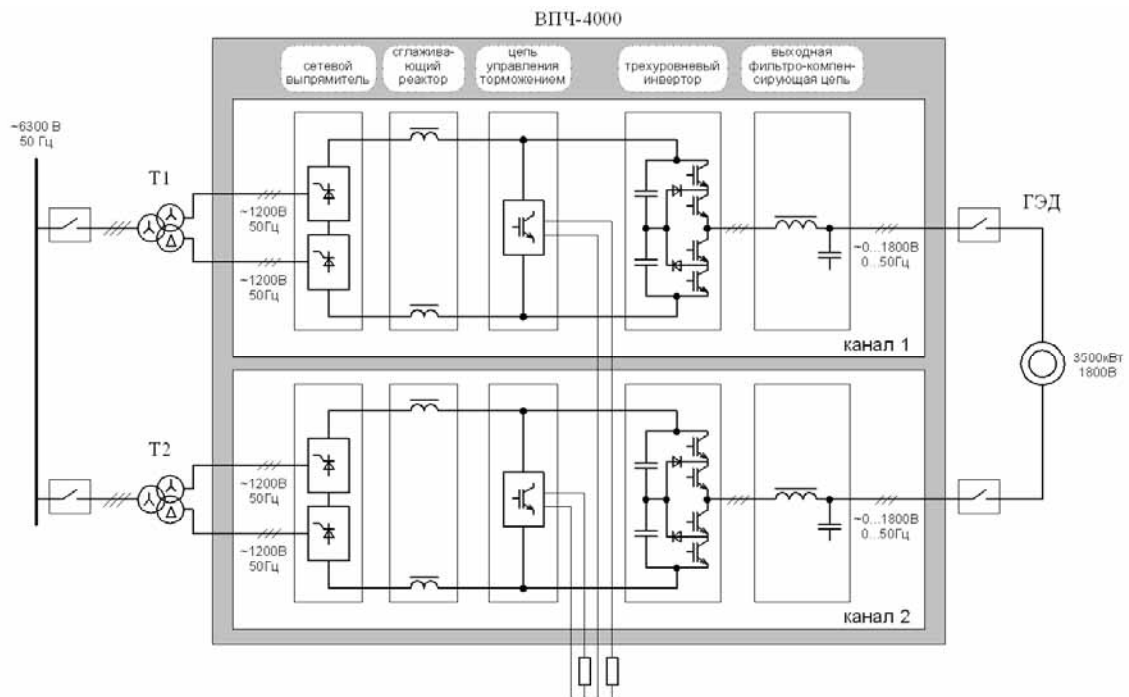


Рисунок 1 – Структурная схема силовой части двухканального преобразователя частоты для питания гребного электродвигателя

Конструктивно каждый из двух каналов ВПЧ-4000 выполнен в виде двух силовых шкафов: шкафа преобразовательного и шкафа выходного фильтра (рис. 2).



Рисунок 2 – Внешний вид и габаритные размеры силовых шкафов одного из двух каналов ВПЧ-4000

В шкаф преобразовательный входят блок сетевого выпрямителя, сглаживающий реактор, инвертор, блоки управления и питания собственных нужд, блок управления торможением. В шкафу выходного фильтра размещены реакторы и конденсаторы выходного фильтра.

Двухканальность и резервирование. Два альтернативных варианта построения системы управления (СУ) двухканального преобразователя:

1. две СУ с перекрёстной пересылкой импульсов управления IGBT и блокированием импульсов одной из систем. При возникновении неисправности в одной СУ, ее импульсы управления отключаются, а с импульсов второй СУ блокировка снимается и ПЧ продолжает работу.

2. две индивидуальные СУ на каждом канале ПЧ, работающие в штатном режиме, с перекрестной пересылкой минимального набора интегральных сигналов, позволяющих обеспечить симметричную загрузку силовых каналов.

В первом варианте присутствует большое число связей и требуется дополнительное устройство выбора и блокировки одной из СУ, а также обеспечение индивидуальной защиты. К реализации принят второй вариант, в котором каждая СУ является полностью самостоятельной: пересылки между каналами действуют только как поправки. Список пересылаемых величин является коротким и включает в себя:

- токи обмоток статора;
- фаза задающих генераторов;
- логические сигналы управления (включить/выключить, готовность/неисправность и т.п.).

