

Ю.М. Сенов, руководитель направления средневольтных электроприводов, ООО «НПП ЛМ Инвертор»,
Г.М. Минаев, главный конструктор, ОАО «Электровыпрямитель»,
А.В. Тарасов, руководитель отдела энергосберегающего оборудования, ЗАО «ТехноСтайл»,
В.А. Кулабухов, к. т. н., доцент, зам. генерального директора по науке, зав. отделом помола и обжига, ОАО «НИИЦемент», Россия

Преобразователи частоты ВПЧС для синхронного электропривода с тяжелыми условиями пуска

РЕФЕРАТ. В результате исследования процесса запуска мощных цементных мельниц на ряде предприятий цементной промышленности выявлено крайне негативное влияние пускового тока на ресурс двигателя, обусловленное тяжелыми режимами работы, и на износ привода мельницы. ЗАО «ТехноСтайл» (Россия) предложило устанавливать устройство плавного пуска ВПЧС-2000, которое применяется для пуска как одной мельницы, так и группы мельниц с двигателями класса напряжения 6, 10 кВ на базе высоковольтных устройств плавного пуска (УПП) и преобразователей частоты (ПЧ).

В середине 2007 года на ОАО «Ульяновскцемент» осуществлена поставка и ввод в эксплуатацию первой подобной системы плавного пуска (ВПЧС-2000 для пуска семи мельниц). В мае 2008 года ВПЧС установлен на ЗАО «Пикалевский цемент» для поочередного безударного пуска шести синхронных электродвигателей СДМ 20-49-60 привода шаровых мельниц. До сегодняшнего времени эти системы успешно эксплуатируются.

ЗАО «ТехноСтайл» получило положительные отзывы предприятий цементной промышленности о работе системы.

Общие сведения

ВПЧС – ряд средневольтных (6, 10 кВ) преобразователей частоты для работы с синхронными двигателями. Способность синхронной машины генерировать реактивную мощность дает возможность использовать экономичную структуру тиристорного преобразователя тока для синхронных электроприводов. Помимо того, что она экономична, структура эта еще и полнофункциональна; она позволяет не только ускорять или поддерживать движение, но и тормозить его. Преобразователи другого типа, с широтно-модулированными инверторами напряжения, выполненные на мощных транзисторах IGBT в классе средних напряжений, получают

гораздо более дорогими. Они удорожаются дополнительно, когда, кроме ускорения, требуется обеспечить также и торможение. ВПЧС имеют экономичную структуру двухмостового тиристорного преобразователя тока. Отличия от более ранних преобразователей этого типа:

- более широкомасштабное использование алгоритмических возможностей современной микропроцессорной техники для облегчения силового оборудования и улучшения эксплуатационных характеристик;
- ограниченное – в масштабах, не вредящих экономичности – применение мощных транзисторов с изолированным затвором

IGBT для улучшения эксплуатационных характеристик.

Основные параметры ряда ВПЧС:

- напряжения 6 и 10 кВ;
- номинальные частоты 50 и 60 Гц;
- мощности 630, 800, 1600, 2000, 3150 кВт.

Преобразователи ряда строятся по унифицированной структуре, с унифицированным конструктивным исполнением и унифицированной системой управления.

Структура силовой схемы

Функциональная схема преобразователей ВПЧС показана на рис. 1. Основные силовые блоки преобразователя – это тиристорный сетевой выпрямитель, сглаживающий реактор звена постоянного тока и тиристорный ведомый инвертор двигателя. Эти блоки осуществляют преобразование электрической энергии между сетью и двигателем. Термины «сетевой выпрямитель» и «ведомый инвертор двигателя» относятся к основному режиму, когда энергия передается через преобразователь от сети к двигателю (разгон или поддержание движения). Двухмостовая схема тиристорного преобразователя тока может работать и в инверсном режиме, когда энергия передается от двигателя в сеть (торможение). В инверсном режиме тиристорный мост инвертора переводится в режим выпрямителя, а сетевой тиристорный мост переводится в режим ведомого сетью инвертора. Преобразователи ВПЧС, как и другие преобразователи на основе двухмостовой тиристорной схемы преобразователя тока, могут осуществлять не только разгон и регулирование скорости вращения, но и торможение электроприводов с большим моментом инерции. В аппаратуре управления ВПЧС заложена возможность автоматического перехода к режиму торможения.

