

Применение многофункциональных силовых активных фильтров в составе мощного частотно-регулируемого электропривода

КРУТИКОВ К.К., РОЖКОВ В.В.

Рассмотрена модернизация существующих схем транзисторных преобразователей частотно-регулируемых электроприводов с узлом динамического торможения путем дополнения вариантами схем с силовыми активными фильтрами-компенсаторами реактивной мощности, мощности искажений. Предложены вариант силовой схемы и алгоритм управления транзисторными ключами, сочетающий в себе достоинства компенсатора реактивной мощности и кондиционера сети в двигательном и генераторном режимах частотно-регулируемого электропривода.

Ключевые слова: частотно-регулируемый привод, активный фильтр гармоник, кондиционер электрической сети, рекуперативное торможение, способы управления

Для частотно-регулируемого привода в диапазоне мощностей десятки–сотни киловатт обычно применяется схема (рис. 1) «неуправляемый выпрямитель – транзисторный двухуровневый автономный инвертор напряжения (АИН) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ)» [1–5]. В двигательном режиме такой привод как нелинейная нагрузка искажает сеть высшими гармониками, а по фазе основная гармоника тока отстает от фазы основной гармоники напряжения, что обусловлено процессами коммутации диодов неуправляемого выпрямителя.

Устройство торможения в таком варианте представляет собой тормозной резистор, управляемый транзисторным ключом по сигналу превышения напряжения в звене постоянного тока (т.е. на конденсаторе АИН) некоторого порогового уровня (например 600 В в варианте питания от трехфазной сети 380 В). При такой схеме энергия торможения (в виде рассеяния тепла) непроизводительно теря-

An approach for upgrading the existing circuits of transistor frequency converters used in adjustable-frequency drives containing a dynamic braking unit is considered that consists in supplementing them with circuits combining the functions of active power filters and compensators of reactive power and distortion power. A version of power circuit is proposed together with an algorithm for controlling transistor switches that combines the advantages of a reactive power compensator and network conditioner in the motor and generator operation modes of an adjustable-frequency drive.

Key words: adjustable-frequency drive, active harmonic filter, electric network conditioner, recuperative braking, control methods

ется в тормозном резисторе. Нелинейные искажения сети в режиме торможения также остаются.

В настоящее время применяются два основных варианта модернизации схемы рис. 1:

1. Диодный неуправляемый выпрямитель заменяется управляемым с функциями фильтра-компенсатора реактивной мощности во всех режимах работы двигателя. Тормозной резистор из схемы исключается (или оставляется в качестве аварийного варианта) – рис. 2.

2. Параллельно схеме рис. 1 подключается дополнительный управляемый мост, работающий как активный фильтр-компенсатор нелинейных искажений, с собственным накопительным конденсатором $C_{\text{нак}}$ – рис. 3.

Принцип работы активного фильтра в режиме компенсатора реактивной мощности (рис. 2). Входной дроссель L , сглаживающий дроссель L_d и конденсатор звена постоянного тока C основного питающего управляемого моста выбираются из усло-