По пересылаемым сигналам вырабатываются поправки к заданиям обоих каналов ПЧ и обеспечивается их симметричная совместная работа. На рис. 3 приведена схема замещения двухобмоточного двигателя. Цепь статора отображается трехобмоточным трансформатором $Y, \Delta / Y$ с реактансами X_{ss} и X_{so} для первичной и вторичной стороны соответственно. Цепь ротора общая с реактансом X_r . Взаимодействие каналов определяется звездой реактансов X_{ss} , X_{ss} ; X_{so} . Для работы на такой двигатель напряжения обоих каналов, во-первых должны быть синхронны и синфазны, а во-вторых – одинаковы по уровню. Первое условие обеспечивается подстройкой разности фаз. Равенство уровня напряжений каналов подстраивается по разностному току обмоток статора.

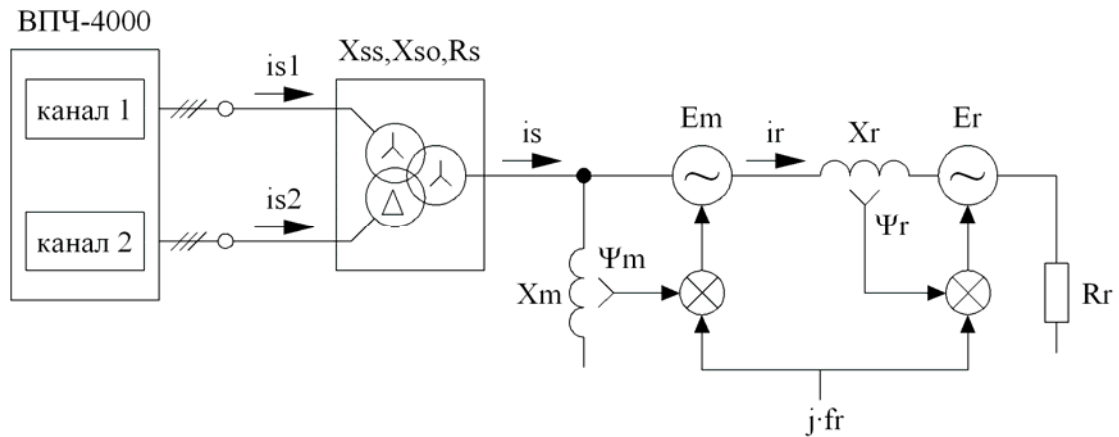
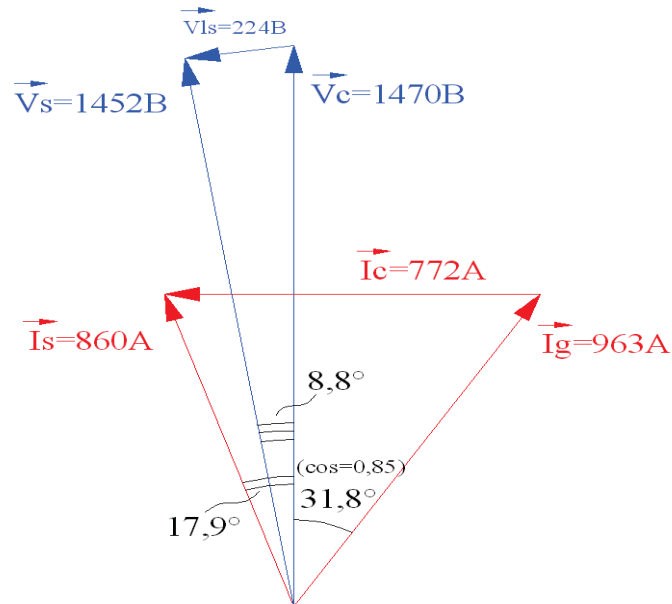
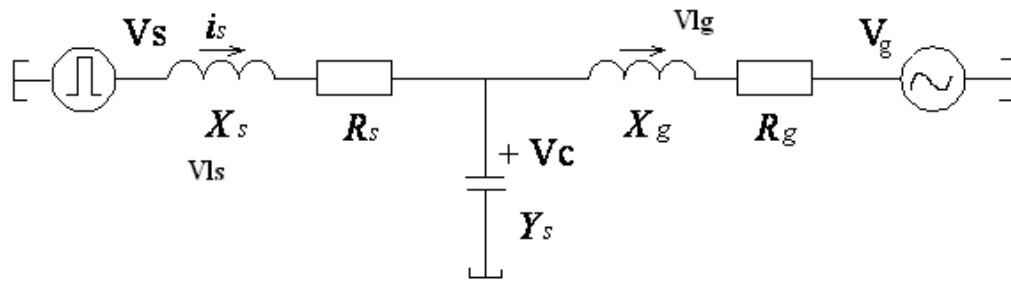