Вспомогательные силовые блоки ВПЧС – это входной и выходной реакторы переменного тока, входной и выходной фильтры переменного тока и блок транзисторного коммутатора. Схема ВПЧС является бестрансформаторной, и входной реактор переменного тока в ней необходим для ограничения скорости коммутации тока вентилей выпрямителя, а также для ограничения тока короткого замыкания при авариях. Выходной реактор переменного тока выполняет те же функции для инвертора на тех интервалах времени, когда к двигателю подключены одновременно инвертор и сеть. Такое перекрытие контакторов сети и инвертора может использоваться для плавного перевода питания двигателя с инвертора на сеть или обратно, с сети на инвертор.

Входной и выходной фильтры переменного напряжения предназначены для подавления высокочастотных резонансных колебаний в присоединительных входных и выходных кабелях, которые могли бы возбуждаться при переключениях вентилей. Установленные фильтры подавляют эти колебания. Транзисторный коммутатор является вспомогательным блоком, предназначенным для улучшения условий коммутации тиристорного инвертора. Он составлен из трех однофазных

транзисторных мостов, включенных каждый в рассечку фазного провода. Постоянное напряжение коммутатора составляет ≈ 550 В. При нулевой или малой скорости вращения, когда э. д. с. вращения двигателя отсутствует или мала, коммутация вентилей осуществляется напряжением коммутатора. Поэтому при пуске можно не прерывать ток инвертора, снижая тем самым пульсации момента двигателя на этой стадии. При высоких скоростях напряжение коммутатора суммируется с э. д. с. вращения двигателя и позволяет уменьшить угол сдвига тока двигателя до номинальной величины с $\cos\varphi = 0,9$. Мощность коммутатора незначительна, и в нем используются транзисторы самого массового класса 1200 В, применяемые в электроприводах с напряжением 380 В, поэтому затраты на него невелики.

Вентили выпрямителя и инвертора набираются из последовательно соединенных тиристоров; число тиристоров определяется «принципом n-1»: при пробое одного тиристора работа преобразователя не прерывается. Включение тиристоров выпрямителя и инвертора и переключение транзисторов коммутатора выполняется по оптоволоконным каналам связи через блоки формирования импульсов включения / выключения – драй-

веры. Каждый тиристор и транзистор имеют свой драйвер, который расположен рядом с тиристором (транзистором) и имеет потенциал катода (эмиттера). Передача питания на драйвер, когда оно требуется, осуществляется высокочастотной токовой петлей, выполненной высоковольтным кабелем. Отделенное питание и оптоволоконная передача сигналов обеспечивают помехозащищенность. Каждый драйвер имеет два оптоволоконных канала связи: прямой и обратный. По прямому каналу на драйвер подаются сигналы включения / выключения. По обратному каналу из драйвера передается информация, нужная для защиты и сигнализации.

Управление

На рис. 1, кроме силовых блоков, представлены также функциональные блоки системы управления. Подсистема управления выпрямителя обеспечивает регулирование выпрямленного тока I_d и защиту выпрямителя. В ней предусмотрены аппаратная и программная защиты. Аппаратная защита действует при аварийных токах и в случаях, когда пропадает питание собственных нужд. В программной защите суммируются данные об исправности тиристоров и драйверов и о перегревах. Основные функциональные бло-

