

Современные системы управления электроприводов: структура и конструкция. Часть 1

Максим Сергеев, к. т. н. (smumail@yandex.ru)

Статья посвящена системам управления электроприводов, которые в настоящее время являются основным средством приведения в движение рабочих машин и других технических устройств. Приводятся основные сведения об электроприводах и их системах управления, предназначенных для управления преобразователем электрической энергии и электродвигателем – главными составными частями электропривода. Рассматриваются различные варианты структуры и конструкции систем управления электроприводов. Приводится описание универсального микроконтроллерного блока управления БУПЧ, который является основой систем управления преобразователями частоты для электроприводов большой и сверхбольшой мощности концерна «Русэлпром».

Введение

С объектами, приводимыми в движение электрическими двигателями (электродвигателями), мы постоянно сталкиваемся не только в промышленности и на транспорте, но и в бытовой сфере. В нашу жизнь прочно вошли такие устройства с электродвигателями, как стиральная машина, вентилятор, лифт, кондиционер, кофемолка, пылесос и др. В промышленности электродвигатели приводят в движение станки, грузоподъемные механизмы, компрессоры, конвейеры, лебедки и т.д. Можно с уверенностью сказать, что в настоящее время основным средством приведения в движение рабочих машин и других технических устройств является электродвигатель, и основным типом привода является электрический привод или, сокращённо, электропривод.

Растёт количество фирм-производителей регулируемых электроприводов, расширяются объём производства и номенклатура полупроводниковой преобразовательной техники для электроприводов, улучшаются её массогабаритные и энергетические характеристики, повышаются электромагнитная совместимость, надёжность, качество функционирования и сервисные возможности электропривода. Интенсивному развитию этого направления способствуют значительные успехи в совершенствова-

нии силовых полупроводниковых приборов и интегральных схем, развитие цифровых информационных технологий и систем микроконтроллерного управления.

Совместные усилия специалистов различного профиля привели к созданию специализированных микроконтроллеров, предназначенных для применения в электроприводах. Микроконтроллеры стали адаптированными для управления электродвигателями за счёт интеграции на кристалле центрального процессора и специальных периферийных устройств, предназначенных для его сопряжения с преобразователем электрической энергии и электродвигателем. Специализированные микроконтроллеры для применения в электроприводах получили общепринятое название Motor Control (управление двигателями) [1, 9, 17].

Общие сведения об электроприводах и их системах управления

Электроприводом (ЭП) называется управляемая электромеханическая система, предназначенная для преобразования электрической энергии в механическую и обратно с целью приведения в движение исполнительного органа (ИО) рабочей машины, а также для управления этим процессом. Рабочая машина – устройство, которое использует механическую энергию для преобразования формы, свойств,

состояния и положения объектов труда. Структурная схема ЭП приведена на рис. 1.

Любой ЭП состоит из двух частей (каналов): силового (голубой и зелёный цвета, широкие линии на рис. 1) и информационного (красный и жёлтый цвета, тонкие линии на рис. 1). По первому каналу осуществляется передача преобразуемой энергии, по второму каналу – управление потоком энергии, а также сбор и обработка информации о состоянии ЭП [7, 8].

Силовой канал ЭП состоит из двух частей: электрической (голубой цвет на рис. 1) и механической (зелёный цвет на рис. 1), которые имеют связующее звено – электромеханический преобразователь (ЭМП).

ЭМП – электротехническое устройство, предназначенное для преобразования электрической энергии в механическую или механической энергии в электрическую. Основным видом ЭМП являются электродвигатели (ЭД), которые по роду тока можно разделить на ЭД постоянного и переменного тока. ЭД переменного тока подразделяются в основном на асинхронные (АД) и синхронные (СД). Если в ЭП применяется ЭД постоянного тока, то он называется ЭП постоянного тока, а если ЭД переменного тока – ЭП переменного тока.

В электрическую часть силового канала ЭП входят следующие два устройства:

- СПУ – силовое преобразовательное устройство (преобразователь электрической энергии);
- ЭД.

В двигательном режиме работы они преобразуют электрическую энергию, поступающую из источника электрической энергии (ИЭЭ), в механическую энергию на валу ЭД. В генераторном режиме работы (например, при рекуперативном торможении) они преобразуют механическую энергию в электрическую, которая поступает обратно в ИЭЭ. В качестве источника электрической энергии используется электри-

ческая сеть или накопитель электрической энергии.

СПУ – электротехническое устройство, предназначенное для преобразования параметров электрической энергии (род тока, напряжение, частота, число фаз), основой которого являются полупроводниковые приборы: транзисторы, тиристоры и диоды. СПУ состоит из одного или нескольких полупроводниковых преобразователей и определённого набора электротехнических элементов и устройств: конденсаторов, резисторов, дросселей, трансформаторов, предохранителей, автоматических выключателей и др. Полупроводниковые преобразователи бывают управляемые – транзисторные или тиристорные, и неуправляемые – диодные (выпрямители). В ЭП переменного тока СПУ называется преобразователем частоты (ПЧ), который изменяет частоту и амплитуду (действующее значение) подаваемого на ЭД напряжения [4].

Механическая часть силового канала ЭП состоит из следующих двух устройств:

- подвижная часть ЭД (ротор);
- ПМ – передаточный механизм.

Они передают механическую энергию от ротора ЭД к ИО рабочей машины, который совершает полезную работу.

ПМ – механическое устройство, предназначенное для передачи и преобразования механической энергии от ЭД к ИО рабочей машины. Возможны три варианта передачи и преобразования механической энергии:

- вращательное движение ротора ЭД передаётся к ИО без преобразования;
- вращательное движение ротора ЭД передаётся к ИО с изменением скорости вращения и крутящего момента;
- вращательное движение ротора ЭД преобразуется в поступательное движение ИО.

