

## НОВАЯ СЕРИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ С АДАПТИВНО-ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ – БАЗА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

ВИНОГРАДОВ А.Б., канд. техн. наук, СИБИРЦЕВ А.Н., инж., ЧИСТОСЕРДОВ В.Л., канд. техн. наук,  
КОЛОДИН И.Ю., МОНОВ Д.А., ЖУРАВЛЕВ С.В., ГНЕЗДОВ Н.Е., инженеры

**Представлены новые разработки НИЛ «Вектор» кафедры ЭП и АПУ Ивановского государственного энергетического университета в области частотного и адаптивно-векторного управления электроприводом переменного тока и некоторые аспекты применения преобразователей частоты новых серий в составе объектно-ориентированного комплектного электропривода.**

Преобразователи и комплектные электроприводы серии ЭПВ представляют собой новое поколение многофункциональных «интеллектуальных» устройств управления низковольтными (до 440 В) асинхронными и синхронными двигателями мощностью от 1 до 400 кВт, предназначенных для регулируемого привода механизмов и технологических процессов с самыми различными требованиями к параметрам регулирования и условиям эксплуатации: от насосов и вентиляторов до высокоточных станков и следящих систем.

Системы управления всех преобразователей этой серии выполнены на основе универсального микроконтроллерного ядра, образованного двумя 16-ти разрядными микроконтроллерами. По сравнению с предыдущей разработкой НИЛ «Вектор» [1], выпускаемой ООО «ЭЛПРИ» Чебоксарского электроаппаратного завода с 1999 г. под маркой АПЧ, электроприводы новой серии отличаются следующими показателями и характеристиками:

- существенно более широкой областью использования, включающей объекты, требующие применения быстродействующего широкодиапазонного электропривода переменного тока, электропривода с высоким качеством двухстороннего обмена энергией с питающей сетью, а также высококачественного бездатчикового электропривода;

- улучшенными показателями регулирования скорости (быстродействием, диапазоном);

- улучшенными массогабаритными и энергетическими характеристиками;

- более высокими показателями надежности, достигнутыми за счет повышения степени интеграции и показателей надежности отдельных компонентов;

- широким набором входных и выходных управляющих и диагностических сигналов;

- существенно расширенными функциями и повышенной производительностью интерфейсных каналов;

- введением развитых функций программирования для решения пользователем разнообразных технологических задач;

- введением новых и повышением качества уже существующих режимов работы и интеллектуальных опций.

Среди новых режимов и возможностей [2, 3, 4] отметим следующие:

- режим адаптации к изменению активных сопротивлений двигателя, обеспечивающий инвариантность характеристик привода к температурным изменениям сопротивлений статора и ротора;

- автоматическая настройка электропривода на заданные динамические характеристики (время регулирования, полоса пропускания контура скорости, вид переходного процесса), с возможностью оптимальной настройки по Баттерворту и на монотонный процесс, соответствующий биномиальному распределению корней характеристического полинома контура скорости. Возможность последующей точной подстройки в ручном режиме с помощью тестовых входных сигналов и настроечных рекомендаций;

- расширение числа параметров привода, определяемых в результате процедуры автонастройки, и повышение ее точности. В результате выполнения автонастройки асинхронного электропривода определяются активные сопротивления статора и ротора, индуктивности рассеяния и взаимная, момент инерции, по которым производится расчет базовых значений всех параметров и коэффициентов системы управления электроприводом при заданных показателях качества регулирования;

- программно реализованная структура системы управления позволяет работать в замкнутом контуре регулирования скорости или момента. Минимальный полный цикл расчета контура скорости – 100 мкс, контура момента – 50 мкс;

- алгоритм автоматической фазировки датчика скорости / положения исключает необходимость переключений при согласовании выходных сигналов с направлением вращения;

- наличие двух встроенных коммуникационных портов (RS-232/485 и CAN) при поддержке стандартных протоколов связи (MODBUS и CAN-Open) позволяет встраивать электроприводы в локальные информационно-управляющие сети, АСУ ТП и другие сложные системы, не требуя при этом затрат времени на освоение специфических средств коммуникаций;