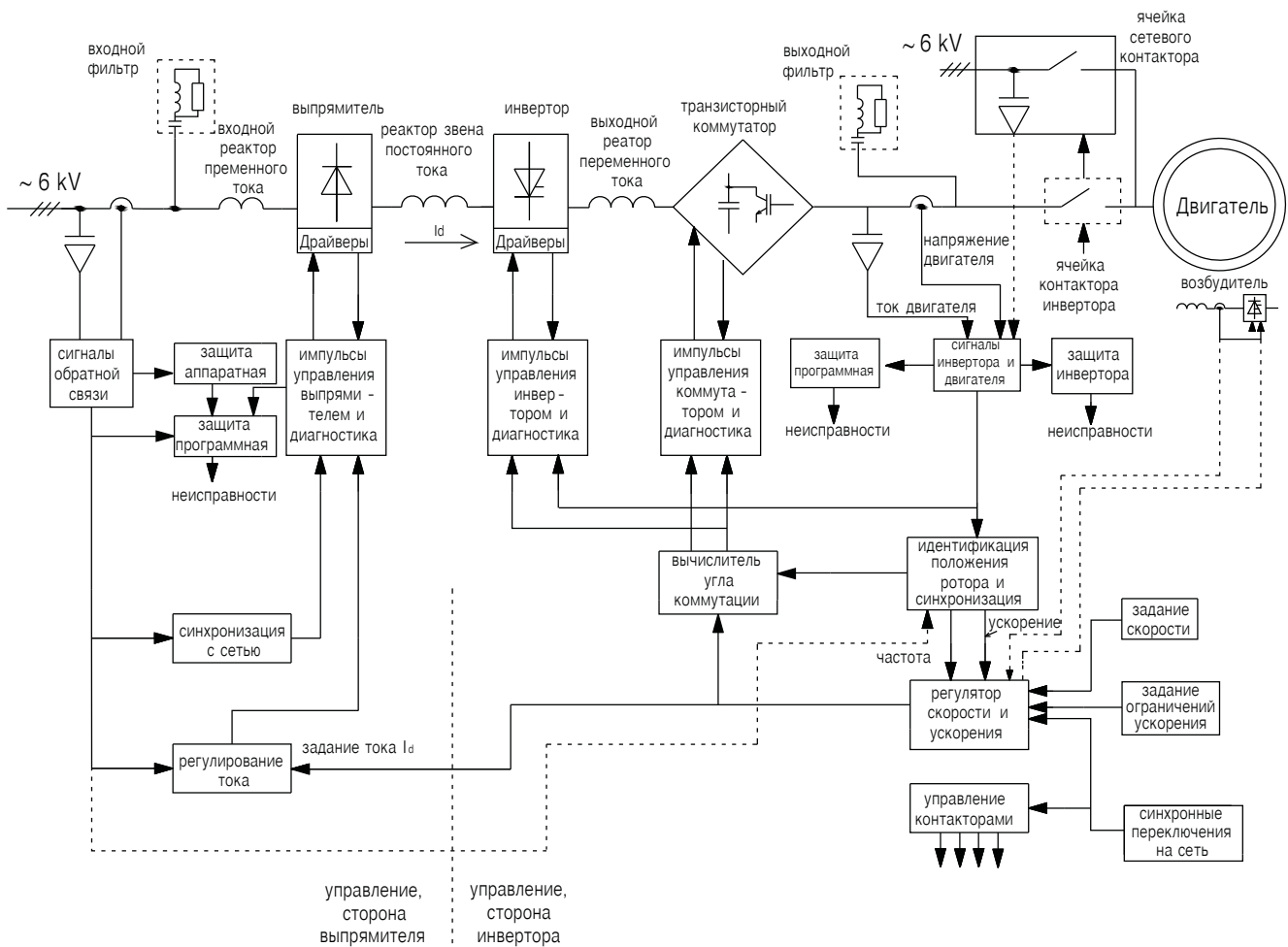


Рис. 1. Функциональная схема преобразователей ВПЧС

ки подсистемы управления выпрямителя – это блок синхронизации с сетью, блок импульсов управления и диагностики и блок регулирования тока. В блоке синхронизации использован прецизионный и помехозащищенный алгоритм трехфазной синхронной фильтрации, а в блоке импульсов управления – алгоритм эквивалентного задувающего вентиля. Современная микропроцессорная техника позволяет осуществить эти алгоритмы без усложнения аппаратуры, а применение их дает возможность уменьшить силовое оборудование, в частности – сглаживающий дроссель.