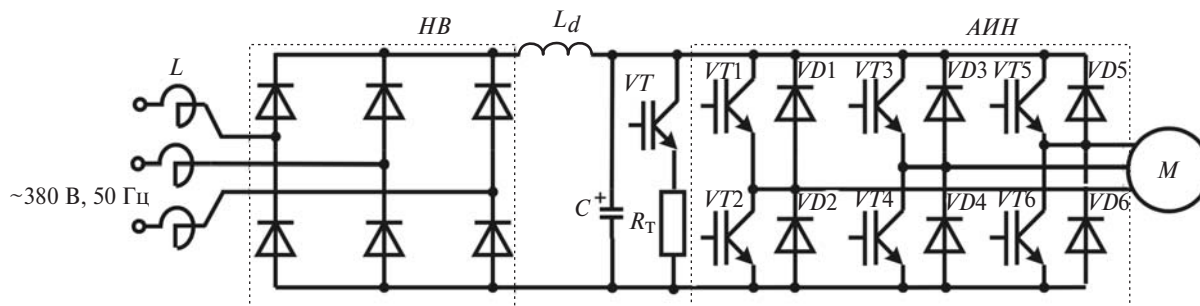


Рис. 1

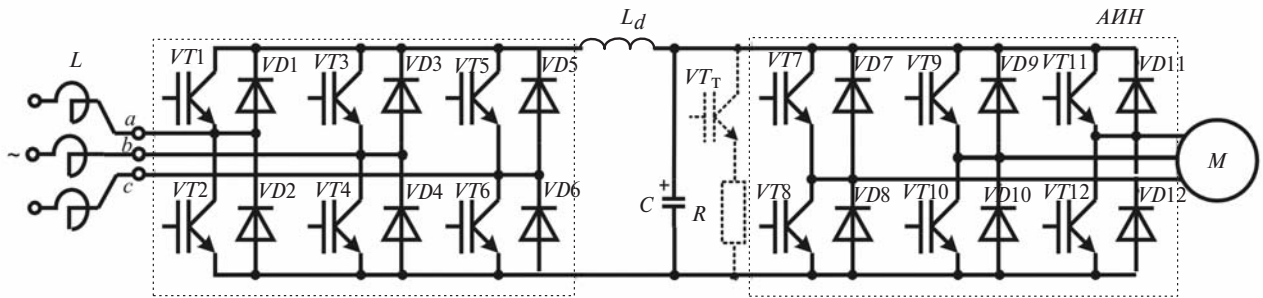


Рис. 2

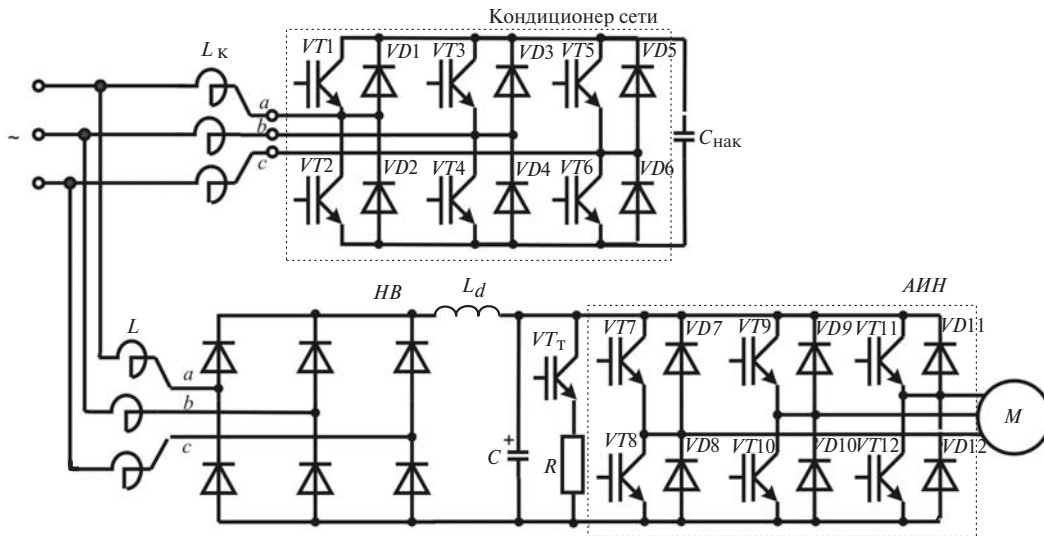


Рис. 3

вий, обусловленных требованиями нагрузки. В частности, необходимо чтобы падение напряжения на индуктивном сопротивлении входного дросселя на частоте сети было бы незначительным по сравнению с напряжением питающей сети. При несоблюдении этого условия стабилизация напряжения в звене постоянного тока (напряжения на конденсаторе) на номинальном уровне при переменной нагрузке невозможна. Индуктивность сглаживающего дросселя в звене постоянного тока определяется различными (часто противоречивыми) требованиями (например условиями пуска). В некоторых случаях сглаживающий дроссель может отсутствовать. Конденсатор звена постоянного тока выступает как промежуточный источник питания АИФ с ШИМ, и значение его емкости выбирается из условий допустимых пульсаций напряжения на заданном номинальном уровне. Поэтому при модернизации исходной схемы привода (переходе от схемы рис. 1 к схеме рис. 2) параметры входного дросселя в цепи переменного тока и емкости в звене постоянного тока можно считать заданными.

