



УДК 62-581

М. П. Белов, Р. А. Кахоров, В. А. Новиков, А. А. Прокопов  
Санкт-Петербургский государственный электротехнической  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## **Развитие энергосберегающих электроприводных систем и способов повышения их эффективности в технологиях**

*Дан анализ тенденций развития энергосберегающих электроприводных систем, систем «электронный преобразователь – электродвигатель». Рассмотрена типовая структура системы управления технологическим комплексом, выполненной на базе интегрированных электроприводных систем. Проанализированы способы повышения эффективности электроприводных систем в технологиях на примере многоагрегатных насосных станций.*

### **Энергосберегающие электроприводные системы, способы повышения эффективности систем в технологиях, системы управления насосными агрегатами и станциями**

#### **Развитие энергосберегающих электроприводных систем**

**Общие тенденции развития.** Анализ мирового опыта создания нового и модернизации действующего технологического оборудования показывает высокую динамику развития регулируемых электроприводных систем (ЭПС) совместно с компьютерными средствами автоматизации и информационными системами. Она обусловлена стремлением к максимальному повышению производительности технологического оборудования и качества производимой продукции. Все ведущие электротехнические корпорации выпускают регулируемые электроприводы в комплекте с компьютерными средствами автоматизации в виде интегрированных электроприводных систем (ИЭПС). Средства, вложенные в такие системы, при их применении для конкретной технологии окупаются наиболее быстро. Регулируемые электроприводы совместно с технологическими устройствами используются в качестве средств управления технологическими переменными – уровнем, давлением, влажностью, температурой, дозированием и др. Они нацелены на широкое применение для разнообразных технологий во всех отраслях промышленности, на транспорте, в системах городского хозяйства. Выполняют подобные системы на платформе электроприводной техники, являющейся составной частью комплексной системы автоматизации.

ИЭПС машин и технологических комплексов включают в себя следующие компоненты: многодвигательные комплектные электроприводы, источники электропитания электроприводов, силовые электросети и коммутационно-защитную аппаратуру, программируемые контроллеры управления движением, технологические контроллеры (программируемые логические контроллеры), информационные сети, человеко-машинные интерфейсы, устройства удаленного ввода-вывода, датчики.

Выделим основные способы сбережения электроэнергии в ЭПС технологических агрегатов и комплексов:

1. Применение силовых модулей регулируемых электроприводов, имеющих максимальные коэффициенты полезного действия и мощности. Главные из них – электродвигатели, управляемые полупроводниковые преобразователи (выпрямители, инверторы, преобразователи частоты (ПЧ)), тормозные модули, обеспечивающие рекуперацию электроэнергии от двигателя в сеть переменного или постоянного напряжения. Максимально возможное исключение потерь электроэнергии при использовании тормозных резисторов. Эксплуатация электрооборудования при номинальных параметрах.

2. Уменьшение потока  $i$ , соответственно, тока намагничивания асинхронного электродвигателя, а тем самым и уменьшение потерь мощности при

малых нагрузках электропривода, учитывая то, что ток намагничивания  $I_{\mu}$ , создающий магнитное поле, представляет собой значительную часть тока статора, а в номинальном режиме  $I_{\mu \text{ ном}} = (0.35...0.40) I_{1 \text{ ном}}$ , где  $I_{1 \text{ ном}}$  – номинальный ток статора.

3. Уменьшение установленной мощности электрооборудования с помощью использования двузонного регулирования частоты вращения асинхронного электродвигателя, если в диапазоне частот выше номинальных значений нагрузка уменьшается.

4. Применение регулируемых ЭПС, с помощью которых при изменении режимов работы технологического оборудования и физико-механических свойств обрабатываемого вещества можно устанавливать оптимальные по энергетическим затратам условия обработки вещества – например, оптимальные скорости: насосов при изменении расхода и свойств жидкости, шпинделей металлообрабатывающих станков при изменении размеров и материала обрабатываемых деталей, роторов дробилок при изменении размеров и свойств дробимых веществ и т. п.

5. Управление динамическими режимами привода сопровождаемое ограничениями по мощности и потерям энергии при использовании управления интенсивностью изменений скорости (положительными и отрицательными) на этапах цикла работы привода, а также в режимах разгона и торможения. При малых значениях интенсивности потери энергии будут малы. Очевидно, что такие режимы должны быть согласованы с производительностью технологического оборудования.

6. Исключение режимов пуска и торможения технологических агрегатов и комплексов, с помощью применения дополнительных механизмов с регулируемыми электроприводами, обеспечива-

ющих совмещение движений основных механизмов в технологическом процессе для перевода их в непрерывные режимы работы.

7. Использование адаптивных методов управления режимами электроприводов исполнительных органов (ИО) технологических и транспортных машин для минимизации электропотребления при соблюдении заданных требований по производительности машин и качеству обработки вещества.

В создании приводной техники наметилась тенденция разработки и выпуска специализированных ИЭПС, ориентированных на применение в больших группах типовых машин и технологических комплексов. Например, корпорацией «Omron» разработана система для многодвигательных (многоосевых) машин и производственных конвейерных линий, в которой возможно управление 16, 32 и 64 исполнительными органами, выполняющими для реализации заданной технологии угловые и линейные движения. Применяются сервоприводы с вращательными и линейными электродвигателями, быстродействующими ПЧ с векторным управлением (на рис. 1 показана структура технических средств многоосевой ИЭПС) [1]. Полоса пропускания замкнутых по скорости систем, оцениваемая на уровне –3 дБ амплитудно-частотной характеристики, приведенной к единичной обратной связи, составляет 2 кГц. Предусматривается подавление вибраций нагрузки приводов в диапазоне частоты от 1 до 200 Гц при четырех предустановленных значениях частот. Комплекты многодвигательных систем электроприводов нацелены на реализацию функций: сложных управляемых движений, многоосевой синхронизации, поточечного позиционирования от одного до многоосевых движений, движений с линейной и круговой интерполяцией, электрон-