Базовым блоком подсистемы управления инвертором является блок идентификации положения ротора и синхронизации ВПЧС (рис. 1). Пуск двигателя при использовании ВПЧС является синхронным с самого начала. Асинхронная стадия отсутствует. Возбудитель включается пред началом работы ВПЧС. Система управления ВПЧС – векторная, без датчика положения ротора. Положение ротора перед пуском определяется по фазе напряжения статора, которое наводится при включении возбудителя; фаза, с которой стартует инвертор, определяется как первая (в положительном направлении) следующая за положением ротора фаза инвертора. В дальнейшем блок идентификации отслежи-

вает непрерывно изменяющееся положение ротора по измеренным токам и напряжениям статора и обеспечивает синхронизацию импульсов управления инвертора.

Блок вычислителя угла коммутации по значениям тока I_d , частоты f и э. д. с. двигателя U_m вычисляет минимальный угол опережения инвертора β , обеспечивающий завершение коммутаций и выключение тиристорov. Транзисторный коммутатор управляется так, чтобы его э. д. с. действовала совместно с э. д. с. двигателя. Импульс напряжения в коммутируемых фазах включается с небольшим опережением ξ относительно момента включения очередного вентиля инвертора в момент $-\beta-\xi$ и снимается с задержкой δ после окончания коммутации (рис. 2). Уже небольшое напряжение коммутатора (2×550 В) позволяет снизить требуемый угол опережения инвертора β . Электромагнитный момент на валу двигателя пропорционален произведению

$$M_{em} \approx I_d \cdot \cos \eta_{eq}, \quad \eta_{eq} \approx \beta - \frac{\gamma}{2},$$

так что уменьшение опережения позволяет соответственно уменьшить ток I_d (и, соответственно – ток двигателя и сети). Регулирование движения осуществляется двухканальной системой в блоке регулятора скорости

и ускорения. Регулятор ускорения – интегрально-пропорциональный (апериодический, рис. 3). На выходе его вырабатывается задание выпрямленного тока I_dz . Выход регулятора ограничивается на уровне $\approx 1,3 I_{d, nom}$. Регулятор скорости – пропорциональный, с двусторонним ограничителем $\pm g$. Сигналы обратных связей f, \dot{f} поступают в блок регуляторов скорости и ускорения из блока идентификации положения ротора.

При больших рассогласованиях скорости устанавливается ускорение

$$(*) \dot{f}z = g.$$

Оно поддерживается до тех пор, пока не будет достигнута окрестность $\pm 1/k$ (обычно $\pm 2\%$) уставки скорости; после этого процесс набора скорости продолжается экспоненциально, до достижения заданной величины скорости. В целом регулятор скорости астатический, заданная частота отслеживается точно. Ускорение может замедлиться, если задание по моменту (по току I_d) достигнет уровня ограничения; в этом случае ускорение определяется избытком электромагнитного момента над моментом сопротивления

$$\dot{f}z \sim M_{em, max} - M_c, \quad \text{где } M_{em, max} \approx 1,3 M_{nom}.$$

Блок управления контакторами контролирует синхронность и синфазность напряжений сети и инвертора. Переключения сетевой ячейки и контактора инвертора производятся после достижения заданной точности синфазности.

Алгоритмы управления осуществляются унифицированной системой управления (рис. 4). Основные операции выполняются ячейками быстродействующих сигнальных процессоров с ПЛИС и согласующими операционными усилителями. Для передачи сигналов управления на тиристоры, транзисторы и коммутационные аппараты и для приема данных с датчиков используются ячейки обмена с оптоволоконными разъемами, а также электромагнитными и полупроводниковыми реле. Для выполнения вспомогательных функций в блоке управления устанавливается ячейка универсального промышленного компьютера (обмен с пультами управления, связь с АСУ верхнего уровня, календарь и ведение протоколов и т. п.), а также ячейка мониторинга, осуществляющая запись процессов, которая может понадобиться при диагностике. Уставки (например – темп разгона) параметров, характеризующих режимы, в исходном состоянии системы задаются на номинальном (стандартном) уровне.