Параметр \sqrt{LC} может служить в качестве базовой величины, с помощью которой можно оценивать установленную мощность дополнительных

элементов накопителей при модернизации. Активный фильтр, питающий нагрузку с заданными параметрами накопителей в цепях переменного и выпрямленного токов, в этом варианте должен выполнять функции компенсатора реактивной мощности по основным гармоникам сетевых токов и напряжений. На него же возлагается функция стабилизации напряжения в звене постоянного тока (на конденсаторе) в двигательном и генераторном тормозном режимах. Однако в этой схеме выполнение активным фильтром дополнительной функции кондиционера сети не представляется возможным.

Управление ключами активного фильтра в режиме компенсатора реактивной мощности по основным гармоникам входного тока и напряжения и при условии стабилизации напряжения на конденсаторе во всех режимах осуществляется в замкнутой векторной схеме регулирования [6–13]. При этом на вход системы подается сигнал, пропорциональный заданному значению тока сети, и сигнал обратной связи, пропорциональный реальному току сети. Активный фильтр может работать как генератор активной мощности (инвертор, ведомый сетью) и как потребитель активной мощности.

Для регулирования только активной мощности (при постоянной реактивной) необходимо вектор-

ное управление преобразователем с отрицательной обратной связью по току в синхронно вращающейся системе координат x, y , связанной с результирующим вектором напряжения сети. При условии стабилизации напряжения в звене постоянного тока проекция тока I_x определит активную мощность сети, а проекция I_y — реактивную. Для того чтобы преобразователь не потреблял реактивной мощности, ток по оси y задаётся равным нулю. Проекцию тока по оси x можно упрощенно задать в соответствии с уравнением:

$$I_x = (-U_c + U_{уст}) / R, \quad (1)$$

где U_c — напряжение на конденсаторе — входное напряжение двигательной нагрузки с учетом противоЭДС двигателя, приведенное ко входу постоянного напряжения инвертора; $U_{уст}$ — значение уровня стабилизации напряжения; R — эквивалентное сопротивление цепи двигателя и преобразователя.

Формирование импульсов управления транзисторами активного фильтра происходит по входным сигналам датчиков: напряжения в звене постоянного тока АИН и напряжения, синфазного с одной из фаз сети и квадратурного с ним. Эти сигналы нормируются и преобразуются к системе координат x, y , ось x которой синфазна с напряжением одной из фаз (например A). Для получения этих сигналов требуется в реальном времени:

выделить из искаженного помехами сигнала фазного напряжения основную гармонику без фазовой погрешности на выходе соответствующего полосового фильтра или иначе, например по [14];

измерить действующее значение основной гармоники фазного напряжения для его нормирования (при возможной несимметрии сети эта проблема рассмотрена в [7, 10, 15], а при симметрии нормирование проводится умножением на постоянный коэффициент).

Принцип работы активного фильтра в режиме кондиционера сети (рис. 3). Выход активного фильтра в режиме кондиционера сети подключается к зажимам собственного накопительного конденсатора [14–16]. В рассматриваемом режиме управление силовыми ключами может выполняться по следующему алгоритму:

измеряются мгновенные входные токи фаз питающей сети;

в векторном фильтре выделяются основные гармоники входных токов нелинейной нагрузки без фазовой погрешности;

сравниваются результирующий вектор реальных суммарных токов на входе схемы и вектор основных гармоник тока нагрузки, формируется вектор их разности (он содержит только высокочастотные

составляющие нелинейных искажений входного тока);

векторный несинусоидальный разностный сигнал токов без основной гармоники поступает на вход релейного регулятора, формирующего импульсы управления транзисторными ключами активного фильтра.

Как видно из сравнения алгоритмов компенсации реактивной мощности и кондиционера сети, они мало отличаются. Если в первом необходима синхронизация с сетью для формирования вектора задания входного тока, содержащего только активную составляющую, то во втором такая синхронизация не нужна. Не требуется также сигнал напряжения на конденсаторе. Что же касается сравнения параметров силовых цепей существующих схем активных фильтров для первого и второго вариантов, то они выбираются из разных соображений, и одноименные накопители не равны друг другу.