Информационный канал ЭП состоит из двух частей – системы управления электропривода (СУ ЭП) и следующих устройств сопряжения СУ ЭП с силовым каналом (жёлтый цвет на рис. 1) [2, 3]:

- ДР – драйверы полупроводниковых приборов (транзисторов или тиристоров)¹;
- ДЭ – датчики электрических параметров (напряжений и токов на входе и выходе СПУ)¹;

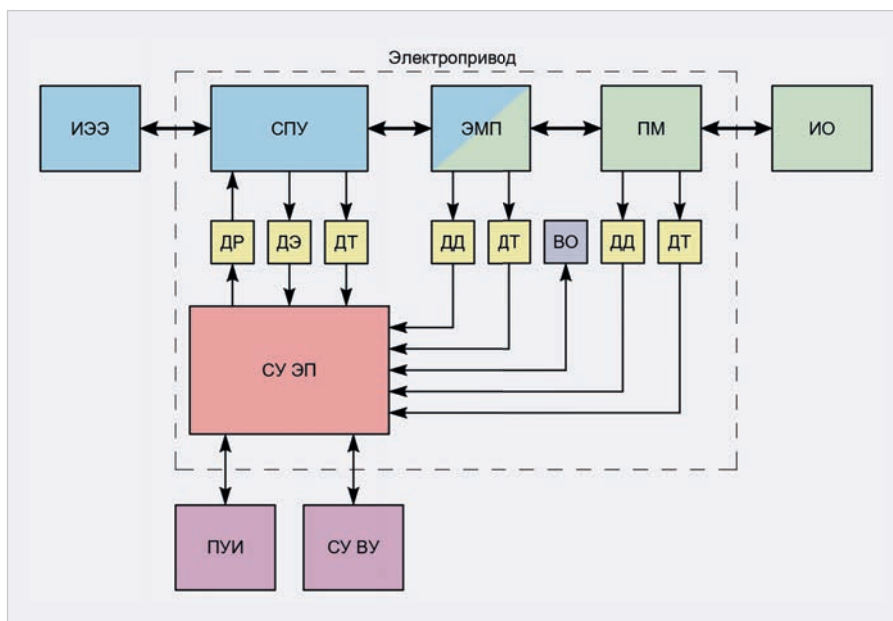


Рис. 1. Структурная схема ЭП

- ДД – датчики параметров движения (угла поворота, скорости вращения, углового ускорения и крутящего момента ЭД или ИО)²;
- ДТ – датчики температуры (полупроводниковых приборов, обмоток и сердечников дросселей и трансформаторов СПУ, обмоток, сердечников и подшипников ЭД, редуктора ПМ). Кроме того, в состав ЭП входит вспомогательное оборудование (ВО) – различные устройства, которые поддерживают работу основного оборудования ЭП: системы охлаждения СПУ и ЭД, коммутационные и защитные устройства и т.д.

СУ ЭП предназначена для управления СПУ и ЭД с целью обеспечения заданного движения ИО и состоит из следующих трёх частей (подсистем):

- измерительно-информационная, обеспечивающая приём и обработку сигналов от датчиков параметров движения, электрических параметров и температуры;
- информационно-управляющая, которая реализует определённые алгоритмы управления, контроля и защиты СПУ и ЭД, и формирует сигналы управления транзисторами (тиристорами) и другими устройствами, входящими в состав ЭП;
- информационно-коммуникационная, осуществляющая информационное взаимодействие с пультом управления и индикации (ПУИ), системой управления более высокого уровня (СУ ВУ) и другими внешними по отношению к ЭП устройствами³.

Драйверы полупроводниковых приборов – устройства, которые предназначены для управления, контроля и защиты транзисторов (тиристоров). Драйверы обеспечивают гальваническую изоляцию и усиление по напряжению и току маломощных сигналов управления, поступающих из СУ ЭП, в более мощные сигналы, необходимые для включения/выключения транзисторов (тиристоров), а также их выключение при возникновении аварийных ситуаций. Драйверы транзисторов (тиристоров) можно рассматривать не только как устройства сопряжения с силовым каналом ЭП, но и как СУ этими полупроводниковыми приборами.

ПУИ предназначен для ручного управления и контроля ЭП: включения/выключения, задания режимов работы и параметров ЭП с помощью

¹ Драйверы транзисторов (тиристоров) и датчики электрических параметров входят в состав СПУ.

² В случае поступательного движения ИО вместо датчиков угловых перемещения, скорости, ускорения и крутящего момента ИО применяются датчики линейных перемещения, скорости, ускорения и тягового усилия ИО.

³ СУ ЭП может осуществлять информационное взаимодействие не только с ПУИ и СУ ВУ, но и с другими внешними устройствами, например, главным распределительным устройством (ГРУ, ГРЩ) и рабочей машиной, которые не показаны на рис. 1.

органов управления (кнопок, переключателей и/или сенсорного жидкокристаллического дисплея), а также наблюдения за состоянием ЭП с помощью приборов индикации (ламп и/или жидкокристаллического дисплея). ПУИ может входить в состав СПУ (встроенный ПУИ) или располагаться на расстоянии от него (выносной ПУИ).

СУ ВУ предназначена для управления технологическим процессом, рабочей машиной как его частью и, соответственно, ЭП, который приводит в движение ИО рабочей машины. СУ ВУ называется СУ электроприводом – она является внешней для ЭП системой и осуществляет автоматическое управление и контроль ЭП: включение/выключение, задание режимов работы и параметров движения ЭП, контроль и наблюдение за его состоянием (мониторинг).

Таким образом, ЭП осуществляет энергетическое взаимодействие с источником электрической энергии и рабочей машиной, информационное взаимодействие с СУ ВУ, а также имеет возможность взаимодействовать с человеком-оператором через ПУИ, когда требуется вручную изменить какие-либо параметры ЭП или наблюдать за его состоянием.

СУ ЭП, как правило, входит в состав СПУ, и вместе они представляют собой регулируемый источник питания (ИП), который изменяет параметры источника электрической энергии (напряжение и частота) в соответствии с определённым алгоритмом. Поэтому можно считать, что в ЭП постоянного тока ЭД подключается к регулируемому ИП, который изменяет среднее (действующее) значение напряжения, подаваемого на него, а в ЭП переменного тока регулируемый ИП изменяет частоту и амплитуду (действующее значение) подаваемого на ЭД напряжения.

По мощности ЭП можно условно разделить на следующие группы [11]:

- малой мощности (до 10 кВт);
- средней мощности (10–250 кВт);
- большой мощности (250–1000 кВт);
- сверхбольшой мощности (более 1 МВт).

В настоящее время ЭП с ЭД переменного тока и полупроводниковыми ПЧ занял лидирующее положение среди других типов регулируемого ЭП в промышленности. Расширение рынка ПЧ обусловлено растущей промыш-

ленной автоматизацией и совершенствованием подходов к повышению энергоэффективности. Среди ЭД переменного тока самыми распространёнными являются АД. Это связано с простотой конструкции, высокой надёжностью и экономичностью АД. Хотя достаточно часто в промышленности применяются и СД.