Рисунок 3 – Схема замещения двухобмоточного двигателя, подключенного к ПЧ

Электромагнитная совместимость. Ограниченное пространство в судах ужесточает требования по электромагнитной совместимости. Распространение крутых фронтов PWM-переключений по кабелям недопустимо. В проекте ВПЧ-4000 использован принцип сильной фильтрации PWM [2], при котором реактивная мощность конденсаторов выбирается равной реактивной мощности двигателя и дросселя фильтра. Дроссели выходного фильтра с магнитопроводом из электротехнической стали не излучают магнитного поля в окружающее пространство. Размер дросселя определяется в этом случае не накопленной энергией дросселя $L \cdot I_{\text{нас}}^2 / 2$, а потерями в стали от PWM-пульсаций. Поэтому индуктивность может быть выбрана достаточно большой без увеличения размеров и массы дросселя. Практически значения емкости и индуктивности фильтра выбираются так, чтобы в номинальном режиме обеспечивался некоторый подъем ВАХ фильтра. Векторная диаграмма для номинального режима работы одного канала ВПЧ-4000 приведена на рис. 4. На диаграмме приведены амплитудные значения токов и напряжений при работе на двигатель с номинальной нагрузкой при частоте 50 Гц.



V_s – выходное напряжение инвертора; V_c – напряжение на емкости выходного фильтра; I_g – ток статора; V_g – э.д.с. вращения двигателя; I_c – ток емкости выходного фильтра; I_s – ток дросселя фильтра; V_{ls} – напряжение дросселя фильтра; V_{lg} – напряжение обмотки статора

Рисунок 4 – Упрощенная схема замещения инвертора, выходного фильтра и двигателя. Векторная диаграмма для номинального режима работы одного канала ВПЧ-4000

Преимущества сильной фильтрации на выходе преобразователя частоты заключаются в следующем:

- обеспечивается синусоидальное напряжение на двигателе: искажения выходного напряжения, связанные с ШИМ-переключениями, составляют доли процента от номинального значения, кабели от ПЧ к двигателю не излучают высокочастотных (ВЧ) помех, что снимает ограничения на их протяженность и способ прокладки;

– улучшаются условия работы двигателя при отсутствии ВЧ-гармоник в питающем напряжении: устраняются негативные явления, вызываемые емкостными токами через кабели и подшипники двигателя, а также дополнительные потери от пульсаций напряжения в статоре, снижаются требования к изоляции статора;

– за счет компенсации реактивного тока двигателя ток IGBT-конвертора ПЧ в номинальном режиме понижен на 12 %, что позволяет улучшить его к.п.д.

Затраты на осуществление сильной фильтрации не намного выше, чем при фильтрации слабой – в стоимости сказываются слабо (благодаря невысокой стоимости конденсаторов). В размерах ПЧ доля сильного выходного фильтра остается приемлемой. С другой стороны, наличие мощного LC-фильтра на выходе ПЧ, совместно с реактансом статора двигателя представляющего собой высокочастотное резонансное звено, вносит определенное усложнение в систему управления – возникает необходимость внесения дополнительных контуров регулирования с малыми постоянными времени. Однако современная процессорная техника позволяет это реализовать.

По входу ВПЧ-4000 питается от двух трехобмоточных трансформаторов (Y/Y-0/Δ-11), по одному на каждый канал. Основная функция трансформатора – согласование уровня напряжения сети (6 кВ) и двигателя (1,8 кВ). Применение трехобмоточного трансформатора обусловлено необходимостью улучшения показателей влияния на питающую сеть. Соответственно на входе ПЧ последовательно включено два выпрямительных блока, питающихся от двух систем трехфазного напряжения, сдвинутых на 30°, которые образуют 12-пульсную схему выпрямления. Выпрямитель в ВПЧ-4000 может быть как управляемым (тиристорным), так и неуправляемым (диодным). В последнем случае упрощается система управления и повышается надежность, но при этом теряется возможность электронного отключения питания (запиранием тиристоров) в аварийных режимах и требуется

установка вспомогательных цепей предварительного заряда конденсаторов звена постоянного тока. Для фильтрации тока и частичной компенсации реактивной мощности, потребляемой преобразователем из питающей сети, на входе ПЧ может оказаться нужной установка активного фильтро-компенсирующего устройства. Активное ФКУ на базе относительно простых транзисторных блоков и сравнительно недорогой конденсаторной батареи позволяет значительно снизить потребление реактивного тока и обеспечить хороший гармонический состав потребляемого тока (коэффициент искажений менее 5%). Применение пассивных фильтро-компенсирующих цепей в условиях питания от сети соизмеримой мощности, характерной для судового привода, является нерациональным, т.к. по сравнению с активным фильтром получается или слишком сложным и громоздким, или не обеспечивающим требуемых параметров фильтрации.