В статье рассмотрены результаты исследований по расширению возможностей описанных выше схемных решений модернизации привода с применением силовых активных фильтров. Основной идеей предлагаемого решения является совмещение достоинств схем рис. 2 и 3 для получения четырехквadrантного частотно-регулируемого привода с возможностью рекуперации энергии в питающую сеть и не вносящего в эту сеть значительных нелинейных искажений. Особенно это актуально для мощных электроприводов, в частности металлургических.

Для одновременного соответствия требованиям работы привода в двигательном и рекуперативном тормозном режимах со стабилизацией напряжения на конденсаторе, фильтрацией нелинейных искажений и компенсацией реактивной мощности предлагается следующая схема (рис. 4). В ней имеется один активный фильтр, который выполняет все необходимые функции.

Параметры L, L_d, C (цепь основного диодного моста) определены для заданного типа нагрузки до начала модернизации, а $L_k, C_{нак}$ (цепь кондиционера сети и рекуператора) выбираются из указанных ниже соображений.

Свободная составляющая тока в колебательном контуре с малыми потерями имеет вид незатухающих синусоидальных колебаний с собственной частотой $\omega_0 = 1 / \sqrt{2L_k C_{нак}}$ и амплитудой $I_m = U_{лм} / \rho$, где $\rho = \sqrt{2L_k / C_{нак}}$ — характеристическое сопротивление контура активного фильтра-кондиционера сети.

На периоде сети активным фильтром с чисто емкостной нагрузкой, включенным параллельно входу основной нагрузки, формируется фазный

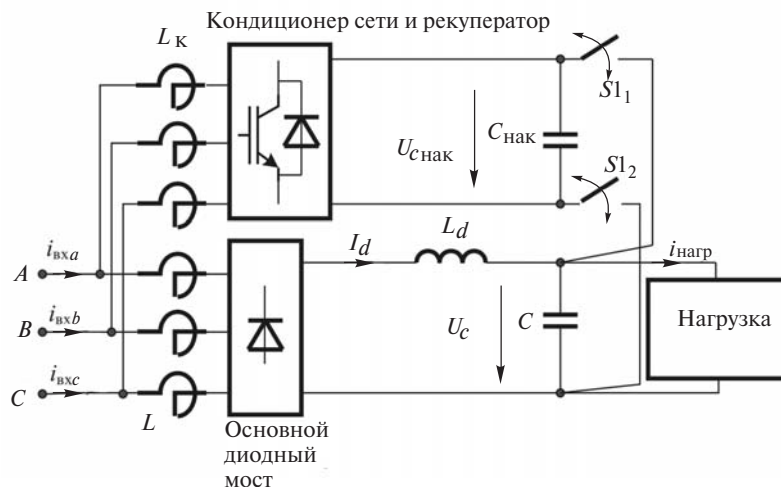


Рис. 4

ток контура, образованного или проводящими диодами, или проводящими транзисторами. Этот ток в замкнутой системе регулирования может с точностью до знака совпадать с высшими гармониками тока нелинейной нагрузки. Таким образом, можно получить рекомендации по выбору параметров дросселя и конденсатора в режиме кондиционера сети:

требуемое характеристическое сопротивление контура

$$\rho = U_{\text{лм}} / I_{\text{нм}} = \sqrt{2L_{\text{к}}C_{\text{нак}}}; \quad (2)$$

резонансная частота

$$\omega_0 = 1 / \sqrt{2L_{\text{к}}C_{\text{нак}}} = 5\omega_{\text{сети}}. \quad (3)$$

Управление ключами многофункционального активного фильтра осуществляется по двум различным алгоритмам. Для этого имеются две схемы управления, которые работают поочередно в двигательном и тормозном режимах. Информационными сигналами для управления являются: входные фазные напряжения, входные фазные токи, напряжение на конденсаторе C , питающем двигательную нагрузку частотного привода. Уровень стабилизации напряжения задается постоянным и определяется номинальным значением напряжения в звене постоянного тока. Конденсаторы силовых цепей C и $C_{\text{нак}}$ подключаются двухцепным управляемым ключом $S1_1-S1_2$.