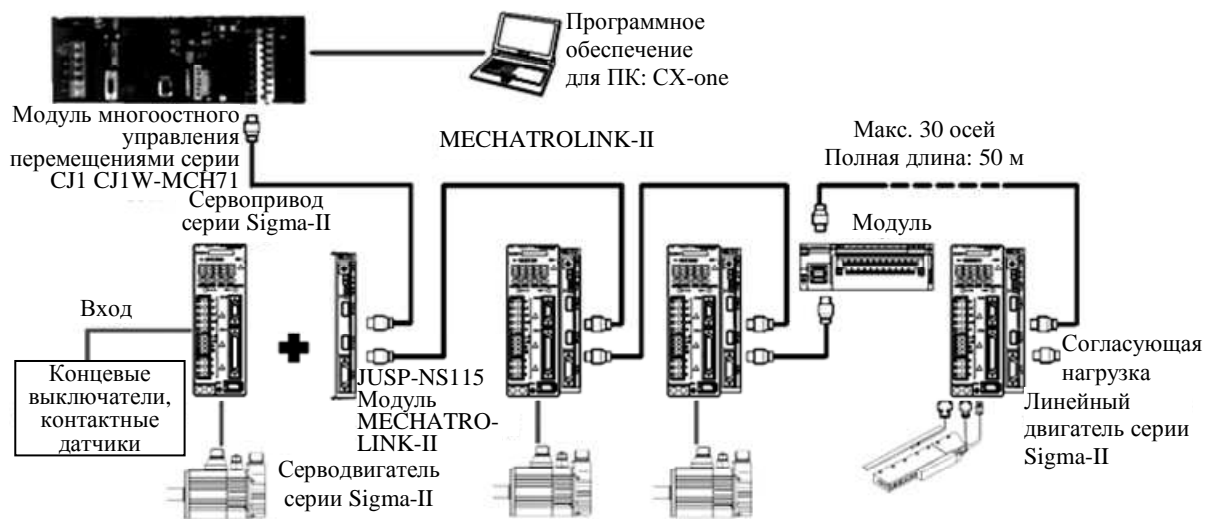


Рис. 1

ных «кулачков» и др. Аналогичные ИЭПС для технологических комплексов разных отраслей промышленности разработаны и в других корпорациях, например «Siemens» [2], АВВ [3].

**Системы «электронный преобразователь – двигатель».** Электронные преобразователи выполняются главным образом как полупроводниковые преобразователи в виде неуправляемых и управляемых выпрямителей, автономных инверторов напряжения (ИН), преобразователей частоты со звеном постоянного тока. Виды преобразователей и их комбинации определяются типом электродвигателя и задачами управления, мощностью, диапазоном регулирования, необходимостью рекуперации энергии в сеть, влиянием преобразователей на питающую сеть. Доминирующими ЭПС являются частотно-регулируемые системы с асинхронными и синхронными электродвигателями. Схемы наиболее распространенных ПЧ малой и средней мощности показаны в составе электрической схемы комплекса на рис. 2. В ПЧ имеются одинаковые автономные ИН и разные выпрямители – диодные ДВ и активные АВ. Как правило, ПЧ применяются в системах однодвигательного привода. На базе автономных ИН, питающихся от группового АВ (ГАВ) реализуются экономически эффективные системы многодвигательного привода. При использовании группового ДВ (ГДВ) дополнительно устанавливаются в цепь постоянного напряжения электронно-резистивный тормозной модуль (ТМ). ЭПС с групповыми источниками электропитания находят широкое распространение в разных технологиях. Рекуперация энергии в таких системах может происходить с двигателя на двигатель через ИН, и это является хорошим способом энергосбережения.

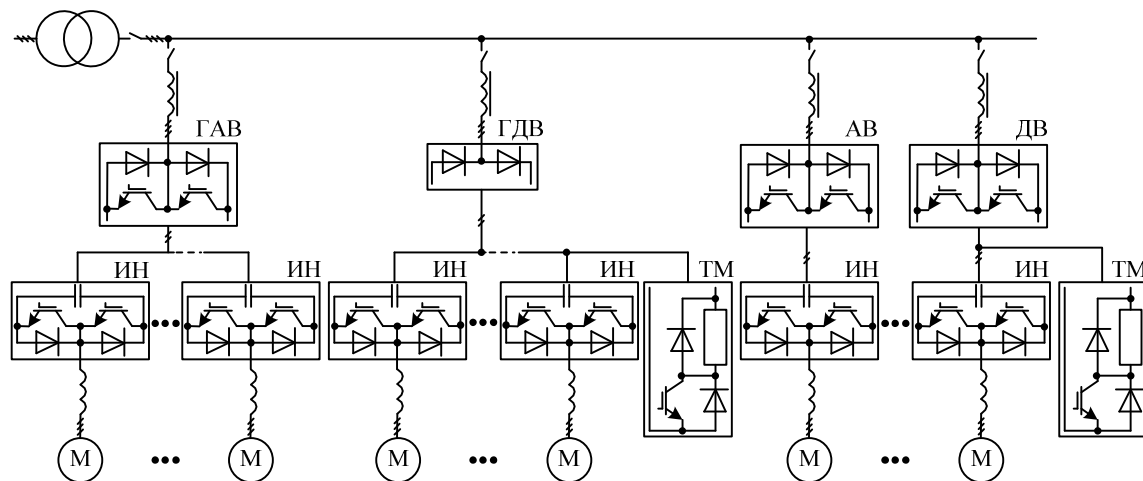


Рис. 2

Развитие мощных ПЧ происходит в направлении создания многоуровневых преобразователей со звеном постоянного тока. Такие преобразователи выполняются в том числе и для высоковольтных приводов (рис. 3). Высоковольтные ПЧ ориентированы на применение с высоковольтными электродвигателями. В отечественной промышленности наибольшее распространение получили асинхронные и синхронные электродвигатели с номинальными напряжениями питания 6 и 10 кВ.

Наиболее часто применяются высоковольтные ПЧ, выполненные по схеме «двенадцатипульсный неуправляемый выпрямитель – промежуточное звено постоянного тока – трехуровневый инвертор напряжения» (рис. 3, а). Инвертор напряжения реализуется на базе высоковольтных IGBT-транзисторов. Возможно также выполнение инвертора напряжения на базе запираемых тиристоров (GTO, IGCT). Выпрямитель получает питание от входного трехобмоточного трансформатора с вторичными обмотками, сдвинутыми друг относительно друга на угол 30°. Двенадцатипульсный выпрямитель состоит из двух диодных шестипульсных мостов. Возможна комплектация ПЧ двадцатичетырехпульсным блоком входного выпрямителя.

При необходимости рекуперации энергии торможения привода в сеть электропитания в ПЧ применяется активный трехуровневый выпрямитель, аналогичный по своей структуре трехуровневому инвертору. Схема такого ПЧ показана на рис. 3, б.

Ряд корпораций производят высоковольтные ПЧ, выполненные по схеме, состоящей из входного многообмоточного трансформатора, многоуровневого инвертора и системы управления (рис. 3, в). Входной трансформатор служит для преобразова-