В качестве полупроводниковых ПЧ наиболее широкое применение получили ПЧ с промежуточным звеном постоянного тока на основе двух полупроводниковых преобразователей: управляемых (АВН) или неуправляемых (НВ) выпрямителей напряжения и автономных инверторов напряжения (АИН). АВН и АИН реализованы в основном на базе IGBT-транзисторов, а НВ – на базе диодов. АВН являются намного более перспективными, чем НВ, так как могут обеспечить заданный коэффициент мощности, меньше искажают электрическую сеть и позволяют рекуперировать накопленную при движении ИО кинетическую энергию обратно в источник электрической энергии при торможении ИО (если имеется техническая возможность рекуперации) [6].

Учитывая изложенное в предыдущих двух пунктах, в данной статье рассматриваются ЭП переменного тока с ПЧ на основе АВН и АИН, в которых применяются IGBT-транзисторы. Несмотря на то, что главное внимание в данной статье уделено ЭП переменного тока, основные принципы построения СУ ЭП, особенности их структуры и конструкции, рассмотренные в ней, могут быть использованы при проектировании и ЭП постоянного тока.

ЭП, в зависимости от типа регулируемого параметра движения, бывают позиционными, скоростными и моментными. Система автоматического регулирования (САР) стабилизирует или изменяет по заданному закону положение (угол поворота или линейное перемещение), скорость (скорость вращения или линейную скорость) или момент (крутящий момент или тяговое усилие) ИО. В ЭП применяются в основном системы подчинённого регулирования параметров движения, когда САР имеет несколько контуров, каждый из которых имеет свой регулятор и подчиняется вышестоящему контуру. Например, позиционные СУ ЭП имеют три контура регулирования: положения, скорости

и тока (момента). Контур регулирования положения является внешним и самым медленным, а контур регулирования тока (момента) – внутренним и самым быстрым [13].

Современные СУ ЭП построены в основном на базе микроконтроллеров (МК) и, как любая микроконтроллерная система управления (МКСУ), состоят из аппаратной и программной частей: аппаратного обеспечения и программного обеспечения (ПО). Разработка ПО для СУ ЭП является сложной технической задачей, и её решение основано на применении специальных алгоритмов управления ЭП. Поэтому, кроме аппаратного и программного обеспечения, для СУ ЭП имеет важное значение алгоритмическое обеспечение, которое можно рассматривать как составную часть ПО или как отдельную часть, входящую в состав СУ ЭП.

Современные СУ ЭП имеют полное цифровое управление (без аналоговых регуляторов), их аппаратное обеспечение реализовано либо на базе высокопроизводительных МК с RISC-архитектурой (например, ARM и RISC-V), либо на базе специализированных (для управления ЭП) цифровых сигнальных контроллеров (ЦСК или, в зарубежной литературе, DSC) [2, 3, 10].

В современных СУ ЭП внутренние контуры регулирования (тока или момента) всё чаще выполняют на основе программируемых логических микросхем (ПЛИС или, в зарубежной литературе, FPGA и CPLD), которые имеют максимальное быстродействие за счёт параллельного выполнения вычислений, или специализированных для этого применения микросхем (СИС или, в зарубежной литературе, ASIC). ПЛИС являются полностью цифровыми устройствами и не имеют встроенного аналого-цифрового преобразователя (АЦП), поэтому к ним необходимо подключать внешний АЦП. СИС могут иметь встроенный АЦП, но чаще им тоже требуется подключение внешнего АЦП [12].

Учитывая изложенное в предыдущих двух пунктах, современные СУ ЭП правильнее называть не микроконтроллерными, а цифровыми, так как они могут быть построены на базе не только МК или ЦСК, но также ПЛИС или СИС. Поэтому цифровые СУ ЭП – более широкое понятие, а микрокон-

троллерные – более узкое, являющееся частью цифровых.

В настоящее время для автоматического управления промышленным оборудованием и технологическими процессами широко применяются специальные электронные устройства – программируемые логические контроллеры (ПЛК). В СУ ЭП они используются для выполнения вспомогательных задач: приёма и обработки сигналов от дискретных и аналоговых датчиков, управления исполнительными устройствами, реализации интерфейсов для связи с другими устройствами управления [5].

Данная статья написана автором на основе изучения соответствующей технической литературы, современных российских и зарубежных СУ ЭП, а также его личного опыта разработки СУ ЭП и СУ ИП.

Структура современных систем управления электроприводов переменного тока

В настоящее время существует большое разнообразие СУ ЭП переменного тока, которые применяются в различных областях промышленности. Но если проанализировать их состав, схемотехнику, конструкцию и выполняемые функции, то можно прийти к выводу, что они имеют в основном распределённо-централизованную структуру и состоят из следующих частей (рис. 2):

- ЛСУ – локальные СУ, осуществляющие управление, контроль и защиту одного из транзисторных преобразователей (ТП), входящих в состав ПЧ (например, АВН или АИН);
- ЦСУ – центральная (главная) СУ, которая управляет ЛСУ и координирует их работу, осуществляет информационное взаимодействие с ПУИ, СУ ВУ и другими внешними устройствами, а также общее управление ЭП;
- ПЛК – программируемый логический контроллер, который расширяет возможности ЦСУ по дискретным и аналоговым входам/выходам, цифровым и аналоговым интерфейсам, увеличивая их количество, если оно недостаточно для управления ЭП.

ЛСУ принимает и обрабатывает сигналы от датчиков напряжения, тока и температуры транзисторного преобразователя, формирует по определённому алгоритму сигналы управления IGBT-транзисторами для регулирова-