Пуск и работа в двигательном режиме происходят при разомкнутых контактах ключа $S1_1-S1_2$, поэтому активный фильтр нагружен на выходе на собственный накопительный конденсатор. Управление одной из двух схем управления происходит с алгоритмом кондиционера сети. При этом достигается синусоидальность кривой входных токов. Сдвиг токов и напряжений в этом режиме невелик

и не контролируется. Напряжение на конденсаторе непрерывно отслеживается, но его значение в двигательном режиме несколько меньше напряжения уставки на торможение. При появлении сигнала о превышении напряжения на конденсаторе C (начало рекуперативного торможения) одновременно замыкаются контакты управляемого силового двухцепного ключа $S1_1-S1_2$ и управление активным фильтром передается второй схеме управления с алгоритмом компенсатора реактивной мощности. Конденсаторы C и $C_{\text{нак}}$ при этом соединяются параллельно. В предшествующий момент на конденсаторах были почти одинаковые напряжения, поэтому их соединение не вызывает заметных возмущений. Окончание торможения определяется снижением напряжения на этих конденсаторах до требуемого значения, устанавливаемого при настройке. Тогда происходит размыкание силовых цепей конденсаторов, а управление активным фильтром вновь передается схеме с алгоритмом кондиционера сети.

Предлагаемая комбинированная схема моделировалась применительно к высоковольтному (6 кВ) частотно-регулируемому приводу с двигателем мощностью 630 кВт и числом пар полюсов, равным четырем. Параметры машины: активные сопротивления статорной и роторной обмоток $R_1=2,9$ Ом; $R'_2=1,8$ Ом; индуктивности рассеяния статорной и роторной обмоток $L_1=L'_2=5$ мГн; взаимная индуктивность статора и ротора $L_m=245$ мГн; момент инерции двигателя $J=34,5$ кг·м². Параметры накопителей: реактор на входе неуправляемого выпрямителя с $L=300$ мкГн; сглаживающий дроссель в звене постоянного тока неуправляемого выпрямителя с $L_d=2,5$ мГн; конденсатор звена постоянного тока выпрямителя $C=410$ мкФ; реактор на входе силового активного фильтра $L_k=3000$ мкГн; конденсатор накопителя активного фильтра

$C_{\text{нак}}=50$ мкФ. Уставка на рекуперативное торможение – превышение напряжения 8100 В в звене постоянного тока. Управление двигателем векторное с внешними регуляторами момента и потокосцепления ротора и внутренним релейным регулятором фазных токов.

В состав комплексной модели электропривода с предлагаемой схемой многофункционального активного фильтра помимо специфических элементов и систем управления частотно-регулируемым приводом входят и все элементы предлагаемой схемы многофункционального активного фильтра, описанные выше, с указанными параметрами. Рассматривался пуск двигателя вначале на понижен-

ной частоте вращения, затем на номинальной. Момент сопротивления в двигательном режиме был принят номинальным, равным 8 кН·м. При изменении знака момента сопротивления при $t=1,2$ с происходит переход к генераторному рекуперативному режиму двигателя.

Результаты экспериментов приведены на осциллограммах рис. 5 и 6. Основное внимание уделялось энергетическим показателям, зависящим от работы предлагаемой схемы активного фильтра. Механические показатели (скорость и момент привода), являющиеся основными для регулируемого электропривода, здесь стояли на второй позиции – для иллюстрации принятых схмотехнических и