Торможение. В звене постоянного тока ВПЧ-4000 включена цепь управления торможением. Она представляет собой блок IGBT-ключей, через которые параллельно конденсаторной батарее фильтра U_d подключаются внешние тормозные резисторы. Режим торможения с задействованием тормозных резисторов активизируется кратковременно (рис. 5), а именно – на интервале торможения двигателя (на рис. 5 – интервалы 3-4 и 7-8). Энергия, рассеиваемая резисторами, зависит от заданного темпа торможения. Например, при смене направления вращения (реверс двигателя), после снижения скорости до нуля ПЧ начинает разгон двигателя в обратном направлении, при этом тормозные резисторы больше не работают (на рис. 5 на интервале 6-7 судно продолжает двигаться в прежнем направлении, а двигатель вращается в обратном).

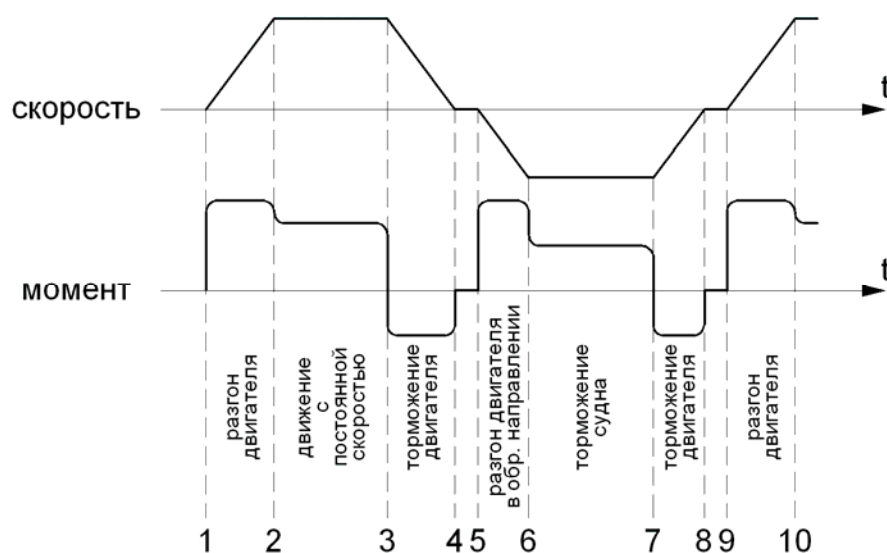


Рисунок 5 – Упрощенная диаграмма режимов работы ПЧ при движении судна

Необходимость применения тормозных резисторов обусловлена тем, что при торможении двигатель вначале может переходить в генераторный режим. При этом через обратные диоды инвертора происходит накачка конденсаторов звена постоянного тока, сопровождающаяся ростом напряжения U_d . В ВПЧ-4000 для сброса энергии торможения предусмотрена цепь управления торможением, реализованного в функции повышения U_d : при превышении U_d до определенного уровня активизируется ШИМ-управление транзисторами блока торможения, удерживающее U_d на постоянном уровне.

Система управления. Для выполнения требования резервирования управления в ВПЧ-4000 предусмотрено несколько иерархических уровней управления электроприводом (рис. 6):

- управление от судовой системы управления через интерфейс локальной сети Ethernet или по последовательному интерфейсу RS-485, а также по релейным каналам связи;
- управление от поста дистанционного управления с обменом релейными сигналами;
- управление с местной панели любого из каналов ПЧ.