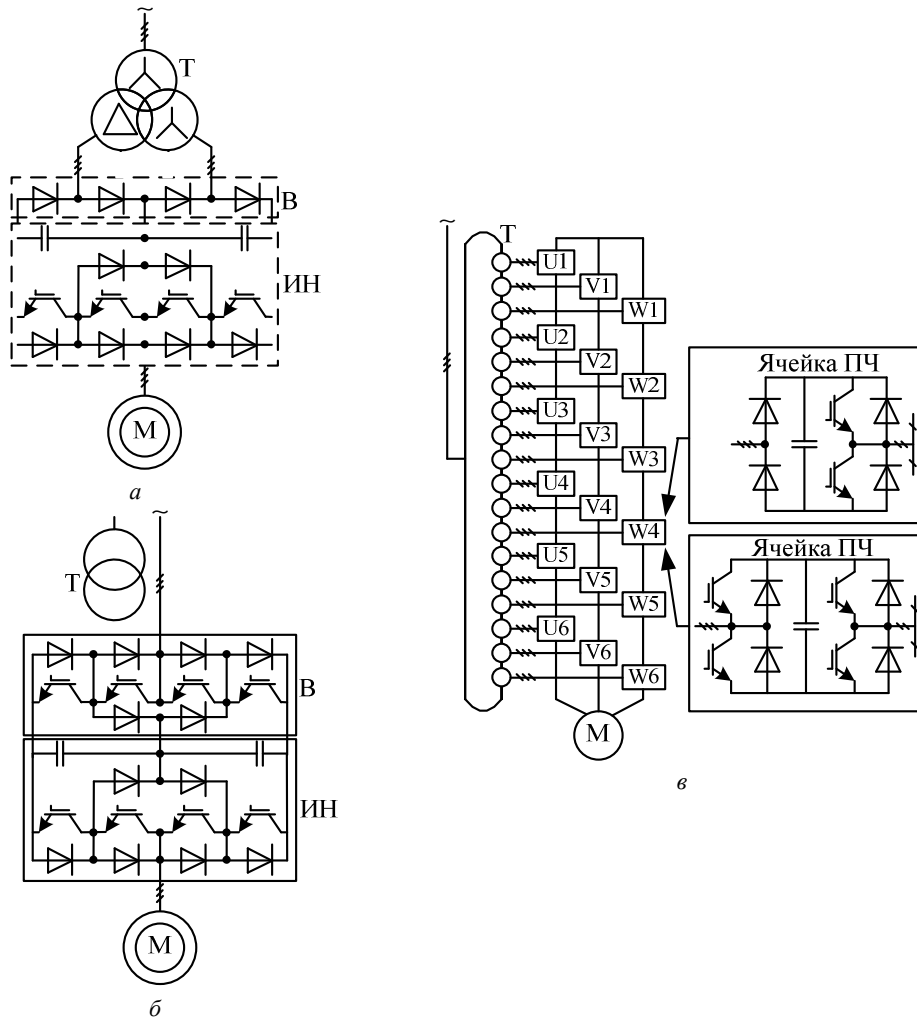


Рис. 3

ния входного напряжения (3 фазы, 6 кВ) в выходное напряжение (18 фаз, 578 В), которое после выпрямления питает ячейки инвертирования ПЧ.

Существенный недостаток высоковольтных электроприводов, построенных по рассмотренным схемам, – их высокая стоимость. Снижения стоимости можно достичь, применив так называемую «двухтрансформаторную» схему ПЧ. Это позволяет использовать для регулирования частоты низковольтный ПЧ. Такие преобразователи отличаются относительной дешевизной и простой практической реализации. Вследствие этого они наиболее часто применяются для управления высоковольтными электродвигателями в диапазоне мощностей до 1...1.5 МВт. При большей мощности электропривода повышающий трансформатор вносит существенные искажения в процесс управления электродвигателем. Для улучшения формы выходного напряжения низковольтного преобразователя они комплектуются выходными синусоидальными фильтрами. К основным недостаткам двухтрансформаторных

преобразователей относятся высокие массогабаритные характеристики, меньшие по отношению к другим схемам КПД (93–96 %) и надежность. Преобразователи, выполненные по этой схеме, имеют ограниченный диапазон регулирования частоты вращения двигателя как сверху, так и снизу от номинальной частоты. При снижении частоты на выходе преобразователя нарушается режим работы выходного трансформатора вследствие увеличения насыщения сердечника. Поэтому, как показывает практика, диапазон регулирования ограничен в пределах  $n_{\text{ном}} > n > 0.5 n_{\text{ном}}$ . Для расширения диапазона регулирования используют трансформаторы с увеличенным сечением магнитопровода, но это увеличивает его стоимость, массу и габариты. При увеличении выходной частоты растут потери в сердечнике трансформатора на перемагничивание и вихревые токи. В диапазоне мощностей до 1 МВт экономически оправданным может быть применение низковольтного двигателя вместо высоковольтного и более дешевого низковольтного преобразователя частоты.

Для мощных низковольтных, а также для высоковольтных приводов применяют параллельное включение ПЧ. Аналогичные схемы применяют для асинхронных и синхронных электродвигателей, имеющих двойные статорные обмотки.

**Специализированные серии электроприводов.** В зависимости от области применения приводов переменного тока фирмы-производители преобразовательной техники предлагают следующие специализированные серии приводов:

*Электроприводы общего назначения (стандартные электроприводы).* Применяются для решения задач автоматизации простых производственных механизмов, типовых объектов городского, жилищно-коммунального хозяйства.

*Высокодинамичные электроприводы.* Используются для решения достаточно сложных задач автоматизации производственных механизмов и машин. Как правило, такие приводы характеризуются гибко программируемой системой управления, могут оснащаться датчиками обратной связи по скорости двигателя, имеют в стандартной комплектации широкий набор дискретных и аналоговых входов-выходов, позволяют расширять функции за счет дополнительных плат (карт).

*Высокодинамичные взаимосвязанные (многодвигательные) электроприводы.* Электроприводы этого сектора обладают всеми свойствами электроприводов предыдущего сектора и ориентированы на применение в многодвигательных электроприводах машин и комплексов. Наряду с рассмотренными групповыми выпрямителями применяются групповые управляемые выпрямители ГУВ, выполняющие заряд конденсаторов ИН в момент их включения (на рис. 4 показана система многодвигательного электропривода с групповыми выпрямителями). После заряда ГУВ отключается, и работа системы происходит через ГАВ. Эффективное ограничение помех, идущих в сеть, достигается применением входного коммутирующего дросселя КД и сетевого фильтра СФ.

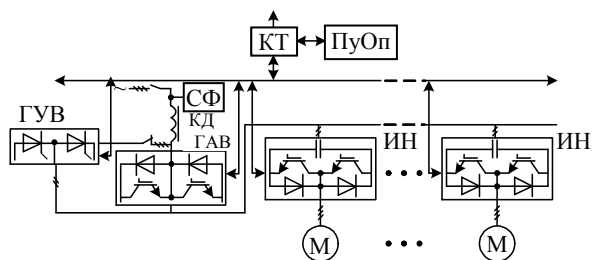


Рис. 4

При использовании ГАВ обеспечивается работа привода в четырехквadrантном режиме с рекуперацией энергии торможения в сеть электропитания.

Схемное решение блока обеспечивает поддержание практически неизменного напряжения звена постоянного тока независимо от напряжения питающей сети даже в процессе рекуперации.

*Сервоприводы* – это электроприводы, которые в широком диапазоне регулирования скорости обеспечивают динамичные, высокоточные движения ИО.

Для нерегулируемых трехфазных асинхронных двигателей применяется устройство плавного пуска и торможения (УПП). УПП обеспечивает беступенчатый плавный пуск и останов двигателя за счет плавного тиристорного силового регулирования напряжения на статорных обмотках, защиту механизмов и двигателей, а также связь с системами автоматизации. Применение УПП – экономичное решение, позволяющее уменьшить стоимость эксплуатации механизмов путем снижения механических воздействий и улучшения эксплуатационной готовности оборудования; уменьшить влияние пуска двигателей на электрическую сеть за счет ограничения бросков тока и провалов напряжения в сети. Наиболее часто УПП находят применение для центробежных механизмов, насосов, вентиляторов, компрессоров и конвейеров.