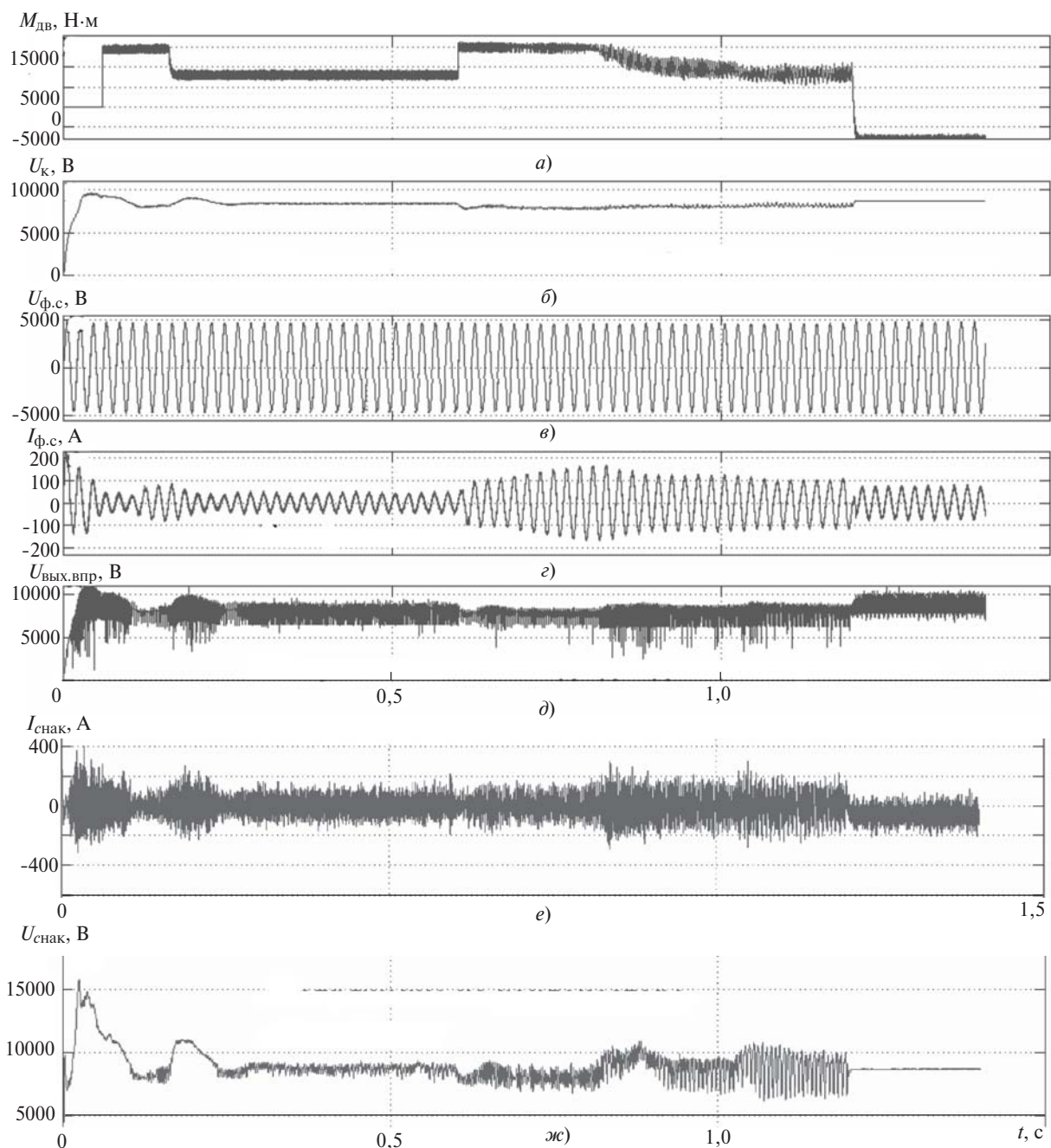


Рис. 5

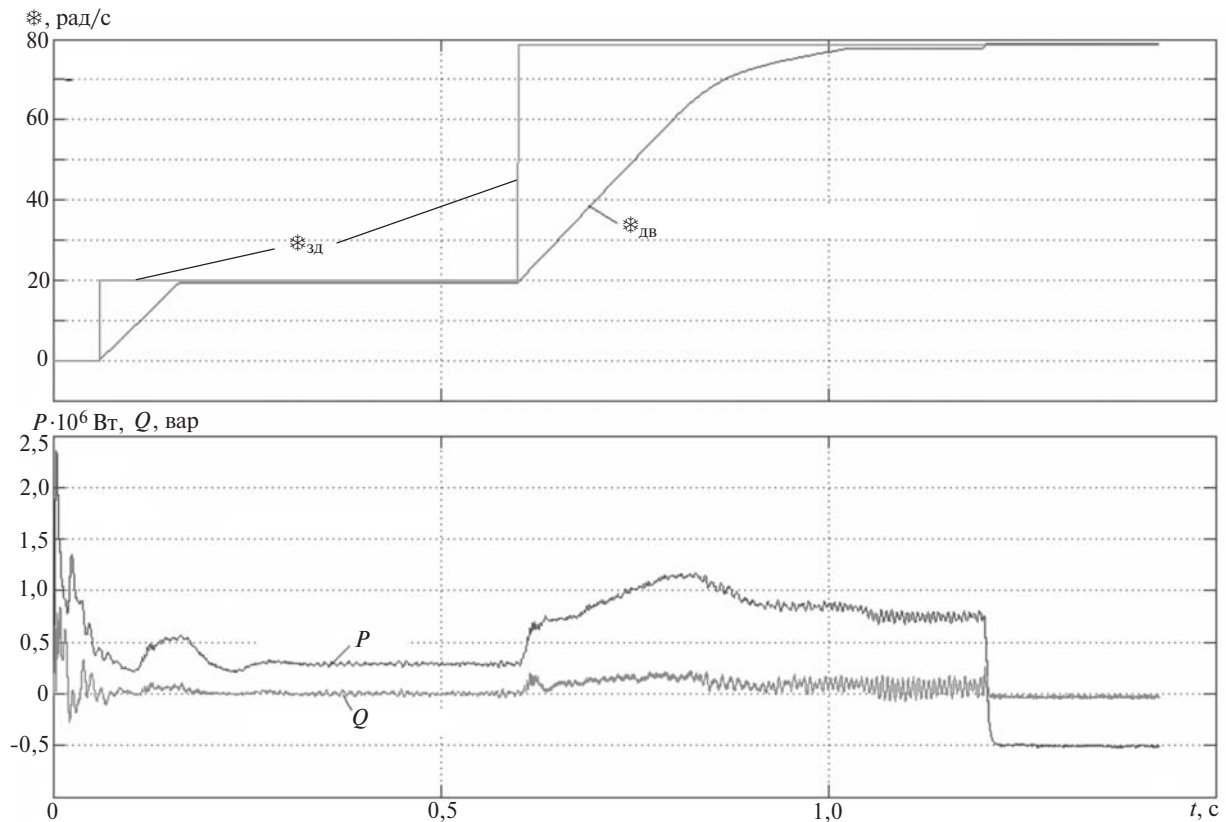


Рис. 6

алгоритмических решений. Из рис. 5 видно, что в двигательном режиме фазные напряжения (рис. 5,а) и токи (рис. 5,б), потребляемые из сети, синфазны и синусоидальны. В генераторном рекуперативном режиме они синусоидальны и противофазны.

Осциллограммы подтверждают, что схема работает в полном соответствии с выдвинутыми требованиями синусоидальности кривых входных токов и напряжений и без потребления реактивной мощности, как в двигательном, так и рекуперативном тормозном режимах. При этом обеспечивается высокая точность отработки задания скорости двигателя ω и ограничение динамического момента.

Выводы. 1. Для выполнения предлагаемой комбинированной схемой задач компенсации реактивной мощности при стабилизации напряжения в звене постоянного тока во всех режимах, а также кондиционирования входных токов требуется тщательный выбор параметров силовой цепи (входного дросселя основного активного выпрямителя, входного дросселя кондиционера сети и его емкости в звене постоянного тока). Входной дроссель и конденсатор звена постоянного тока основного питающего выпрямителя выбираются в соответствии с требованиями нагрузки. Параметры силовой цепи кондиционера сети, подключаемого параллельно входным зажимам сетевого питания основного выпрямителя, выбираются по условию генерирования