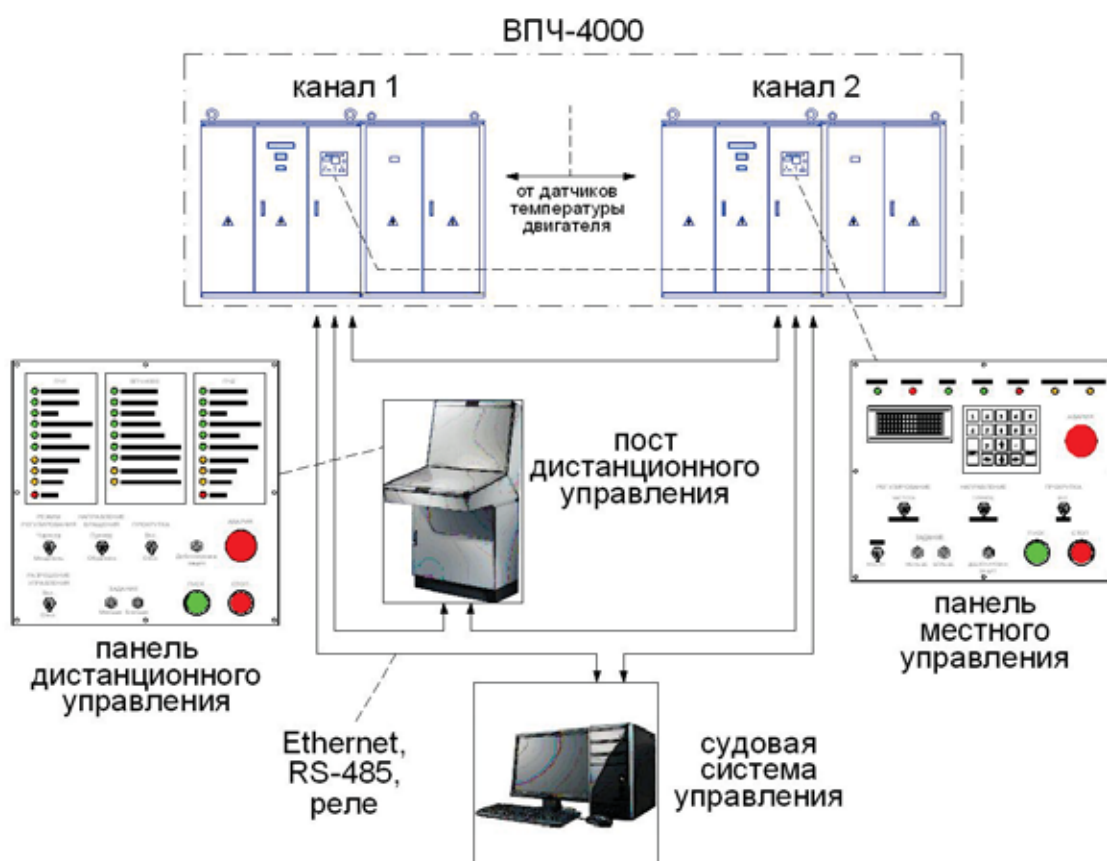


Рисунок 6 – Структура управления электроприводом с ВПЧ-4000

Для совместной синхронной работы двух каналов ВПЧ-4000 на двигатель с двумя статорными обмотками между их блоками управления организована быстродействующая оптоволоконная связь. При этом для однозначности определения источника управления любой из каналов ВПЧ-4000 может быть выбран ведущим, а

второй – ведомым. По оптоволоконной связи между каналами осуществляется передача дискретных команд управления от ведущего к ведомому, передача сигналов подтверждения от ведомого к ведущему, а также двухсторонняя пересылка сигналов для синхронизации и регулирования симметричной работы обоих каналов. Информационный обмен осуществляется с частотой тактирования вычислений в сигнальных процессорах блоков управления, что позволяет свести к минимуму погрешность из-за задержки передачи данных.

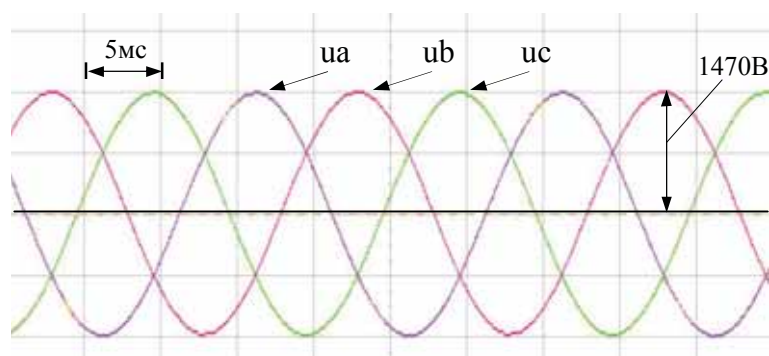
В ВПЧ-4000 реализовано векторное управление электроприводом по подстраиваемой модели. Для корректной работы системы регулирования требуется задание основных параметров встроенной модели (реактансы схемы замещения). Однако определять их с высокой точностью нет необходимости – достаточно приближенных значений. При необходимости параметры подстраиваемой модели конкретного электропривода уточняются в ходе первичной пуско-наладки.