**Информационные средства.** Обеспечение требуемых информационных взаимосвязей компонентов ИЭПС технологических комплексов достигается посредством сетей и коммуникационных интерфейсов. Требования к сетям формулируют одновременно с выбором компонентов ЭПС и всей системы автоматизации (СА) с обязательным учетом возможности ее дальнейшего развития.

В сложных СА технологических комплексов стремятся к выбору широко распространенных сетевых средств, обладающих соответствием известным национальным и международным стандартам. Если СА – многоуровневая, то в ней могут использоваться одновременно несколько сетей и даже несколько различных сетей на одном уровне управления. В подобных случаях прибегают к использованию так называемой бесшовной технологии проектирования сетей. Ее суть заключается в создании взаимосвязанной сетевой структуры, состоящей из сетей различных иерархических уровней. Сетевую структуру СА условно разделяют на уровни: информационный (верхний); управления (средний); полевой (нижний). Для построения структуры сети необходимо иметь четкое представление о коммуникационных возможностях электроприводных систем промышленного оборудования, составе сетей и их основных характери-

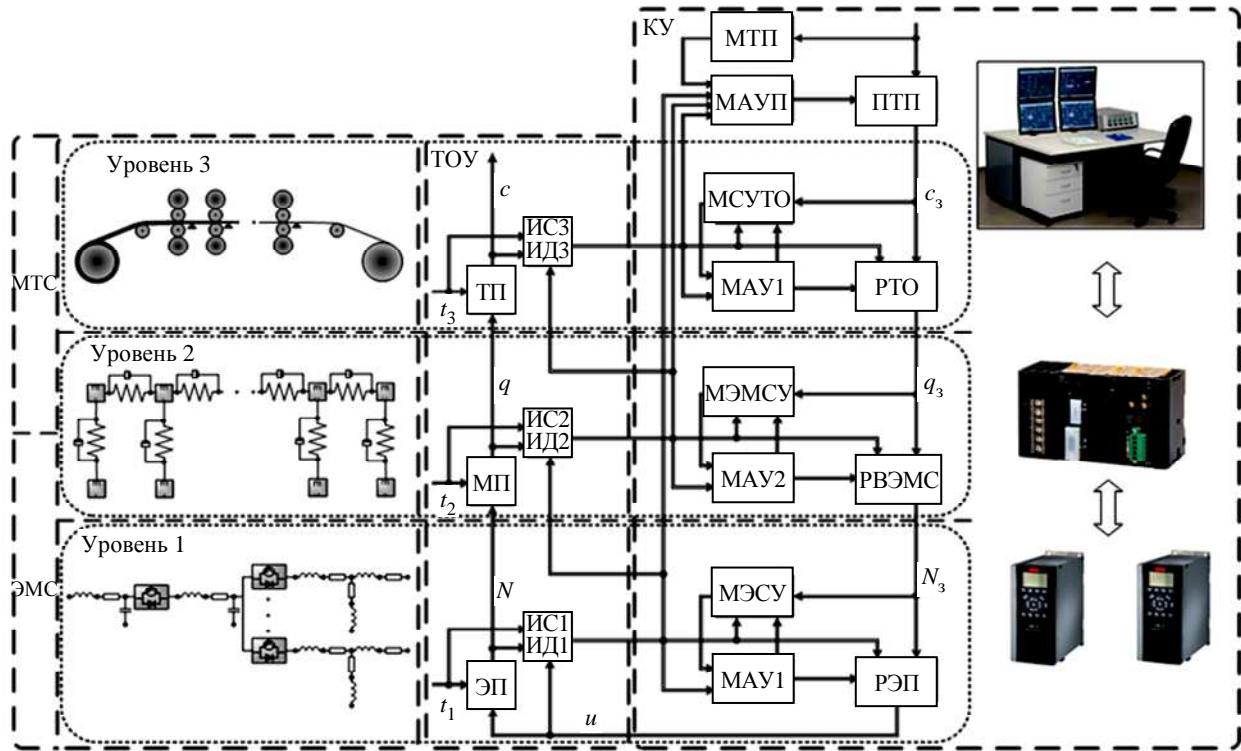


Рис. 5

стиках. К их числу относятся тип и количество узлов сети; ее протяженность; скорость передачи информации; вид физического носителя линий связи; используемые протоколы.

Для конкретной сети параметры этих характеристик заранее известны (в технических руководствах, как правило, приводятся максимальные значения параметров и их взаимосвязь). В тех случаях, когда они не удовлетворяют требованиям СА (например, количество узлов недостаточно), то выбирают другую сеть или меняют сетевую структуру в целом.

**Типовая алгоритмическая структурная схема системы управления технологическим комплексом.** Основываясь на блочно-модульных принципах построения современных ИЭПС машин и комплексов (как в части технических средств, так и в части программных и алгоритмических средств) структурную схему системы управления технологическим комплексом, выполненной на базе ИЭПС, можно представить в виде трехуровневой иерархической схемы (рис. 5).

Первый – нижний уровень содержит взаимосвязанную электромагнитную подсистему (ЭП), входными переменными  $u$  которой служат сигналы управления различными полупроводниковыми преобразователями, а выходными переменными  $N$  – электромагнитные моменты (силы) электродвигателей.

Второй уровень содержит взаимосвязанную механическую подсистему (МП), имеющую обратные связи с ЭП по цепям электромагнитной индукции.

Выходными переменными МП служат переменные  $q$ , характеризующие движения механизмов (линейные и угловые перемещения, скорости, упругие силы и моменты). Подсистемы МП и ЭП, рассматриваемые совместно, образуют взаимосвязанную электромеханическую систему (ЭМС). Третий уровень содержит технологическую (функциональную) подсистему (ТП), обеспечивающую управление технологическими переменными  $\epsilon$  в соответствии с заданными значениями. Эти переменные являются выходными переменными технологического объекта управления (ТОУ). Подсистема ТП совместно с частью подсистемы МП образуют механотехнологическую систему (МТС), включающую в себя исполнительные органы машин комплекса, взаимосвязанные между собой обрабатываемым материалом (веществом).

Для каждой из подсистем имеются соответствующие им регуляторы: РЭП, РЭМС, РТО, находящиеся в межуровневой подчиненности в комплексе управления (КУ) взаимосвязанной системы аналогично тому, как это происходит в технологическом объекте управления (ТОУ). На регуляторы поступают сигналы заданий переменных  $N_3, q_3, \xi_3$  и измеренные или вычисленные

значения переменных. Подсистемы каждого уровня содержат информационные средства (ИС) и идентификаторы (ИД), формирующие необходимую информацию для процесса управления на каждом уровне и в системе управления в целом. В общем случае системы управления каждого уровня представляют собой адаптивные системы, осуществляющие автоматическую оптимизацию при изменении параметров.