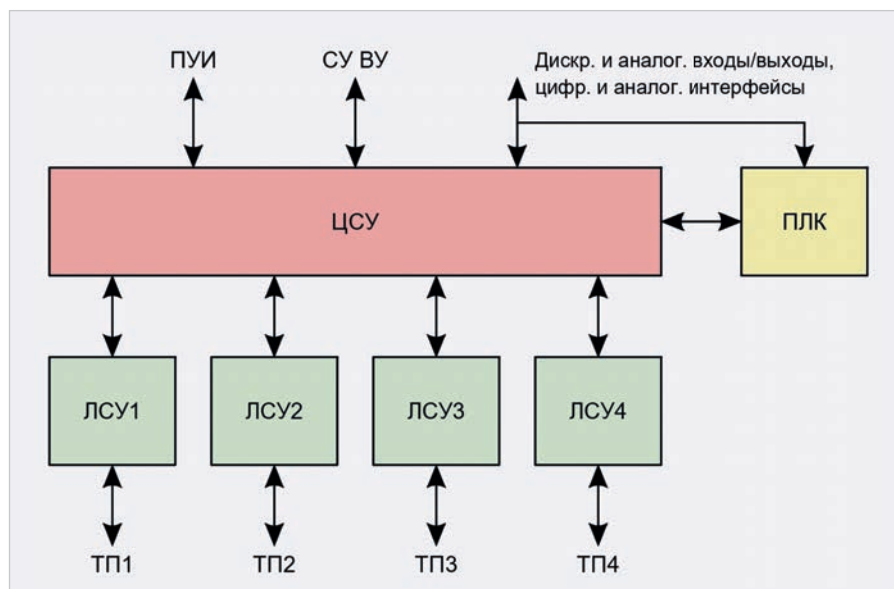


Рис. 2. Структурная схема распределённо-централизованной СУ ЭП

ния параметров движения и электрических параметров в соответствии с заданными значениями, поступающими из ЦСУ, а также выключает транзисторный преобразователь при возникновении аварийных ситуаций в ЭП. ЛСУ обязательно имеет внутренний, самый быстрый, контур регулирования – тока (момента).

ЦСУ осуществляет информационное взаимодействие с ЛСУ, ПУИ, СУ ВУ и другими внешними устройствами, приём и обработку сигналов от датчиков (температуры ПЧ и ЭД, давления и расхода охлаждающей жидкости, концевых выключателей и т.д.), контроль и управление системами охлаждения и антиконденсатного подогрева ПЧ и ЭД посредством дискретных и аналоговых сигналов, цифровых и аналоговых интерфейсов. Кроме того, ЦСУ управляет входным автоматическим выключателем, устройством предварительного заряда конденсаторов в звене постоянного тока и выполняет другие вспомогательные функции. ЦСУ принимает из ПУИ или СУ ВУ команды управления, заданные режимы работы и значения параметров движения ЭП и передаёт обратно измеренные значения параметров движения, а также информацию о состоянии ЭП для его контроля и мониторинга. ЦСУ содержит внешний, самый медленный, контур регулирования – положения¹ (в позиционных ЭП) и контур регулирования скорости².

Для увеличения количества входов/выходов и интерфейсов вместо ПЛК можно применять специальные платы расширения, например, плату рас-

ширения дискретных входов/выходов, плату расширения аналоговых входов/выходов и т.д. Однако применение ПЛК является более универсальным подходом, так как в настоящее время рынок ПЛК предлагает большой выбор таких устройств, а использование плат расширения требует их разработки и изготовления, что может оказаться экономически невыгодным из-за увеличения их стоимости и срока поставки по сравнению с ПЛК.

Управление ЭП является сложной задачей – многоуровневой и иерархической, которую осуществляет комплекс управления ЭП, имеющий как минимум четыре уровня. Нижний его уровень образуют драйверы IGBT-транзисторов, более высокий уровень занимают ЛСУ, далее следует ЦСУ и на самом высоком уровне находится СУ ВУ. Однако в сложных технологических процессах верхний уровень управления ЭП может иметь несколько подуровней, и тогда СУ ВУ сама может являться подсистемой для СУ ещё более высокого уровня [8].

ЛСУ и ЦСУ являются обязательными частями СУ ЭП. Каждый ПЧ имеет несколько ЛСУ (как минимум, две) – их количество соответствует количеству транзисторных преобразова-

¹ В некоторых ЭП контур регулирования положения реализован в СУ ВУ, которая передаёт в ЦСУ заданное значение угловой (линейной) скорости ИО.

² Контур регулирования скорости может быть реализован либо в ЦСУ, либо в ЛСУ – в зависимости от структуры и схемотехники СУ ЭП.

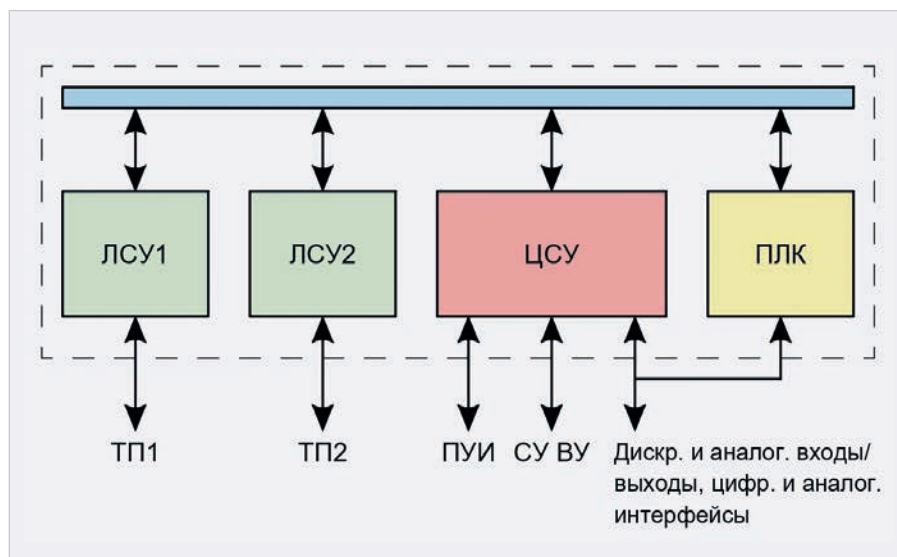


Рис. 3. Структурная схема централизованной СУ ЭП (ВБУ ЭП)