такого тока, который определяется спектром нелинейных искажений входного тока нагрузки. На частоте наиболее значимой гармоники кондиционер сети должен удовлетворять условиям резонанса напряжений с определенным значением характеристического сопротивления. Расчет с учетом этих условий показал, что индуктивность входного дросселя кондиционера сети должна быть много больше индуктивности входного дросселя основного выпрямителя, а емкость — много меньше сглаживающей емкости звена постоянного тока. В целом установленная мощность силовой цепи активного фильтра имеет один порядок с мощностью накопительных элементов основного выпрямителя.

2. Концепция использования нескольких (чаще всего двух) активных фильтров с разделенными между ними функциями представляется уязвимой. Параллельная работа преобразователей с разными функциональными свойствами может вызывать нежелательные взаимные влияния.

3. По-видимому, частичная модернизация схемы частотного привода на рис. 1 путем ее дополнения до схемы рис. 2 наиболее целесообразна тогда, когда режимы торможения привода составляют значительную долю производственного цикла и исключение звена торможения с рассеянием энергии на сопротивлении может представлять ощутимую выгоду. Если же это звено остается в схеме, то основной выпрямитель можно оставить как неуправ-

ляемый диодный. Включением дополнительного активного фильтра параллельно диодному выпрямителю в режиме кондиционера сети можно в двигательном режиме добиться компенсации нелинейных искажений тока на входе схемы. Потребление реактивной мощности в этой схеме незначительно.