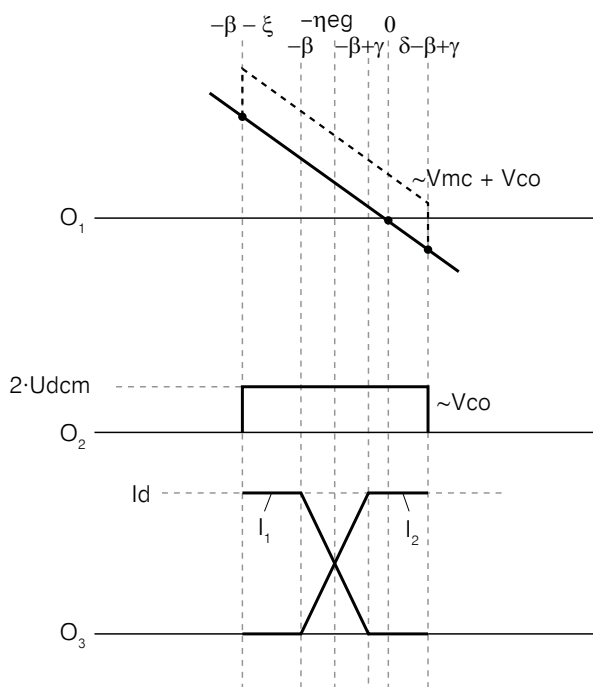


Рис. 2. Коммутация тока инвертора совместным действием э. д. с. двигателя V_{mc} и импульсом транзисторного коммутатора V_{co}

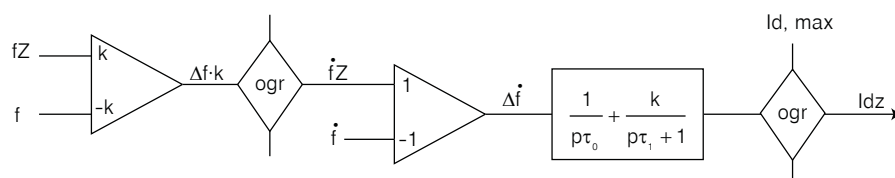


Рис. 3. Регуляторы скорости и ускорения



Рис. 4. Блок унифицированной системы управления

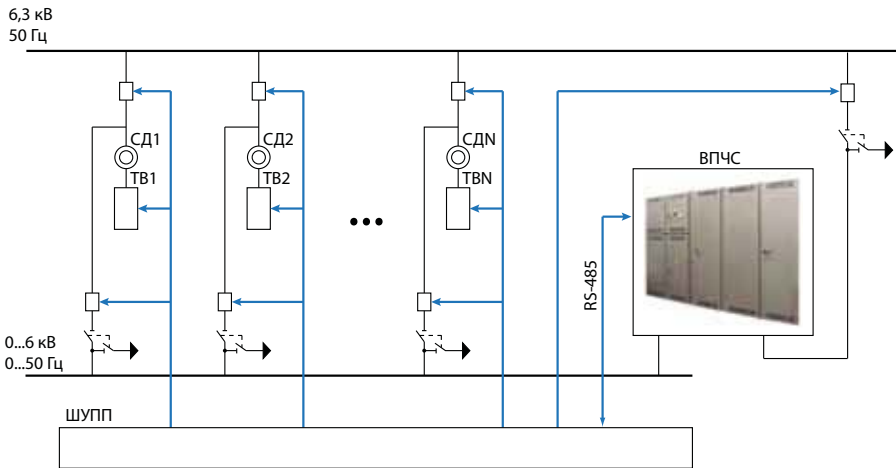


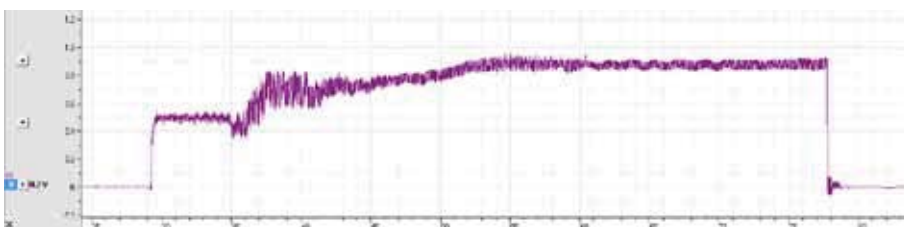
Рис. 5. Схема управления поочередным пуском нескольких электродвигателей с помощью преобразователя частоты ВПЧС