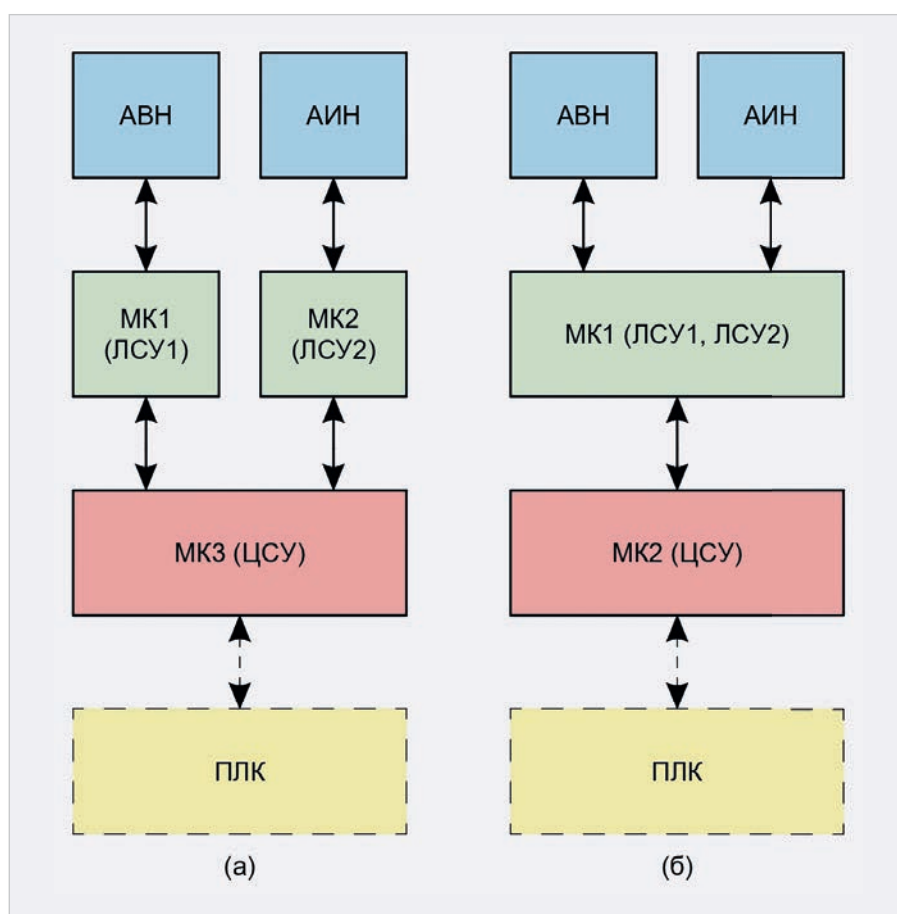


Рис. 4. Структура СУ ЭП – вариант 1

лей. Например, ПЧ для обычного АД имеет две ЛСУ: одна управляет АВН, а другая – АИН. А ПЧ для двухобмоточного АД имеет четыре ЛСУ: две из них управляют двумя АВН, а две другие – двумя АИН.

ПЛК является необязательной частью СУ ЭП: он используется в тех случаях, когда ЦСУ имеет недостаточное количество дискретных и анало-

говых входов/выходов, цифровых и аналоговых интерфейсов, и их необходимо увеличить. Однако в случае применения высокопроизводительного ПЛК, который сможет выполнять функции ЦСУ, он позволяет значительно упростить структуру СУ ЭП – она будет состоять только из ЛСУ и ПЛК.

Если повысить степень интеграции СУ ЭП и объединить ЛСУ, ЦСУ и ПЛК в

одном корпусе, то получится устройство, которое можно назвать высокоинтегрированным блоком управления ЭП (ВБУ ЭП), выполняющим все функции СУ ЭП (рис. 3) [14].

ВБУ ЭП имеет централизованную структуру с внутренним распределением функций, состоящую из нескольких частей – СУ (контроллеров). Каждый контроллер выполняет определённую функцию, например, контроллер ТП1 (ЛСУ1), контроллер ТП2 (ЛСУ2), главный контроллер (ЦСУ) и ПЛК.

Преимуществами ВБУ ЭП являются повышение помехозащищённости, снижение массогабаритных характеристик и стоимости за счёт расположения всех его частей в одном корпусе, а недостатками – высокая трудоёмкость разработки такого устройства, небольшое количество ЛСУ, входящих в его состав (из-за габаритных ограничений), а также более высокая сложность разработки и тестирования ПО.

Для реализации современных алгоритмов управления ЭП переменного тока, требующих быстродействующих контуров регулирования тока (момента), ЛСУ должны иметь высокое быстродействие, поэтому их можно реализовать либо на базе высокопроизводительных МК с RISC-архитектурой или специализированных ЦСК, либо на базе ПЛИС или СИС. Для ЦСУ быстродействие не является очень важным, поэтому они могут быть реализованы на базе МК с RISC-архитектурой, имеющих среднюю производительность, но достаточное количество входов/выходов и интерфейсов.

СУ ЭП как объект проектирования включает в себя следующие пять составляющих:

- структура;
- элементная база;
- схемотехника;
- конструкция;
- ПО.

Примечание: СУ обычно являются составной частью ПЧ, поэтому приведённые выше составляющие СУ ЭП как объекта проектирования нужно рассматривать с учётом структуры, элементной базы, схемотехники и конструкции ПЧ.

Процесс проектирования СУ ЭП включает все эти составляющие, между ними существует определённая взаимосвязь (в большей или меньшей степени), но начинается он всегда с создания структуры на основании заданных технических требо-