Выполняется это модулями автоматической оптимизации (МАО) в соответствии с моделями процессов управления в электромагнитной, электромеханической системах управления (М ЭСУ, М ЭМСУ) и в системе управления технологическим объектом в целом (М СУТО). Вершина КУ – система управления процессом в технологическом комплексе, действия которой определяются принятым обобщенным критерием качества  $Q$  и моделью технологического процесса (МТП). Модель и обобщенный критерий устанавливаются в соответствии с частными критериями  $q_k(a_j)$  (вектор  $a_j$  включает в себя совокупность свойств (параметров)  $a_1, a_2, \dots, a_n$  технологического комплекса) и показателями технологического процесса (ПТП), определяющими его эффективность. Такими показателями эффективности служат оценки производительности, качества технологии, энергозатрат. Управление ПТП выполняется с помощью модуля автоматической оптимизации процесса (МАОП). В этом модуле происходит сравнение виртуальных и реальных процессов и вырабатываются команды на коррекцию показателей реального процесса.

Функции автоматической оптимизации используются в режимах наладки каждой из подсистем и рабочего функционирования в соответствии с изменением параметров и воздействий в системе. Модели могут содержать как математические описания объектов, или подсистем, так и обобщенные показатели нормированных динамических характеристик, в соответствии с которыми выполняется автоматическая настройка подсистем и системы управления в целом на оптимальные режимы функционирования.

На схеме (рис. 5) показаны с левой стороны цепи отображающие электромагнитные и механические процессы в подсистемах ЭП и МП, и структура исполнительных органов подсистемы ТО с обрабатываемым материалом на примере стана холодной прокатки. В качестве ТО может быть любой другой объект, включая насосную

станцию, ИЭПС которой рассмотрены далее. С правой стороны показаны технические средства комплекса управления: контроллеры привода, входящие в состав преобразователей частоты; технологический контроллер; промышленные компьютеры, входящие в состав станции оператора (автоматизированного рабочего места).

Математические описания ЭП выполняются методами теории цепей и теории поля, изучаемыми в «Теоретической электротехнике» и в «Теории электропривода». Первые методы базируются на уравнениях Кирхгофа, которые отражают зависимости между напряжениями и токами в контурах и узлах электрических схем, а вторые – на уравнениях Максвелла, связывающих векторы магнитной и электрической напряженностей, индукции, смещения и плотности тока в произвольной точке электромагнитного поля.

Как видно из рис. 2, электромагнитная подсистема комплекса с электроприводами переменного тока имеет сложную взаимосвязанную структуру, содержащую большое число электронных и электротехнических устройств. Для исследования процессов, происходящих в этой подсистеме можно применить методы матричного анализа, которые обычно применяют для исследования и расчета сложных электрических цепей разветвленной структуры. Для этого составляется электрическая цепь с применением эквивалентных замещений элементов, теоремы об эквивалентных источниках, декомпозиции.

Математические описания МП выполняются методами, изучаемыми в «Теоретической механике», – в частности, используются уравнения Лагранжа. При исследовании МП возникают задачи: 1) определения структуры механической модели МП, обеспечивающей при  $m$  входных и  $r$  выходных переменных оптимальное решение задачи управления ЭМС; 2) анализа и синтеза МП, в соответствии с которыми на стадии проектирования находят такие сочетания инерционно-жесткостных и демпфирующих параметров, которые обеспечивали бы малую интенсивность колебаний механизмов в заданных полосах частот сепаратных подсистем управления.

Математическое описание технологических подсистем содержит описания физических процессов, характерных для той или иной технологии. Часто эти описания включают в себя эмпирические формулы с разнообразными значениями коэффициентов, зависящих от многих факторов, важных для конкретной технологии. Имеются и

объекты с распределенными параметрами: длинные конвейерные линии, буровые машины, подъемные устройства с длинными стальными канатами, системы водоснабжения с длинными магистралями, и др. Для построения моделей таких объектов используют фундаментальные физические законы. К ним относятся прежде всего законы сохранения массы, энергии, количества движения.

Следует отметить примечательный факт использования эквивалентных электрических компонентов и схем при математическом описании динамических процессов в МП и ТП, устанавливая аналогию описаний физически различных систем.

#### **Анализ электроприводных систем и способов повышения их эффективности в технологиях на примере многоагрегатных насосных станций**

*Тенденции развития и функции типовых средств ЭПС многоагрегатных насосных станций.* Принимая во внимание большое распространение насосного оборудования в различных технологиях и высокое суммарное потребление этим оборудованием электроэнергии, составляющей в развитых странах 10–12 % от всей вырабатываемой электроэнергии, выполним краткий анализ тенденций развития ЭПС многоагрегатных насосных станций (НС) и функций типовых средств приводной техники насосного оборудования; показателей и методов повышения эффективности ЭПС НС в технологиях с помощью регулирования электромагнитных, механических и технологических переменных; оптимизации процессов управления для достижения заданных показателей эффективности систем при произвольном изменении расхода жидкости в магистрали.

В многоагрегатных насосных станциях применяется параллельное, последовательное и комбинированное включение насосных агрегатов (НА). Конкретная гидравлическая схема устанавливается исходя из выполняемой станцией технологии, технических требований и условий реализации этой технологии. Независимо от принятой схемы на НС применяется групповое управление взаимосвязанными НА с использованием средств ЭПС, при котором стремятся обеспечить максимальную эффективность станции и решать следующие задачи:

- оценка энергозатрат и обеспечение оптимальных решений по их минимизации;
- обеспечение заданных статических и динамических значений давления при произвольном изменении расхода жидкости в напорной магистрали;

- исключение при выполнении заданной технологии аномальных явлений в виде кавитаций и гидравлических ударов и повышение надежности гидравлического оборудования;

- автоматическая оптимизация комплекса управления при текущих оценках в НА и НС показателей эффективности выполнения заданной технологии.

В настоящий момент происходит существенное расширение на НС применения средств ЭПС и систем автоматизации, а также методов самонастройки и автоматической оптимизации систем и комплексов управления. Во вновь создаваемых НС сокращается число НА, но увеличивается их мощность. Как в объектах первой категории, в них предусматривается резервирование НА и электропитание от двух источников электроэнергии для применения систем автоматического включения резерва.

Для многоагрегатных НС с параллельным включением НА применяются следующие варианты построения ЭПС (рис. 6):

1. Управление группой электроприводов НА с использованием одного преобразователя частоты (ПЧ) и коммутационных устройств подключения электроприводов на питающую сеть (рис. 6, а).

2. То же, но с применением устройств плавного пуска (УПП). Применяют варианты с групповыми УПП и коммутационными устройствами подключения электроприводов и с индивидуальными УПП для каждого электропривода (рис. 6, б).

3. Применение двух, трех ПЧ, каждый из которых обеспечивает управление двумя, тремя группами НА (рис. 6, в). Внутри группы два электропривода подключаются по варианту 1 или 2.

4. Применение ПЧ для каждого электропривода НА (рис. 6, г).