4. Предложенная схема с активным фильтром, выполняющим поочередно функции кондиционера сети в двигательном режиме и компенсатора реактивной мощности в режиме рекуперативного торможения, позволяет комплексно решить задачу модернизации электропривода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: Учебник для студ. вузов. — М.: Издательский центр «Академия», 2006.
2. Каталог D21.1. SINAMICS. Система приводов Vector Control. — SIEMENS, 2005.
3. Виноградов А., Сибирцев А., Журавлёв С. Бездатчиковый электропривод подъемно-транспортных механизмов. — Силовая электроника, 2007, №1.
4. Герман-Галкин С.Г. MATLAB @ SIMULINK проектирование механотронных систем на ПК. — С-Петербург: Корона-Век, 2008.
5. Техническое описание привода Omron: http://industrial.omron.ru/ru/products/catalogue/motion_and_drives/frequency_inverters
6. Розанов Ю.К., Рябчинский М.В., Кваснюк А.А. Силовая электроника: Учебник для вузов. — М.: Издательский дом МЭИ, 2007.
7. Климаш В.С., Светлаков Д.П. Анализ физических процессов компенсатора реактивной мощности с симметрированием тока сети и новым принципом управления. — Электро, 2007, №5.
8. Волков А.В., Волков В.А. Компенсация мощности искажений и реактивной мощности посредством активного фильтра с прогнозируемым релейным управлением. — Электротехника, 2008, №3.
9. Климаш В.С., Константинов А.М. Математическое моделирование трехфазного компенсатора отклонений напряжения

и реактивной мощности с однофазным звеном повышенной частоты. — Электро, 2008, №1.

10. Константинов А.М., Климаш В.С. Устройство для компенсации реактивной мощности со стабилизацией напряжения промышленного энергоблока. — Электро, 2007, №3.

11. Корнилов Г.П., Николаев А.А., Коваленко А.Ю., Кузнецов Е.А. Средства и перспективы управления реактивной мощностью крупного металлургического предприятия. — Электротехника, 2008, №5.

12. Кириенко В.П., Слепченков М.Н. Комплексное устройство компенсации реактивной мощности и мощности искажения в системах питания с управляемыми выпрямителями. — Электричество, 2006, №11.

13. Ситников В.Ф. Силовая электроника в системах электропитания переменного тока. — Электричество, 2008, №2.

14. Горюнов В.Н., Осипов Д.С., Лютаевич А.Г. Определение управляющего воздействия активного фильтра гармоник. — Электро, 2009, № 6.

15. Кондратьев Д.Е., Обухов С.Г. Управление трехфазным активным выпрямителем при искажениях напряжений сети. — Электричество, 2007, №6.

16. Сазонов В.В. Кондиционеры сети на основе активных фильтров. — Электротехника, 2007, №5.

[01.06.10]

Авторы: Крутиков Кирилл Кириллович окончил электромеханический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1960 г. Кандидатскую диссертацию «Исследование энергетических характеристик инверторной установки фарадеевского магнетогидродинамического генератора» защитил в МЭИ в 1975 г. Доцент кафедры ТОЭ Смоленского филиала МЭИ (ТУ).

Рождков Вячеслав Владимирович окончил факультет энергетики и электротехники филиала МЭИ (ТУ) в Смоленске в 2000 г. Кандидатскую диссертацию «Разработка и исследование замкнутых систем и некоторых специальных режимов асинхронного электропривода с фазовым управлением в роторной цепи» защитил в МЭИ (ТУ) в 2004 г. Доцент кафедры «Электромеханические системы» Смоленского филиала МЭИ (ТУ).

* * *

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ и ЧИТАТЕЛЕЙ!

Каждый автор имеет право бесплатно получить 1 экз. журнала с его статьей.

Экземпляры номеров журнала «Электричество» за последние годы

можно приобрести в редакции журнала:

111250 Москва, Красноказарменная ул., 14

(МЭИ, каф. ТОЭ, первый этаж, ком. 3-111, тел./факс 362-7485).