Рис. 6. Внешний вид шкафа управления поочередным пуском (ШУПП) нескольких электродвигателей и мнемосхема лицевой панели
а – блок контроллера; б – мнемосхема лицевой панели ШУПП



Частота при разгоне двигателя



Выпрямленный ток (модуль выходного тока)

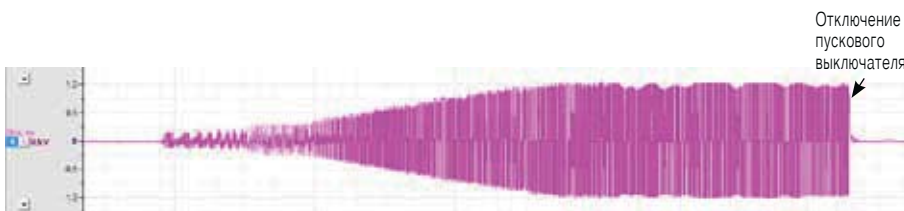


Рис. 7. Осциллограммы пуска электропривода цементной мельницы

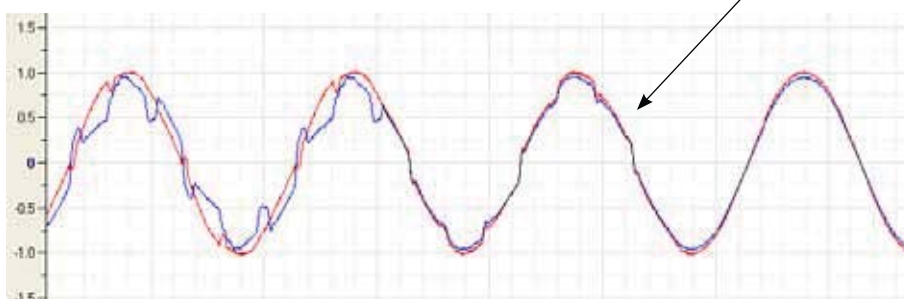


Рис. 8. Фазировка выходного напряжения при переключении СД на сеть

При вводе в эксплуатацию или в ходе эксплуатации эти установки могут изменяться в предусмотренных пределах с клавиатуры пульта, размещенного на передней панели. На пульте размещен также дисплей, на котором отображаются текущие показатели режима – частота, выходное напряжение и выходной ток – и другие переменные по запросу с клавиатуры.

Ячейка мониторинга имеет выход на USB-порт. В случае возникновения вопросов по работе электропривода он может использоваться для рассмотрения процессов в преобразователе на месте либо для пересылки информации в центр обслуживания завода-изготовителя.

С помощью одного преобразователя ВПЧС может выполняться поочередный пуск нескольких электродвигателей (рис. 5). Управление коммутационными ячейками при этом осуществляется автоматически из шкафа управления поочередным пуском (ШУПП).

Управление вакуумными выключателями, а также регистрация состояния выключателей и разъединителей осуществляется в ШУПП системой сбора данных и управления на базе промышленного контроллера с последующей передачей данных в СУ ВПЧС (рис. 6, а).

С лицевой панели ШУПП осуществляется выбор двигателя для пуска, а также контроль состояния коммутационных аппаратов на мнемосхеме (рис. 6, б).

Одним из основных назначений преобразователей ВПЧС является разгон синхронных электроприводов с тяжелыми условиями пуска, когда велик или момент инерции электропривода, или момент сопротивления, начиная уже с малых скоростей движения. К числу таких объектов относятся, например, электроприводы цементных мельниц.