Последний вариант – наиболее затратный, но при его применении достигаются наиболее высокие показатели эффективности выполняемой технологии.

В тех случаях, когда необходимо обеспечить большие уровни давлений в магистрали при крутой нагрузочной характеристике внешней сети применяют последовательное включение двух или нескольких НА, одновременно перекачивающих жидкость в один и тот же напорный трубопровод (рис. 6, д). Насосы при таком включении могут располагаться как рядом друг с другом, так и на значительном удалении. В этом случае возможны аномальные явления, связанные с кавита-

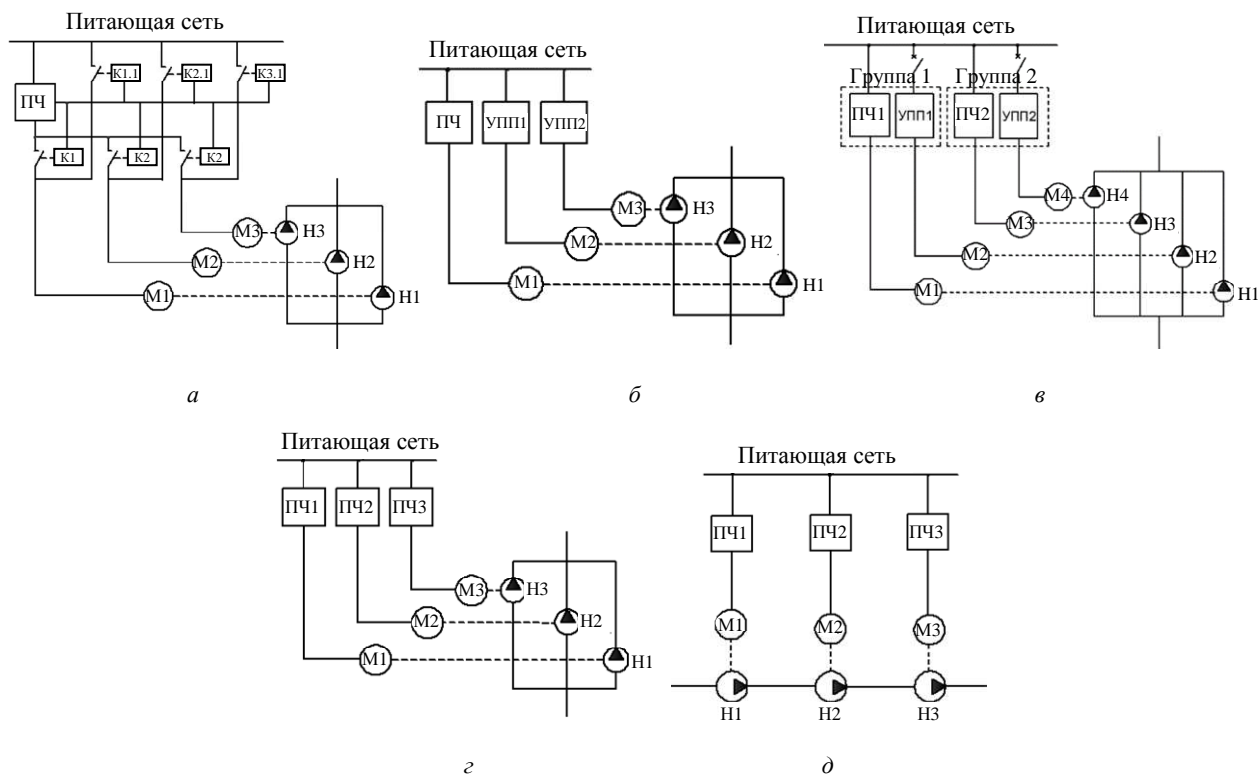


Рис. 6

цией и турбоэффектами, при которых предыдущий насос раскручивает рабочее колесо следующего насоса, в результате чего возможен выход насосов из строя. При последовательном включении НА применяют схему ЭПС с индивидуальными ПЧ, а если один из насосов выводится из работы, включается байпас.

Ведущие электротехнические корпорации мира разрабатывают и продают приводную технику специализированных серий для насосов, вентиляторов, компрессоров, в которой предусматривается реализация специальных технологических функций: автоматическая подстройка тока двигателя к текущему нагрузочному режиму с использованием режима управления  $U/f$  или векторного без датчика скорости; перезапуск на ходу – подключение ПЧ к вращающемуся двигателю; каскадный режим включения двигателей – для приложений, в которых, в зависимости от нагрузки, требуется одновременная работа от одного до четырех двигателей для регулирования давления при сильно изменяющемся расходе; четыре встроенных ПИД-регулятора – для регулирования скорости привода в зависимости от давления, расхода, уровня и других переменных технологического процесса; переключение на электропитание от сети при достижении заданного значения регулируемой переменной (режим байпас); управление вспомогательными устройства-

ми, например приводами запорных задвижек. Предусматривается также широкий выбор соединений и интерфейсов, обеспечивающих решение разных прикладных задач автоматизации НА.

**Показатели и методы повышения эффективности ЭПС НС.** Общие свойства НС, определяющие их эффективность при оснащении современными системами электропривода и автоматизации изложены в работах [4], [5]. Вместе с этим стали возможными и новые свойства, связанные с качественным управлением технологией и оптимизацией процессов при эксплуатации НС, а также сведением к минимуму аномальных гидравлических явлений.

Остановимся на трех составляющих эффективности НС: энергозатраты и обеспечение оптимальных решений по их минимизации; обеспечение заданных статических и динамических значений давления при произвольном изменении расхода жидкости в магистрали, сведение к минимуму аномальных явлений в виде кавитаций и гидравлических ударов; оптимизация решений по созданию комплексов управления НС и оптимизация процессов при их эксплуатации, используя оценки показателей эффективности выполнения заданной технологии.

*А. Оценки энергозатрат и обеспечение оптимальных решений по их минимизации. Значе-*

ния мощности  $P_{эл}$  группы НА определяются следующим образом:

$$P_{эл} = \sum_{i=1}^m \frac{\rho g Q_i H_i}{\eta_{iНА}}; \eta_{iНА} = \eta_{iН} \eta_{iД} \eta_{iПЧ},$$

где  $\rho$  – плотность перекачиваемой жидкости;  $g$  – ускорение свободного падения;  $m$  – количество работающих НА;  $Q_i$  – подача НА;  $H_i$  – напор НА;  $\eta_{iНА}$  – КПД НА;  $\eta_{iН}$  – КПД насоса;  $\eta_{iПЧ}$  – КПД ПЧ;  $\eta_{iД}$  – КПД асинхронного электродвигателя. Предполагая одинаковыми значения напора  $H_i$  каждого НА и принимая  $Q = \sum_{i=1}^m Q_i$ , значение энергопотребления  $e$  НС при перекачивании, например, 1 м<sup>3</sup> воды определяется формулой

$$e = \frac{1}{367} \frac{H_i}{Q_i} \sum_{i=1}^m \frac{Q_i}{\eta_{iНА}}.$$

Общее значение КПД НС определяется формулой

$$\eta_{НС} = Q \sum_{i=1}^m \frac{\eta_{iНА}}{Q_i}.$$

Энергопотребление  $e$  достигает минимальных значений при максимальном значении КПД каждого НА, которое имеется в одной точке характеристики насоса  $H(Q)$  и определяется подачей  $Q$ , напором  $H$  и частотой вращения  $n$  рабочего колеса.