- 4 независимых набора параметров могут активизироваться аппаратно или программно для различных применений и при изменениях внешних условий работы объекта управления;

- программируемая частота модуляции (2..20 кГц) позволяет для любых применений находить оптимальное соотношение между шумами, вибрациями двигателя и дополнительными потерями в системе «преобразователь – двигатель»;

- широкий набор аналоговых и цифровых входов/выходов с возможностью их перепрограммирования и наращивания путем подключения дополнительных модулей позволяет решать широкий спектр задач автоматизации работы технологического объекта непосредственно средствами электропривода без использования внешнего контроллера;

- различные исполнения интерфейсной платы обеспечивают подключение датчиков скорости / положения с различными типами сигналов: импульсными, синусно-косинусными, а также для резольверов;

- пульт ручного управления имеет 2 исполнения: встроенный в корпус преобразователя или съемный (для установки на дверце шкафа или пульта оператора);

- возможность использования одного пульта ручного управления для нескольких преобразователей и опциональная комплектация интерфейсного модуля (на плате в соответствии с опросным листом устанавливаются только необходимые пользователю устройства) обеспечивают требуемую аппаратную конфигурацию интерфейса при минимуме затраченных средств.

В качестве дополнительных программных опций могут подключаться:

- режим адаптации к изменению параметров механической части привода, обеспечивающий инвариантность характеристик привода к изменению момента инерции и момента нагрузки;

- компенсация динамических неидеальностей силовых ключей преобразователей энергии (задержек включения и выключения), обеспечивающая минимизацию влияния этих эффектов на характеристики электропривода, в особенности на малых скоростях и при высоких частотах модуляции;

- режим повышенного энергосбережения, обеспечивающий минимизацию потребляемой приводом энергии при случайном характере изменения нагрузки;

- режим торможения постоянным током, обеспечивающий фиксацию вала на нулевой скорости и эффективное торможение без отвода энергии в звено постоянного напряжения;

- режим «самоподхвата» привода на заранее неизвестной скорости, реализующий автоматический поиск уровня скорости и плавное вхождение в работу при включении привода с вращающимся валом двигателя (режим актуален, в частности, в электроприводах механизмов с большими моментами инерции при повторном включении в работу после кратковременного пропадания напряжения питания);

- режим позиционирования вала;

- режим программирования и настройки электропривода с помощью персонального компьютера;

- возможность обновления программного обеспечения преобразователей самим пользователем без демонтажа оборудования;

- объектно-ориентированные программные макросы, предназначенные для встраивания электропривода в специфические технологические процессы (управление многонасосной станцией, станцией управления лифтами, управление механизмами с упругой механикой, управление натяжением намоточных механизмов, многосвязный, многодвигательный электропривод с согласованием по скорости, моменту или угловому положению и др.);

- режим предельной перегрузочной способности привода, позволяющий существенно повысить перегрузочную способность преобразователя по току в пределах того же типоразмера за счет подключения динамической тепловой модели элементов IGBT модуля.

Разработано программное обеспечение для персонального компьютера, представляющее собой мультимедийный интерфейс пользователя, реализующий возможность функционирования по отношению к

управляемому преобразователю частоты в режимах «online» или «offline». Пользователь имеет возможность:

- просматривать и редактировать параметры и переменные электропривода с последующей загрузкой необходимых изменений в преобразователь частоты;

- на основе введенных данных получать результаты автоматического расчета параметров регуляторов;

- выполнять мониторинг переменных и флагов состояния электропривода с заданной частотой обновления информации, в том числе в графическом виде (виртуальный осциллограф);

- формировать сигналы управления электроприводом, в том числе с использованием программируемых циклических алгоритмов, генератора периодических сигналов, ручных дистанционных датчиков и внешних контуров регулирования.

Для быстрого доступа к параметрам функциональных узлов преобразователя частоты используются мнемосхемы соответствующих объектов. Для разделения ролей «пользователя» и «наладчика» интерфейс предусматривает трехуровневый доступ к элементам настройки и управления.