Все датчики, необходимые для функционирования электропривода, входят в состав системы управления ВПЧ-4000 и размещаются в его силовых шкафах. Датчики токов и напряжений, предусмотренные в ВПЧ-4000, выполнены с оптической развязкой измеряемых сигналов. В непосредственной близости к датчику (делитель напряжения, трансформатор тока и т.п.) устанавливается плата оцифровки и оптической передачи измеренных сигналов в систему управления. Таким образом, достигается полная гальваническая развязка цепей блока управления от силовой части, что способствует высокой степени помехозащищенности.

Алгоритмы управления преобразователя предусматривают работу без датчика скорости. В случае необходимости работы на сверхнизких скоростях вращения с обеспечением точности поддержания оборотов, в системе управления предусмотрен вход для подключения внешнего датчика скорости.

Результаты испытаний опытного образца. В ходе разработки и проектирования силовой части и системы управления ВПЧ-4000 для всей системы управления электроприводом выполнялось математическое моделирование в системе Элтран [3] с высокой степенью детализации элементов. Для первичной наладки системы регулирования отдельного канала ПЧ использовался маломощный стенд с серийным трехфазным двигателем. Проверка силовой части ВПЧ-4000 проводилась в ходе пуско-наладочных испытаний на заводе-изготовителе ПЧ (ОАО «Электровыпрямитель», г. Саранск). Наладка работы электропривода в составе двух каналов ПЧ и электродвигателя с двумя обмотками статора выполнялась на стенде завода-изготовителя двигателя (ООО «Электротяжмаш-Привод», г. Лысьва). Результаты проверки статических и динамических показателей ВПЧ-4000 иллюстрируются приведенными ниже осциллограммами.

На рис. 7 приведены осциллограммы выходного напряжения ВПЧ-4000 при работе на холостом ходу (без подключения к двигателю). Пульсации ШИМ в выходных напряжениях практически полностью отсутствуют.

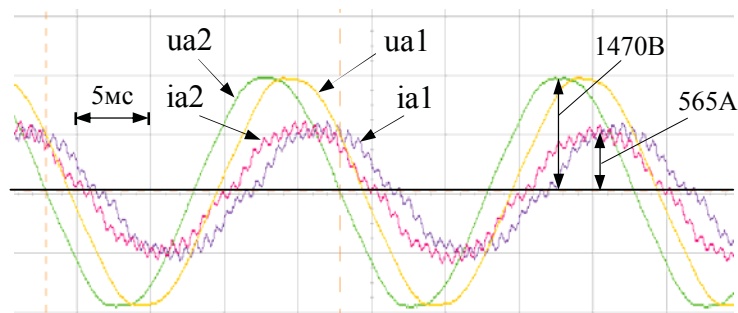


ua – напряжение фазы A, ub – напряжение фазы B, uc – напряжение фазы C

Рисунок 7 – Выходные напряжения ПЧ при работе на холостом ходу
(без подключения двигателя) синусоидальны

При работе на асинхронный двигатель ДАРГ-3500-8-ОМ4 (рис. 8) проявилось влияние зубцовой гармоники ($n = 29$) двигателя. Двигатель является сравнительно низкооборотным, имея четыре пары полюсов, что уже дает малую величину сектора

на полюс и фазу. Использование пары сдвинутых на 30° обмоток еще более ограничивает возможности размещения обмоток. В этих условиях появление заметных зубцовых гармоник является ожидаемым. PWM-конвертор с сильным фильтром удерживает уровень напряжения 29-ой гармоники на допустимом уровне. В форме тока статора 29-ая гармоника остается заметной, но на характеристики электропривода она практически не влияет.



ua1 – напряжение фазы А канала № 1

ua2 – напряжение фазы А канала № 2

ia1 – ток фазы А канала № 1

ia2 – ток фазы А канала № 2

Рисунок 8 – Выходные напряжения ПЧ при работе на двигатель с нагрузкой 2 МВт на частоте 50 Гц:

напряжения и токи двух каналов сдвинуты относительно друг друга на 30° ; напряжения синусоидальны, в токах зубцовая гармоника ($n = 29$) двигателя

Следует отметить, что при использовании преобразователей частоты на базе транзисторных PWM-конверторов фазовый сдвиг между напряжениями двухобмоточного двигателя является безразличным. Режимы PWM-конверторов и характеристики электропривода от этого сдвига не зависят. Влияние его исчерпывается введением соответствующей установки в систему синхронизации конверторов.