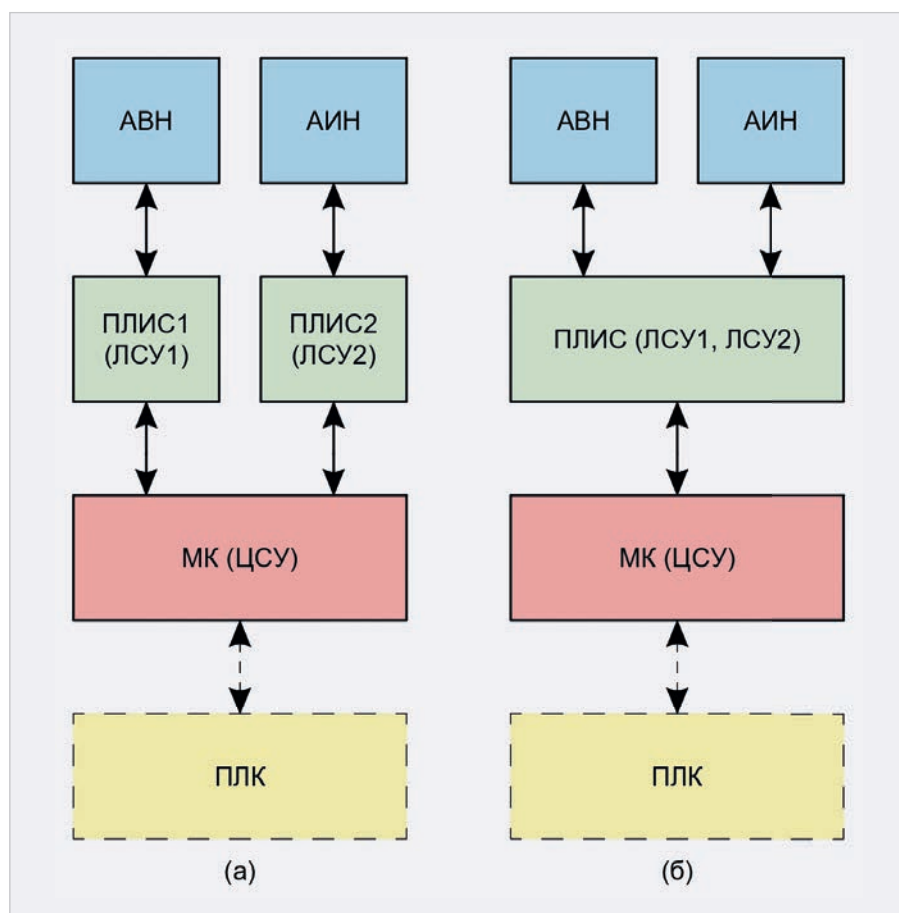


Рис. 5. Структура СУ ЭП – вариант 2

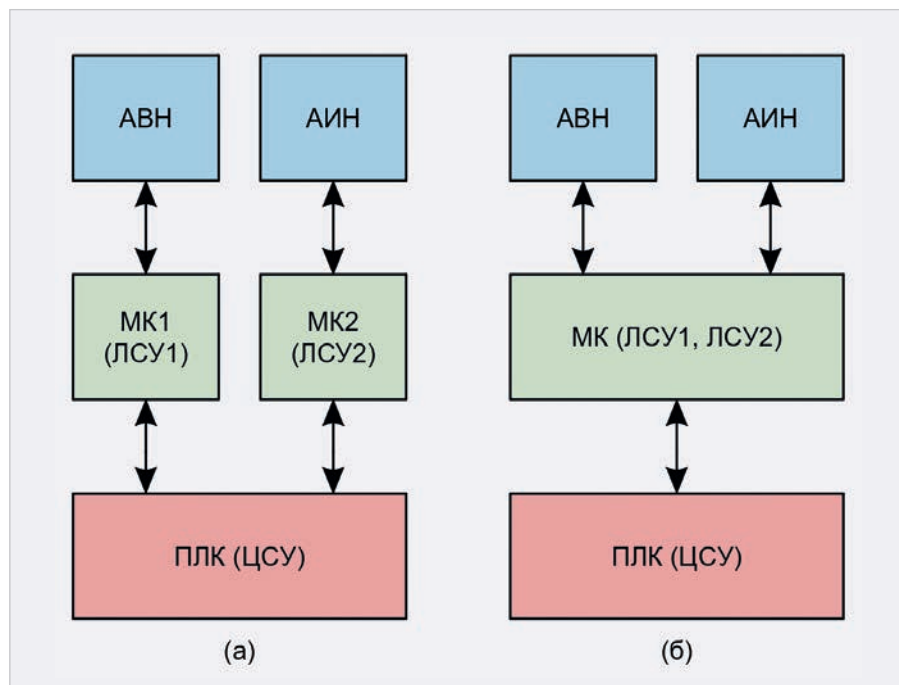


Рис. 6. Структура СУ ЭП – вариант 3

ваний, с учётом элементной базы, схемотехники и конструкции, которые в начале определяются приблизительно, а затем (в процессе проектирования) уточняются. Несмотря на большое количество вариантов построения СУ ЭП, можно выделить следующие

основные пять вариантов их структуры, отличающихся элементной базой, схемотехникой и конструкцией (рис. 4–7):

- ЛСУ и ЦСУ реализованы на базе двух или трёх МК: МК1 управляет АВН, МК2 – АИН, а МК3 выполняет функ-

ции ЦСУ (рис. 4а), или МК1 управляет АВН и АИН, а МК2 выполняет функции ЦСУ (рис. 4б);

- ЛСУ реализованы на базе одной или двух ПЛИС (СИС), а ЦСУ построено на базе МК: ПЛИС1 управляет АВН, ПЛИС2 – АИН, а МК выполняет функции ЦСУ (рис. 5а), или ПЛИС управляет АВН и АИН, а МК выполняет функции ЦСУ (рис. 5б);
- ЛСУ реализованы на базе одного или двух МК, а ЦСУ построено на базе ПЛК: МК1 управляет АВН, МК2 – АИН, а ПЛК выполняет функции ЦСУ (рис. 6а), или МК управляет АВН и АИН, а ПЛК выполняет функции ЦСУ (рис. 6б);
- ЛСУ реализованы на базе одной или двух ПЛИС (СИС), а ЦСУ построено на базе ПЛК: ПЛИС1 управляет АВН, ПЛИС2 – АИН, а ПЛК выполняет функции ЦСУ (рис. 7а), или ПЛИС управляет АВН и АИН, а ПЛК выполняет функции ЦСУ (рис. 7б);
- ЛСУ и ЦСУ реализованы на базе одного МК, который управляет АВН, АИН и выполняет функции ЦСУ (рис. 7в).

Примечание: в вариантах 1, 2 и 5 к ЦСУ может быть подключён ПЛК (пунктирные линии на рис. 4, 5 и 7), который будет расширять её возможности по входам/выходам и интерфейсам. В вариантах 3, 4 ЦСУ реализована на базе ПЛК, поэтому она не имеет ограничений по входам/выходам и интерфейсам.

Приведённые выше варианты структуры СУ ЭП имеют несколько подвариантов, которые отличаются конструкцией, – в зависимости от количества плат, на которых они расположены. Например, в первом и втором вариантах в случае применения трёх МК или двух ПЛИС (СИС) и МК они могут быть расположены на трёх платах (рис. 8а), двух платах (рис. 8б) или одной плате (рис. 8в). При использовании двух МК или одной ПЛИС (СИС) и МК они могут быть расположены на двух платах (рис. 8г) или одной плате (рис. 8д).

В третьем и четвёртом вариантах в случае применения двух МК или двух ПЛИС (СИС) они могут быть расположены на двух платах (рис. 9а) или одной плате (рис. 9б). При использовании одного МК или одной ПЛИС они располагаются на одной плате.