Серия ЭПВ включает в себя следующие исполнения:

- бездатчиковый асинхронный электропривод мощностью 3..110 кВт, предназначенный для механизмов с диапазоном регулирования скорости до 50:1, не предъявляющих повышенных требований к быстродействию и точности регулирования скорости (насосы, вентиляторы, подъемно-транспортные средства и другие общепромышленные механизмы);

- преобразователи частоты мощностью 1..55 кВт с адаптивно-векторным управлением для высокоэффективных широкодиапазонных асинхронных и синхронных электроприводов, предназначенных для механизмов с повышенными требованиями к статическим и динамическим характеристикам (приводы главного движения и подачи металлорежущих станков с диапазоном регулирования скорости от 1000 до 100000 и полосой пропускания контура скорости до 100 Гц и более);

- векторный асинхронный и синхронный электропривод без датчика скорости на валу двигателя, обеспечивающий высокие динамические характеристики в диапазоне регулирования 100:1, предназначенный для механизмов, предъявляющих повышенные требования к динамике, у которых вследствие технологических особенностей установка датчика на вал двигателя не предусматривается (экструдеры, дробилки и другие механизмы химической и горно-рудной промышленности, тяговые электроприводы транспортных средств);

- рекуперативный выпрямитель мощностью 15..55 кВт с векторной системой управления, предназначенный для применения в преобразователях со звеном постоянного напряжения, реализующих функцию свободного двунаправленного обмена энергией между питающей сетью и нагрузкой с высокими энергетическими характеристиками и показателями электромагнитной совместимости. Характеризуется синусоидальным сетевым током и регулируемым коэффициентом мощности, который может устанавливаться равным единице, а также «опережающим» или «отстающим». Область применения – электропривод механизмов, значительное время работающих в генераторных режимах (подъемно-транспортные механизмы, станки, работающие с часто повторяющимися циклами разгон / торможение, механизмы с большими моментами инерции).