Потери мощности и энергии в системах ПЧ-АД, а также характеристики КПД этих систем с учетом нагрузки «вентиляторного» вида подробно раскрыты в литературе, например в [6], [7]. Наименьшие

значения КПД имеют насосы из-за больших гидравлических потерь энергии, но при регулировании частоты вращения вала рабочего колеса насоса можно обеспечить максимальные значения этого КПД в рабочем диапазоне изменений подачи  $Q$ . На рис. 7 показаны характеристики  $\eta_H(Q)$  одного регулируемого НА (рис. 7, а) и трех параллельно включенных НА, из которых один регулируемый (рис. 7, б) или все регулируемые (рис. 7, в).

В [5] показано, что с точки зрения гидравлических потерь наиболее энергозатратны установки с двумя параллельно работающими насосами, один из которых работает с максимальной производительностью, а другой – регулируемый. При этом гидравлические потери резко возрастают с уменьшением частоты вращения рабочего колеса регулируемого насоса. Потери могут достигать 18 % общей мощности установки. При этом потери электроэнергии могут превышать 25 % суммарной электрической мощности работающих насосов с учетом снижения КПД регулируемого насоса при его минимальной производительности. При увеличении количества насосов до трех или четырех (один из которых – регулируемый) гидравлические потери в НС существенно снижаются. Рациональное соотношение регулируемых и нерегулируемых насосов составляет 1/2...1/3. В [5] определены структура НС (рис. 6, в) и алгоритм коммутации НА, при которых исключается энергетически затратный режим работы двух НА, при котором достигается «приемлемая стоимость оборудования и минимальные энергетические затраты».

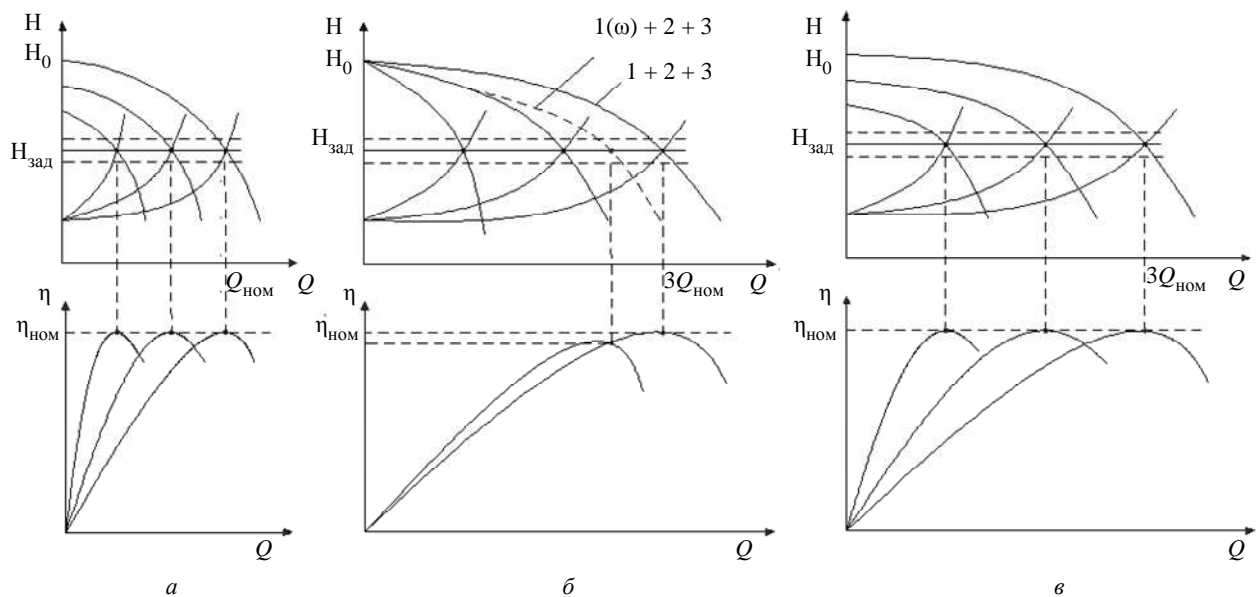


Рис. 7

В. Обеспечение заданных статических и динамических значений давления при произвольном изменении расхода жидкости в напорной магистрали. Сведение к минимуму при выполнении технологии аномальных явлений в виде кавитаций и гидравлических ударов. Применение индивидуальных частотно-регулируемых электроприводов НА, повышение уровня информатизации и автоматизации НС дают возможность обеспечить качественное регулирование технологических переменных через регулирование механических и электромагнитных переменных ЭПС и обеспечить оптимальные режимы управления НА и НС. На рис. 8 показана структурная схема одного из вариантов системы управления тремя взаимосвязанными НА, включающая в себя блоки управления моментами БУМ; регуляторы скорости РС, давления РД, соотношения моментов нагрузки приводов РСМ; задатчики интенсивности ЗИ разгона и торможения электроприводов. По информации, поступающей в ПЛК, о расходе, давлении в напорной магистрали, а также о потребляемой НА электроэнергии и мощности происходит автоматическая оптимизация процесса с коррекцией заданий на регулируемые переменные. Применение РСМ возможно в нескольких вариантах, рассмотренных в [8].

Для регулирования переменных, в том числе и давлений, в НА возможно применение различных алгоритмов и видов регуляторов: традиционных ПИД-, ПИ-, И-регуляторов; модальных; нечетких; нейронных; комбинаций названных регуляторов. В большинстве практических случаев применяются традиционные регуляторы: ПИ в

электромагнитных контурах, П или ПИ в контурах управления скоростью, И или ПИ в контурах управления давлением. Нечеткую логику и нейронные сети рационально применять не для построения таких регуляторов, а для построения блоков автоматической настройки регуляторов. Такие блоки фактически представляют собой регуляторы в контурах самонастройки параметров. Используя методы синтеза нечетких алгоритмов управления, можно выполнить условную оптимизацию сложных контуров регулирования без должного знания их математических моделей. Нейронная сеть обладает способностью «обучаться» в изменяющихся условиях, что позволяет, используя опыт экспертов, обучать нейронную сеть для выполнения настроек параметров регуляторов. Применяются специальные методы обучения, разработанные для нейронных сетей с использованием методов интерполяции данных.