Пятый вариант построения СУ ЭП является одноплатным, и он требует применения высокопроизводительного МК, имеющего достаточное коли-

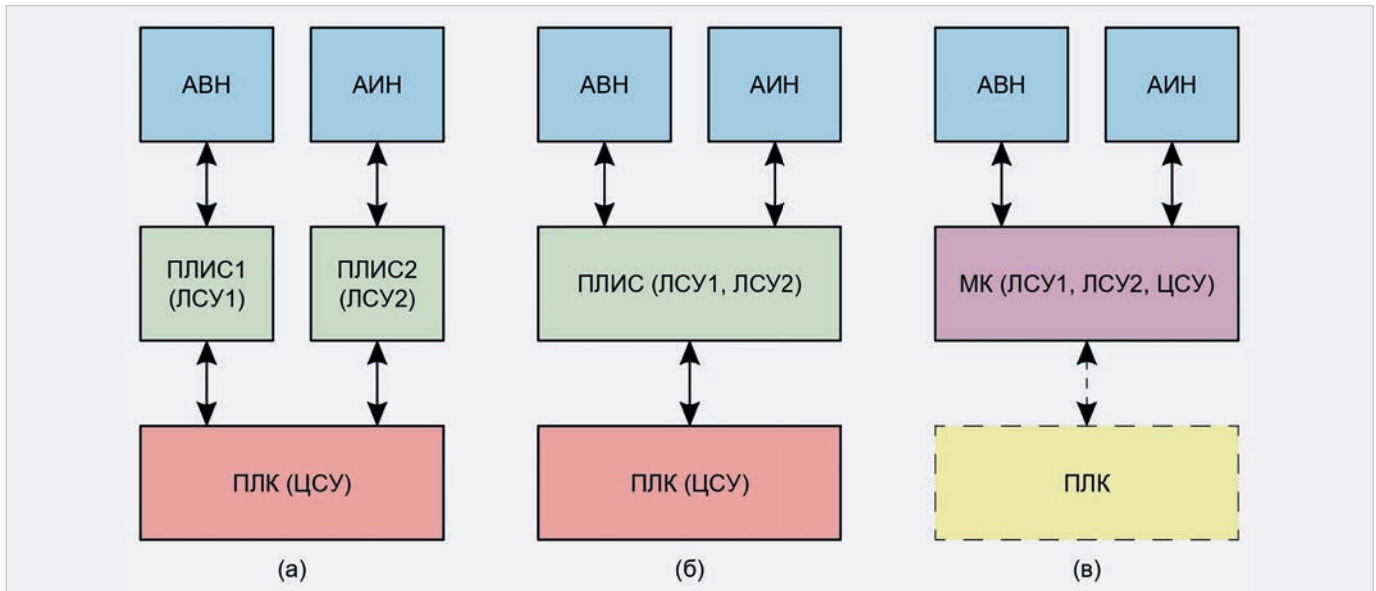


Рис. 7. Структура СУ ЭП – варианты 4, 5

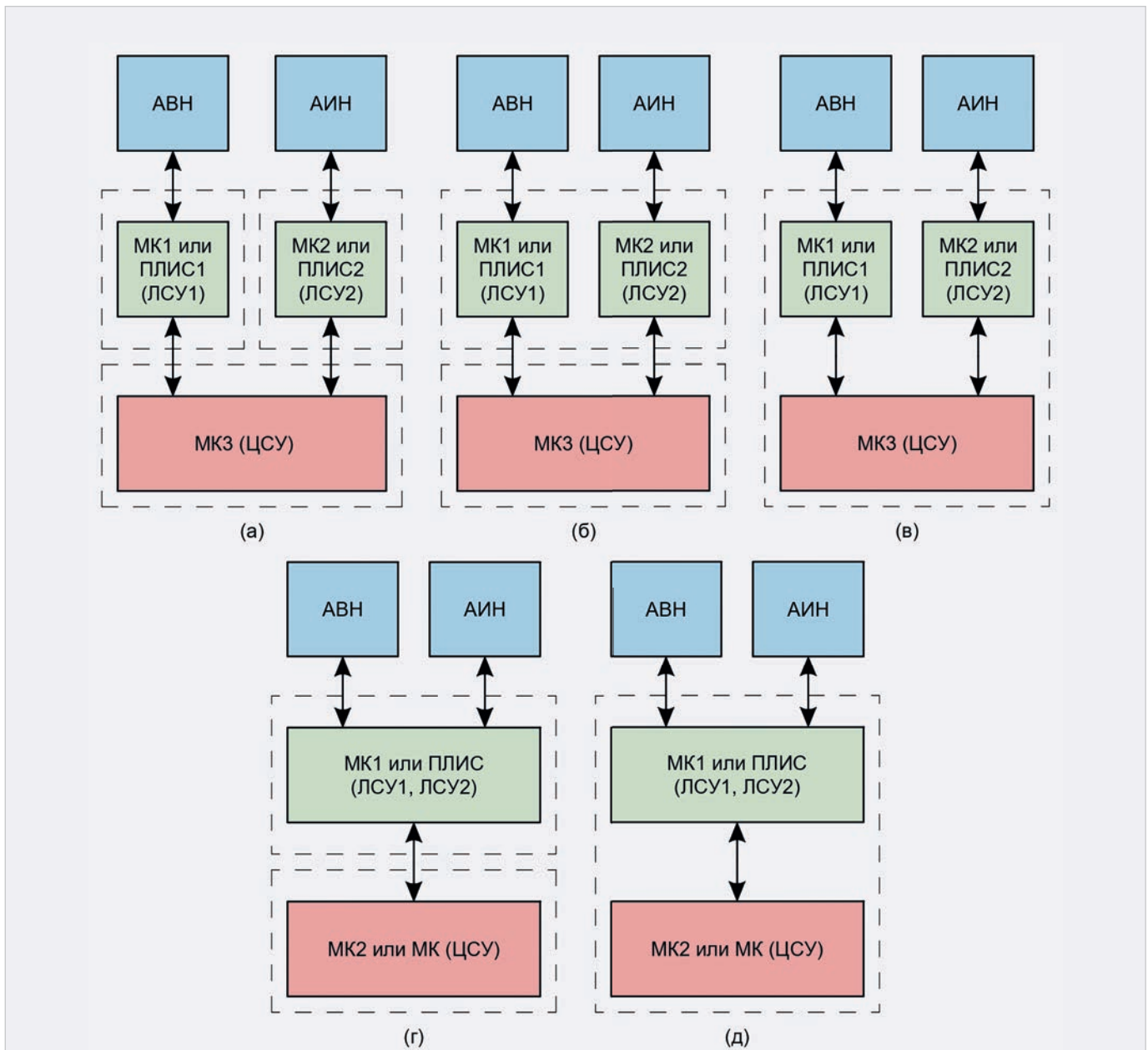


Рис. 8. Структура СУ ЭП – варианты 1, 2 с разным количеством плат

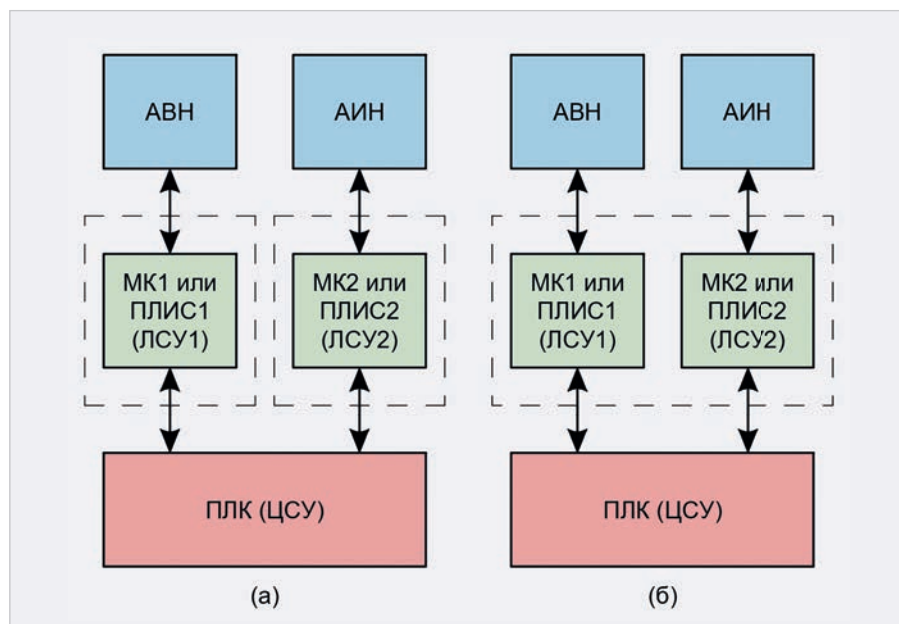


Рис. 9. Структура СУ ЭП – варианты 3, 4 с разным количеством плат

чество периферийных устройств и интерфейсов, необходимых для управления ПЧ и информационного взаимодействия с ПУИ и СУ ВУ.

Примечание: на рис. 8, 9 пунктирными линиями показаны платы, на которых расположены ЛСУ и ЦСУ.

Обмен информацией между ЛСУ и ЦСУ осуществляется обычно по последовательному интерфейсу. Хотя, если ЛСУ и ЦСУ расположены на одной плате, для обмена информацией между ними может использоваться и параллельный интерфейс. ЦСУ и ПЛК осуществляют информационное взаимодействие друг с другом по последовательному интерфейсу.

Каждый из приведённых выше вариантов структуры СУ ЭП имеет свои особенности, преимущества и недостатки. Для каждого проекта желательно создать оптимальную структуру СУ ЭП на основе анализа технических требований к ней с учётом элементной базы, схемотехники и конструкции как СУ, так и ПЧ. Критериями оптимальности СУ ЭП могут быть следующие её характеристики и показатели: массогабаритные характеристики, себестоимость, удельная функциональность¹ и функциональная себестоимость².

¹ Удельная функциональность – отношение количества функций, выполняемых СУ ЭП, к её объёму.

² Функциональная себестоимость – отношение количества функций, выполняемых СУ ЭП, к её себестоимости.

Заключение

Вторая часть статьи будет посвящена конструкции СУ ЭП. В последнее время совершенствованию конструкции ПЧ и СУ, которые ими управляют, уделяется повышенное внимание инженеров. Это происходит благодаря основным тенденциям в силовой электронике и микропроцессорной технике: повышению степени интеграции и функциональности и снижению массогабаритных характеристик.

Литература

1. Абакумов А.М. Электрический привод. Ч. 1. Электроприводы постоянного тока: учеб. пособ. / А.М. Абакумов, П.В. Тулупов, Ю.А. Чабанов. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. 123 с.