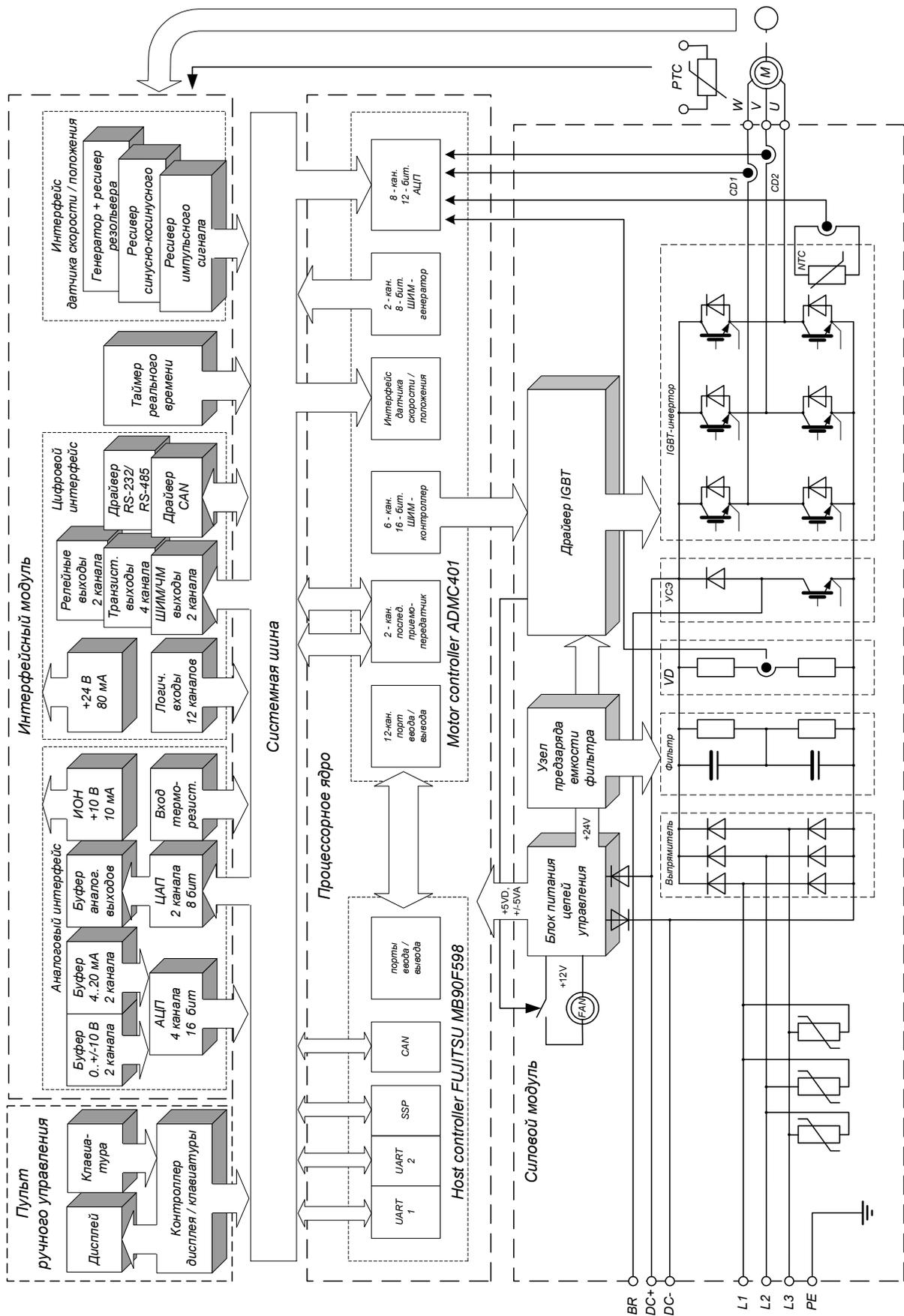


Рис.1. Функциональная схема электропривода.



Взаимосвязь основных функциональных узлов электропривода показана на функциональной схеме (рис.1).

**Силовой модуль** предназначен для преобразования сетевого напряжения постоянной частоты в напряжение переменной амплитуды и частоты для питания исполнительного двигателя.

Силовой модуль включает следующие основные элементы:

- трехфазный мостовой выпрямитель (выпрямитель) с варисторным ограничителем перенапряжения и помехоподавляющим фильтром на входе;
- емкостный фильтр звена постоянного напряжения (фильтр);
- трехфазный мостовой IGBT- инвертор;
- узел сброса энергии торможения (УСЭ), состоящий из IGBT-чоппера и внешнего балластного резистора;
- драйвер силовых ключей, обеспечивающий управление затворами IGBT, формирование сигналов защит и гальваническую развязку силовых и управляющих цепей;
- вентилятор, управляемый в функции сигнала температуры силового модуля;
- узел предзаряда конденсаторов фильтра, обеспечивающий ограничение тока заряда и плавное нарастание напряжения.

**Датчиковая система** формирует нормированные сигналы обратных связей с гальванической развязкой силовых и управляющих цепей. Она включает:

- датчик напряжения VD, состоящий из резистивного делителя и изолирующего усилителя с оптронной развязкой, установленный в звене постоянного напряжения;
- датчики тока CD1, CD2, установленные в двух выходных фазах инвертора;
- датчик температуры силового блока, состоящий из NTC-резистора, установленного в силовом модуле, и изолирующего усилителя (в преобразователях с выходным током 50 А и более датчики имеются в каждом из силовых модулей выпрямителя и инвертора);
- терморезистор защиты двигателя (РТС-резистор) со схемой компаратора и оптронной развязкой;
- инкрементальный датчик угловых перемещений, установленный на валу исполнительного двигателя.

**Блок питания цепей управления** преобразует выпрямленное сетевое напряжение в стабилизированное напряжение: +5 В для питания цифровой части системы управления; +/-5 В для питания аналоговой части системы управления; +12 В для питания вентиляторов; изолированное напряжение +24 В для питания драйвера.