Введение фазового сдвига 30° между двумя обмотками статора было полезным при использовании в электроприводе тиристорных конверторов тока, осуществляющих двукратную коммутацию за период на каждую фазу. Сложение сдвинутых на 30° трапеций даёт улучшенную форму тока ротора и вместе с этим –

уменьшение потерь мощности в роторе и снижение пульсаций момента. При использовании транзисторных PWM-конверторов напряжения, упомянутый фазовый сдвиг позитивного эффекта не даёт. Пара резервирующих друг друга PWM-конверторов вполне может работать на пару синфазных обмоток статора и даже на одну общую обмотку статора, обеспечивая при этом те же характеристики электропривода и тот же уровень надёжности, как и в системе с фазовым сдвигом обмоток.

На рис. 9 демонстрируется работа регулятора выравнивания мощности между каналами ВПЧ-4000 в динамических и статических режимах работы.

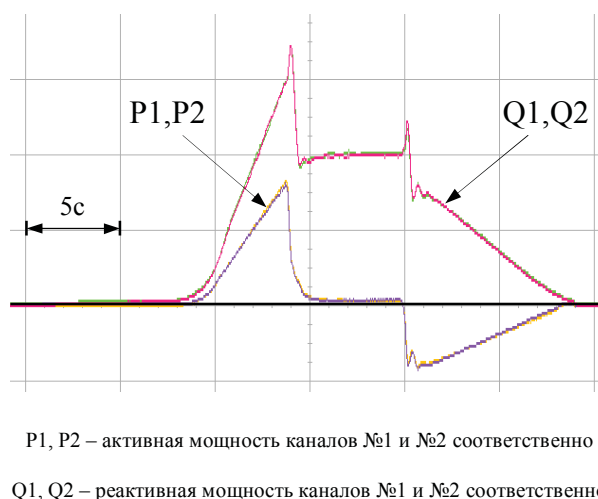


Рисунок 9 – Распределение активной и реактивной мощностей между двумя каналами ВПЧ-4000 при разгоне с темпом 10 Гц/с, работе на частоте 50 Гц и торможении с темпом 7 Гц/с.

Активная и реактивная мощности обоих каналов практически совпадают.

При внезапном отключении одного из каналов, второй остается в работе с ограничением выходной мощности ВПЧ-4000, позволяя продолжить движение судна (рис. 10). Отключившийся канал ПЧ (импульсы управления транзисторами отключены) автоматически отсоединяется от двигателя размыканием контактора, для предотвращения влияния на дальнейшую работу электропривода. После отключения одного канала вся нагрузка ложится на оставшийся в работе второй канал. При выходной мощности ПЧ больше половины от номинальной, после отключения одного

канала происходит наброс нагрузки на второй канал до номинального для него значения, в результате выходная мощность ПЧ снижается с уменьшением скорости вращения двигателя.