То, что при использовании части из этих алгоритмов отсутствует необходимость полного знания математического описания механогидравлических процессов во взаимосвязанных НА, не является их большим достоинством, так как эти знания все равно приходят в процессе обучения и эксплуатации систем. Следует подчеркнуть, что качественное управление процессами во взаимосвязанных НА, при котором исключаются или сводятся к минимуму проявления кавитаций и гидравлических ударов, невозможно без знания математических моделей системы «параллельно работающие НА – выходной коллектор – напорная магистраль». К этим моделям добавляются модели частотно-регулируемых ЭПС, использу-

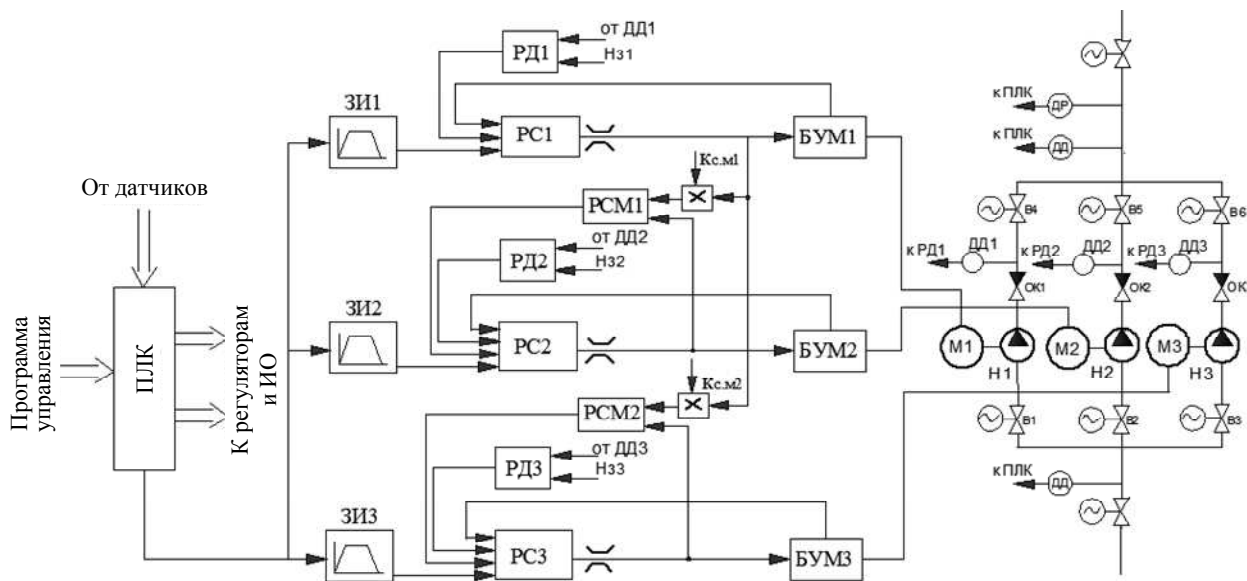


Рис. 8

ющих векторное управление без датчиков скорости и модели возмущений систем, действующих со стороны нагрузки.

Для описания неустановившегося движения жидкости в магистральных трубопроводах применяются систему линеаризованных уравнений [9]:

$$-\frac{d}{dx} p(x, t) = \frac{d}{dt} \rho v(x, t) + 2a\rho v(x, t);$$

$$-\frac{d}{dt} p(x, t) = c^2 \rho \frac{d}{dx} v(x, t);$$

$$2a = \frac{\lambda v}{2d_{\text{вн}}},$$

где  $p(x, t)$ ,  $v(x, t)$  – давление и осредненная по сечению трубы скорость движения жидкости;  $\rho$  – плотность перекачиваемой жидкости;  $c$  – скорость звука в данной жидкости;  $a$  – приведенный линеаризованный коэффициент гидравлического сопротивления;  $\lambda = 0.11 \cdot e^{0.25}$  – коэффициент гидравлического сопротивления при турбулентном течении жидкости;  $d_{\text{вн}}$  – внутренний диаметр трубы.

Аналогичные описания выполняются для участков гидравлической системы «НА – напорный коллектор». В целом для многоагрегатной НС получается сложное математическое описание, которое при ряде условий и аппроксимаций сводится к передаточной матрице, отражающей взаимодействие давлений в разных частях гидравлической системы. Элементами этой матрицы

служат передаточные функции  $W_{ji}^*(p)$ , имеющие следующий обобщенный вид:

$$W_{ji}^*(p) = \frac{p y_{j-1, j}(p)}{p_i(p)} = \frac{\mu_{\Sigma}'}{\mu_{\Sigma}} \times$$

$$\times \frac{\prod_{e=1}^h (T_e''^2 p^2 + 2\xi_e'' T_e'' p + 1) \prod_{r=i}^{j-2} (T_r'' p + 1)}{\prod_{l=1}^{k-1} (T_l^2 p^2 + 2\xi_l T_l p + 1)}.$$

Параметры такой передаточной функции определяются по разработанной методике. Постоянные времени и коэффициенты демпфирования определяются из собственных значений матриц, описывающих полную модель системы и ее части. Следует отметить, что в демпфировании колебательных процессов в гидравлической системе большое влияние имеет скорость движения жидкости или так называемое скоростное демпфирование. Наибольшие амплитуды колебаний давления возможны при малых расходах и соответственно малых скоростях. Эффективным средством демпфирования и компенсации низкочастотных магистральных колебаний давлений является ЭПС НС при использовании адаптивных алгоритмов управления в контурах регулирования частоты вращения рабочего колеса насоса и давления.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приводная техника Omron. Каталог, Omron, 2012. 236 с.
2. Преобразователи SINAMICS и двигатели. Motion Control Drives. Каталог D 31, Siemens, 2012. 450 с.
3. АBB Промышленные приводы ACS800 multi-drives от 1.1 до 5600 кВт. Каталог АBB, 2013. 48 с.
4. Лезнов Б. С. Частотно-регулируемый электроприводов насосных установок. М.: Машиностроение, 2013. 176 с.
5. Каргин С. А. Анализ потерь электроэнергии при работе группы насосов, оснащенных регулируемым приводом // Водоснабжение и санитарная техника. 2010. № 3. С. 12–18.
6. Браславский И. Я., Ишматов З. Ш., Поляков В. Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод. М.: Академия, 2004. 202 с.
7. Ильинский Н. Ф., Москаленко В. В. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение. М.: Академия, 2008. 208 с.
8. Новиков В. А., Савва С. В., Татаринцев Н. И. Электропривод в современных технологиях. М.: Академия, 2014. 400 с.
9. Вильнер Я. М., Ковалев Я. Т., Некрасов Б. Б. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам. М.: Высш. шк., 1976. 416 с.

M. P. Belov, R. A. Kahorov, V. A. Novikov, A. A. Prokopov  
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

### THE DEVELOPMENT OF ENERGY-SAVING ELECTRIC DRIVE SYSTEMS AND WAYS TO INCREASE EFFICIENCY IN TECHNOLOGY

*The analysis of tendencies of development of energy-saving electric drive systems, «electronic converter – motor». Considered a typical structure of the control system of technological complex, which is made on the basis of integrated electric drive systems. The analysis of ways to improve the efficiency of electric drive systems technologies to showcase multi-component pumping stations.*

**Energy saving electric system, the ways to improve the effectiveness of systems technology, control systems pumping units and stations**