**Система управления** состоит из микропроцессорного ядра, интерфейсного модуля и пульта ручного управления.

**Процессорное ядро** образовано двумя 16-ти разрядными микроконтроллерами. Служебный контроллер (host controller FUJITSU MB90F598) выполняет загрузку программ, обслуживание пульта ручного управления, коммуникационных портов, входных и выходных сигналов интерфейса, взаимодействует с контроллером управления двигателем, реализует «медленные» защиты. Контроллер управления двигателем (motor controller ADMC401), выполненный на базе DSP, обрабатывает сигналы

датчиковой системы, выполняет алгоритмы расчета регуляторов, управляет силовым модулем и обслуживает «быстрые» защиты электропривода.

**Интерфейсный модуль** включает набор средств взаимодействия с внешними управляющими устройствами. Он состоит из аналогового интерфейса, цифрового интерфейса, таймера реального времени и интерфейса датчика скорости / положения.

**Пульт ручного управления** позволяет выполнять процедуры просмотра, редактирования параметров электропривода, запуска и контроля режимов его работы. В исполнениях с выносным пультом управления диагностика состояния электропривода дополнительно выполняется с помощью светодиодного индикатора на лицевой панели блока.

На упрощенной структурной схеме системы управления асинхронным электроприводом с датчиком скорости/положения (рис. 2) показаны основные программно реализованные блоки с параметрами, доступными для просмотра и редактирования с помощью пульта ручного управления или по каналу связи с внешним управляющим устройством.

Система адаптивно-векторного управления приводом синтезирована на основе уравнений динамики асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, записанных относительно тока статора и потокосцепления ротора в синхронной ортогональной системе координат (d, q), ориентированной по вектору потокосцепления ротора. Это позволяет отдельно управлять потокосцеплением и электромагнитным моментом двигателя в каналах регулирования реактивной ( $I_d$ ) и активной ( $I_q$ ) составляющих тока статора.

Структура, параметры и алгоритмы работы регуляторов тока статора, скорости и противоЭДС синтезированы на основе принципов подчиненного регулирования с учетом дискретного характера процессов, с компенсацией влияния перекрестных связей и структурной линеаризацией контуров регулирования.

Регулятор скорости получает задание по скорости  $\omega_2$ , которое при необходимости может проходить через задатчик интенсивности и, оценивая информацию о реальной скорости  $\omega$ , формирует задание активной составляющей тока статора. Параметром ОСС\_ВКЛ/ВЫКЛ контур обратной связи по скорости может быть разомкнут и привод переводится в режим отработки задания по моменту.

Регулятор противоЭДС осуществляет формирование задания реактивной составляющей тока статора при работе привода в условиях ослабления поля при скорости двигателя, превышающей номинальную. В первой зоне регулирования скорости (вниз от номинальной) регулятор противоЭДС находится в насыщении:  $I_{dz} = I_d \text{ nom} = \text{const}$  ( $I_d \text{ nom} = \Psi_R \text{ nom} / L_m$ ;  $\Psi_R \text{ nom}$  – номинальное значение потокосцепления ротора). При отсутствии необходимого запаса по напряжению, создающего ресурс управления во второй зоне регулирования скорости, контур регулирования ЭДС заменяется контуром регулирования напряжения статора.

На выходе регулятора тока формируется задание вектора напряжения статора. Вычислитель напряжения, используя информацию с датчика в звене постоянного напряжения  $U_{DC}$ , определяет модуль задания вектора напряжения статора двига-

теля, реализует функции ограничения его максимального значения и компенсации запаздывания, вносимого системой управления.

Регулятор постоянной времени роторной цепи (РЕГУЛЯТОР Тг) производит адаптацию к температурным изменениям активного сопротивления ротора двигателя, происходящим в процессе работы электропривода.

Вектор потокосцепления ротора, его модуль  $\Psi_R$ , угловое положение и мгновенная частота вращения  $\omega_y$  вычисляются на основе информации о скорости  $\omega$ , положении ротора  $\varepsilon$  и проекциях вектора тока статора на оси d и q.

Преобразователь координат 2 (ABC  $\rightarrow$  dq) выполняет преобразование фазных токов статора из естественной трехфазной системы координат (A,B,C) в ортогональную синхронную систему координат (d, q).