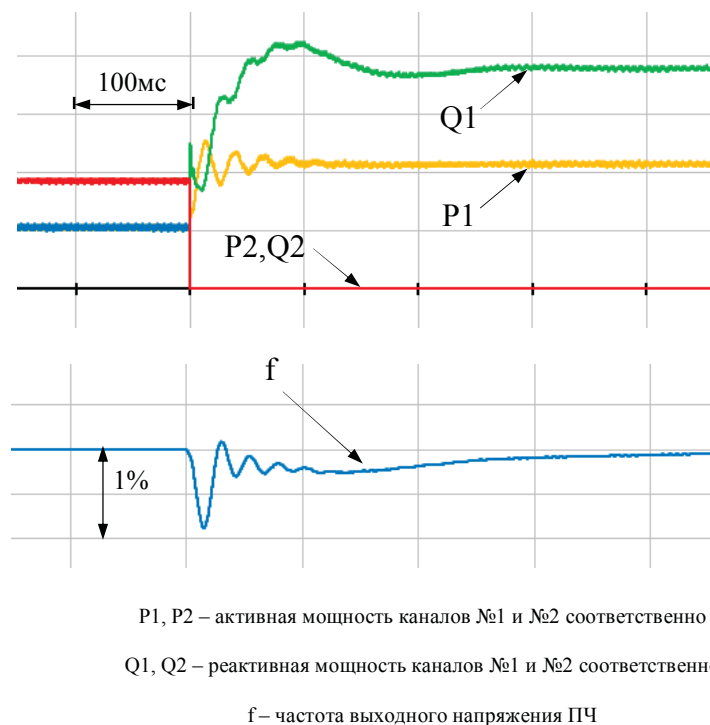
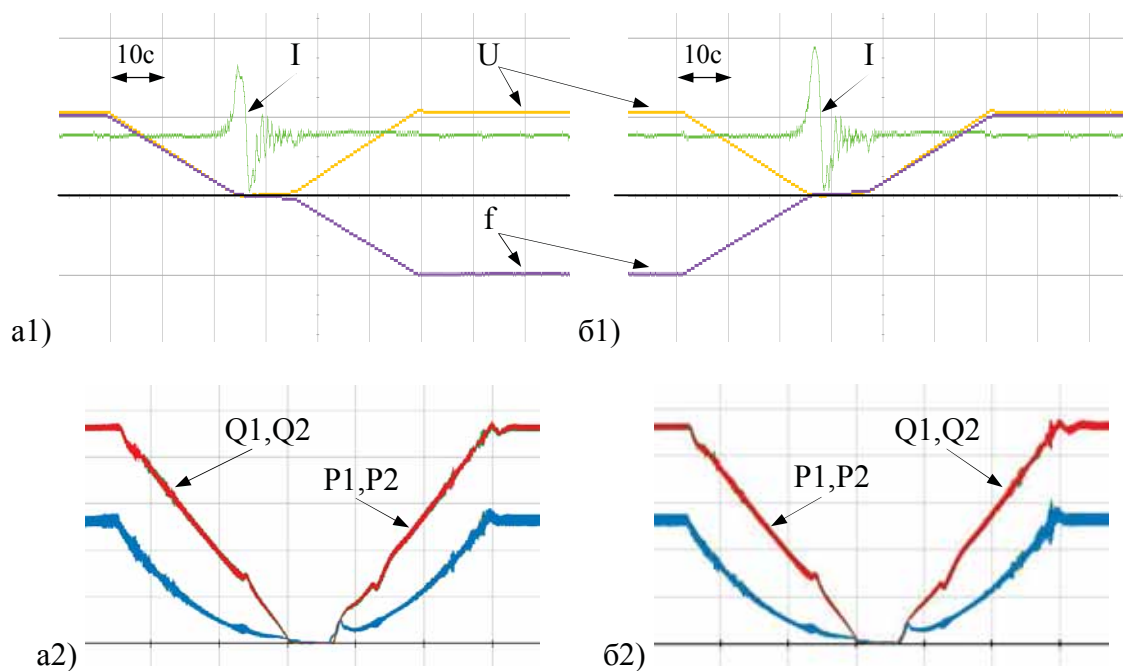


Рисунок 10 – Отключение канала №2 ВПЧ-4000 с набросом нагрузки на оставшийся в работе канал №1. Перед отключением привод работал с выходной мощностью меньше половины от номинальной, после отключения канала №2 нагрузка канала №1 (P1, Q1) увеличилась вдвое.

На рис. 11 приведены осциллограммы смены направления вращения (реверса) электродвигателя. При этом скорость вращения с заданным темпом снижается до нулевого значения (при необходимости задействуется блок резистивного торможения), а затем в автоматическом режиме двигатель разгоняется в обратном направлении. В области перехода к нулевой частоте (а следовательно и к нулевому напряжению на статоре) в системе регулирования возникает неопределенность, проявляющаяся в переходном процессе тока нагрузки. Амплитуда тока этого переходного процесса не превышает номинальных значений для двигателя.



U – модуль выходного напряжения ПЧ

I – модуль выходного тока ПЧ

P1, P2 – активная мощность каналов №1 и №2 соответственно

Q1, Q2 – реактивная мощность каналов №1 и №2 соответственно

f – частота выходного напряжения ПЧ.

Рисунок 11 – Изменение направления вращения двигателя
с прямого на обратное (a1, a2) и с обратного на прямое (б1, б2)

Список литературы

1. Sudhoff S. D. Currents of change. «Power Energy» 07/08.2011, стр. 30-37.
2. Чибиркин В. В., Шестоперов Г. Г., Минаев Г. М., Артаев Н. А., Мустафа Г. М., Сеннов Ю. М., Демчук С. П. Преобразователи частоты производства ОАО «Электровыпрямитель» для высоковольтного асинхронного электропривода переменного тока // «Силовая электроника» №1, 2005, стр. 58-60.
3. Мустафа Г. М., Шаранов И. М. Математическое моделирование тиристорных преобразователей // «Электричество» №1, 1978, стр. 40-45.