На рис. 7 показаны осциллограммы пуска электропривода цементной мельницы с двигателем СДМ32-22-41-60УХЛ4 с преобразователем ВПЧС мощностью 2000 кВт. На



Рис. 9. Шкафы для размещения оборудования преобразователя частоты ВПЧС

верхней осциллограмме дана частота ВПЧС в герцах; она же – частота двигателя и скорость вращения двигателя, поскольку пуск синхронный. На средней осциллограмме дан выпрямленный ток; в структуре преобразователя тока этот ток совпадает с модулем тока двигателя и с модулем сетевого тока. Ток нормирован, и номинальному значению его соответствует единица. Уставка токоограничения на графике была задана равной $\approx 0,9$. На нижней осциллограмме представлено фазное напряжение двигателя. В процессе разгона можно выделить несколько этапов. На начальном этапе двигатель трогается и разворачивается с медленно нарастающей скоростью. Благодаря действию коммутатора, ток двигателя при этом не прерывается. Как уже упоминалось, это сделано для уменьшения пульсаций момента двигателя. Попутно уменьшается и возмущение питающей сети. На следующем этапе устанавливается процесс в мельнице, после чего начинается разгон с постоянным ускорением. Перед достижением номинальной скорости ускорение снижается, чтобы избежать перерегулирования скорости. После достижения номинальной частоты, в данном случае равной частоте сети, начинается синхронизация.

Развернутая осциллограмма сетевого напряжения и напряжения инвертора представлена на рис. 8. Показан интервал времени, где достигается синхронность. В сетевом напряжении видны коммутационные провалы, вызванные работой выпрямителя (в данном случае ВПЧС питается от того же сетевого фидера, на который переводится питание двигателя). После достижения синхронности реле ВПЧС инициирует замыкание сетевой ячейки, другое реле ВПЧС с некоторой задержкой времени инициирует размыкание контактора стороны инвертора. Синхронизация достаточно точная, и броски тока при переводе питания не возникают.

Конструкция

Оборудование преобразователя ВПЧС мощностью 2000 кВт полностью размещено в трех шкафах (рис. 9).

Подключение входных и выходных кабелей 6 кВ осуществляется снизу в шкафу выпрямителя (вход) и шкафу инвертора (выход). Кабели управления подключаются снизу в шкафу инвертора и системы управления. Привычный, вынесенный отдельно крупногабаритный сглаживающий реактор отсутствует; описанные выше алгоритмы позволили обойтись компактным сглаживающим реактором, размещенном в среднем шкафу. Блок системы управления на основе современных сигнальных процессоров также получается компактным и размещается в экранированном отсеке первого силового шкафа. Там же расположена панель местного управления с дисплеем для отображения показателей режимов и диагностики, клавиатурой для корректировки уставок и вызова данных диагностики, а также кнопками «пуск / стоп». При работе с единичным электроприводом никакого дополнительного оборудования не требуется. Для работы с несколькими двигателями предусмотрен дополнительный шкаф управления ШУПП, к которому подводятся цепи управления ячейками контакторов и управление возбуждителями. Расположение этого шкафа определяется требованиями удобства обслуживания и сокращения соединительных проводов. С ВПЧС шкаф управления связывается по каналу связи RS485; расстояние до ВПЧС не критично.

Заключение

В рамках унифицированных технологических решений могут поставляться ВПЧС на расширенный ряд номинальных напряжений (включая напряжение 15,75 кВ) и на расширенный ряд мощностей (до 30 МВт при воздушном охлаждении). Аппаратные ресурсы системы управления позволяют по заданию потребителя осуществлять вдобавок к обычным и специфические дополнительные функции, например – (1) ускоренное торможение после перевода питания двигателя с сети на инвертор, или (2) подхват неустановившегося двигателя после кратковременного прерывания питания, или (3) торможение из противотока и другие подобные режимы.

Опыт применения

В настоящее время подобные устройства успешно внедряются и эксплуатируются на промышленных предприятиях России:

- ЗАО «Ульяновскцемент», принадлежащем ЗАО «ЕВРОЦЕМЕНТ групп» – ВПЧС-2000–6,3/6,0–50 (для 7-ми мельниц);
- ЗАО «Пикалевский цемент», принадлежащем ЗАО «ЕВРОЦЕМЕНТ групп» – ВПЧС-2000–6,3/6,0–50 (для 6-ти мельниц);
- ЗАО «Серебро-Магадана», принадлежащем ОАО «Полиметалл» – ВПЧС-2000–6,3/6,0–50 (для 3-х мельниц).