Преобразователь координат 1 трансформирует вектор задания напряжения статора из синхронной системы координат в естественную (dq  $\rightarrow$  ABC). Векторный модулятор преобразует его в импульсы управления ключами IGBT-инвертора, используя метод пространственно-векторного формирования напряжения [5], и реализует алгоритм компенсации ошибок, связанных с неидеальностью ключей инвертора [2].

Блок компенсации перекрестных связей формирует сигналы, компенсирующие влияние перекрестных связей на процессы в контурах регулирования составляющих вектора тока статора.

Для управления узлом сброса энергии торможения показания датчика напряжения на конденсаторах фильтра  $U_{DC}$  сравниваются с пороговым значением. При этом оценивается знак активной составляющей вектора тока статора  $I_q$ . Таким образом, сигнал на подключение балластного резистора формируется только тогда, когда двигатель работает в генераторном режиме.

Преобразователи надежно работают в условиях существенных отклонений параметров качества питающего напряжения (форма, колебания, перекосы, импульсные помехи и прочее), не требуя при этом обязательной установки дополнительных дорогостоящих фильтров. Однако там, где эти фильтры действительно необходимы по условиям электромагнитной совместимости оборудования, например при большой длине соединительного кабеля между преобразователем и двигателем, электроприводы комплектуются фильтрами, специально разработанными НИЛ «Вектор» совместно с ООО «ЭЛПРИ» для работы с преобразователями серий ЭПВ и АПЧ. Подбор фильтров осуществляется в зависимости от частоты модуляции, типа, длины и способа укладки кабеля.

В составе комплектного электропривода преобразователи поставляются совместно с электродвигателями специального исполнения. По спецификации заказчика электродвигатели оснащаются независимой системой охлаждения, различными ти-

пами датчиков углового положения ротора, пристроенным электромагнитным тормозом.

Разработаны варианты объектно-ориентированных исполнений программного обеспечения преобразователей частоты, предназначенные для работы в составе кранового и лифтового электроприводов, комплектуемых электродвигателями специального исполнения. Эти исполнения преобразователей отличаются от ПЧ общепромышленного назначения наличием следующих свойств:

- способностью формировать номинальный момент в состоянии покоя;
- улучшенными динамическими характеристиками;
- наличием S-образного задатчика интенсивности, обеспечивающего плавные (без рывков в начальных и конечных точках) разгон / торможение привода за счет сглаживания начальных и конечных участков характеристики разгона / торможения;
- способностью работать с асинхронными и синхронными двигателями с постоянными магнитами, в том числе с двигателями специального многополюсного исполнения, предназначенными для построения безредукторных электроприводов лифтов;
- наличием функции рекуперации энергии в питающую сеть при работе привода в тормозных режимах;
- реализацией векторных алгоритмов управления в исполнениях приводов с датчиком и без датчика скорости/положения;
- интерфейсом и конструктивным исполнением, адаптированными под конкретные условия применения.

В целом технические характеристики преобразователей серии ЭПВ и комплектных электроприводов на их основе не уступают, а по ряду параметров превосходят характеристики их зарубежных аналогов. При этом стоимость электроприводов в среднем на 15–50% меньше стоимости их зарубежных аналогов соответствующего технического уровня исполнения.

## Список литературы

1. Асинхронный электропривод общепромышленного назначения с прямым цифровым управлением и развитыми интеллектуальными свойствами / А.Б. Виноградов, В.Л. Чистосердов, А.Н. Сибирцев и др. // Изв. вузов. Электротехника. – 2001. – № 3. – С. 60–67.
2. Виноградов А.Б., Чистосердов В.Л., Сибирцев А.Н. Адаптивная система векторного управления асинхронным электроприводом // Электротехника. – 2003. – № 7. – С. 7–17.
3. Виноградов А.Б. Цифровая релейно-векторная система управления асинхронным электроприводом с улучшенными динамическими характеристиками // Электротехника. – 2003. – № 6. – С. 43–51.
4. Новые серии многофункциональных векторных электроприводов переменного тока с универсальным микроконтроллерным ядром / А.Б. Виноградов, В.Л. Чистосердов, А.Н. Сибирцев и др. // Привод и управление. – 2002. – № 3. – С. 5–10.