2. Анучин А.С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. 373 с.
3. Баховцев И.А. Микропроцессорные системы управления устройствами силовой электроники: структуры и алгоритмы: учебное пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. 219 с.
4. Гельман М.В. Преобразовательная техника: учебное пособие / М.В. Гельман, М.М. Дудкин, К.А. Преображенский. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. 425 с.
5. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудова-

нием. М.: Горячая линия–Телеком, 2014. 606 с.

6. Ефимов А.А., Шрейнер Р.Т. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока. Новоуральск: Изд-во НГТИ, 2001. 250 с.
7. Ильинский Н.Ф. Основы электропривода: учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Издательство МЭИ, 2003. 224 с.
8. Ильинский Н.Ф., Козаченко В.Ф. Общий курс электропривода: учеб. для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1992. 544 с.
9. Козаченко В.Ф. Основные тенденции развития встроенных систем управления двигателями и требования к микроконтроллерам // Новости о микросхемах. CHIP NEWS. 1999. № 1 (34). С. 2–10.
10. Козаченко В.Ф. Микроконтроллерные системы управления электроприводами: современное состояние и перспективы развития. URL: <http://www.motorcontrol.ru>.
11. Медведев В.А. Конструирование преобразователей: электронное учеб. пособие. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2015. 159 с.
12. Мелешин В., Овчинников Д. Управление транзисторными преобразователями электроэнергии. М.: Техносфера, 2011. 576 с.
13. Москаленко В.В. Электрический привод: учебник для студ. высш. учеб. заведений. М.: Издательский центр «Академия», 2007. 368 с.
14. Сергеев М.Ю. Современное состояние и перспективы развития преобразователей частоты для судовых систем электродвижения // Российская Арктика. 2025. Т. 7. № 2. С. 23–36.
15. Сергеев М., Улитовский Д. БУПЧ – высокоинтегрированный микропроцессорный блок управления для судовых преобразователей частоты // Силовая электроника. 2025. № 2. С. 22–29.
16. Сергеев М., Никулкин К., Максимов А. ТТМ-1000 – высокоинтеллектуальный силовой модуль для судовых преобразователей частоты // Силовая электроника. 2025. № 3. С. 28–35.
17. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРО РАН, 2000. 654 с.

