

Выводы.

Предложена методика теплового расчета выпарного аппарата блока разделения нефтешлама. Проведен поверочный тепловой расчет выпарного аппарата БРНШ-3. Даны общие рекомендации по повышению тепловой эффективности этой установки.

Литература

1. Исаченко, В. Л. Теплопередача / [В. Л. Исаченко и др.]. – М., 1981.
2. Казанцев, Е. И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования / Е. И. Казанцев. – М., 1975.
3. Лыков, А. В. Тепломассообмен: Справочник / А. В. Лыков. – М., 1978.

УДК 681.5 (075.8)

С. А. Поликашов, Б. Ю. Васильев

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ МНОГОДВИГАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С АКТИВНОЙ КОРРЕКЦИЕЙ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ И ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ

Рассмотрены преобразователи частоты многодвигательных асинхронных электромеханических систем. Показаны существующие преобразователи частоты и системы управления многодвигательными электроприводами. Выявлены их недостатки. Предложены структура силовой части преобразователя частоты с активным выпрямителем, обеспечивающего коррекцию коэффициента мощности электропривода, и система автоматического управления электродвигателями, обеспечивающая повышенный уровень энергосбережения. Исследована и проанализирована эффективность предложенных технических решений.

Многодвигательный электропривод, асинхронный двигатель, преобразователь частоты, активный выпрямитель, автономный инвертор, система управления, энергосбережение.

The frequency converters for multimotor electromechanical systems with electrical drive are considered in the paper. The existing frequency converters and control systems of multimotor electrical drive are shown. Demerits of the frequency converters are identified. The power structure of the frequency converter with active rectifier, providing the correction power factor, and the control system electrical drive, providing an increased level of energy savings, is proposed. Efficiency of the proposed solutions is studied and analyzed.

Multimotor electrical drive, induction motion, frequency converter, active rectifier, inverter, control system, energy saving.

Введение.

Современный электропривод промышленных предприятий, как правило, представляет собой многодвигательную электромеханическую систему (МЭС), которая может быть частично или полностью регулируемой. Основой таких систем, в большинстве случаев, являются асинхронные двигатели и силовой полупроводниковый преобразователь частоты [1], [4], [7], [8].

Широкое распространение асинхронные двигатели получили благодаря простой конструкции, высокой надежности, низкой стоимости и возможности с помощью простых технических средств обеспечить регулирование частоты вращения и момента в переходных и установившихся режимах. Основным энергетическим недостатком асинхронных двигателей заключается в низком коэффициенте мощности.

Основная часть.

Для регулирования частоты вращения группы асинхронных двигателей в большинстве случаев используют общий двухзвенный преобразователь частоты (ПЧ), в состав которого входят диодный неуправляемый выпрямитель и транзисторный полностью управляемый автономный инвертор. Струк-

турная схема МЭС с асинхронными двигателями и общим преобразователем частоты, получившая широкое распространение на промышленных предприятиях, представлена на рис. 1.

Такие ПЧ обладают рядом энергетических недостатков. Значительный негативный эффект вносит диодный выпрямитель, который характеризуется низким уровнем электромагнитной совместимости с сетью электроснабжения, что выражается в следующем:

- высоком значении искажения напряжения сети электроснабжения и потребляемого тока;
- низком коэффициенте мощности электропривода;
- односторонней проводимости выпрямителя;
- низком коэффициенте использования трансформатора;
- значительными пульсациями напряжения в звене постоянного тока.

Другой негативный эффект от использования такого преобразователя частоты в МЭС – технологический, обусловлен общей системой управления, которая способна обеспечить только синхронное (одновременное и одинаковое) управление всеми механическими координатами приводных двигателей.

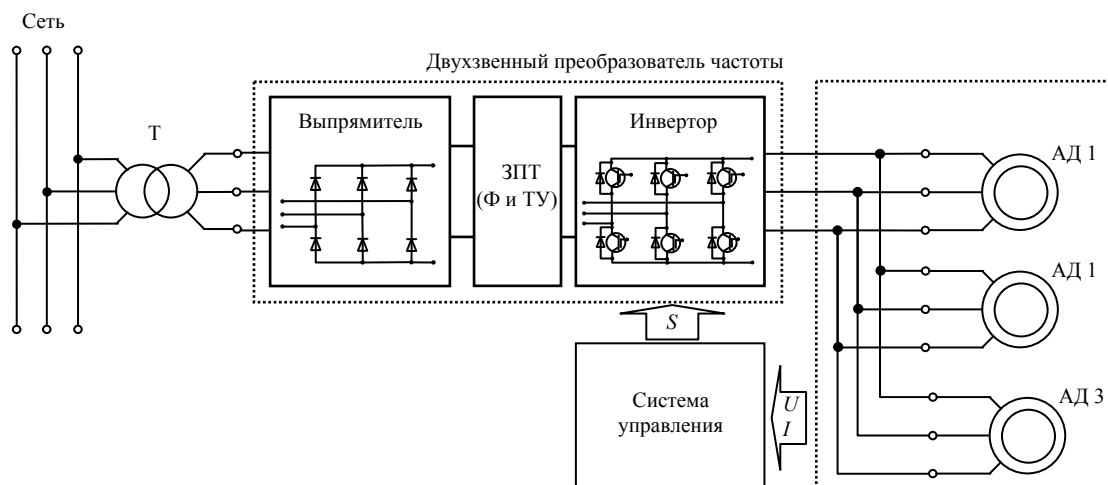


Рис. 1. Структурная схема многодвигательной электромеханической системы с общим преобразователем частоты

Эти энергетические и технологические недостатки делают актуальной задачу разработки преобразователя частоты, способного обеспечить высокий уровень электромагнитной совместимости, единичный коэффициент мощности многодвигательного асинхронного электропривода и раздельное энергоэффективное управление приводными двигателями [1], [2], [3], [5], [6].

Способы повышения энергетической и технологической эффективности многодвигательной электромеханической системы. Энергетические проблемы МЭС, т. е. обеспечение коэффициента мощности МЭС с асинхронными двигателями на уровне единицы и синусоидальность напряжения сети и потребляемого тока, можно решить путем использования в ПЧ активного выпрямителя. Силовая схема активного выпрямителя ПЧ, как правило, унифицируется со схемой автономного инвертора и выполняется по схеме, идентичной схеме инвертора и по существу представляет собой обращенный инвертор. При использовании активного выпрямителя в преобразователе частоты вместо трансформатора целесообразно использовать сетевые дроссели.

Системы управления активного выпрямителя и автономного инвертора, выполненные на основе алгоритма широтно-импульсной модуляции (ШИМ), также унифицированы. Благодаря использованию режима ШИМ, напряжение, формируемое активным выпрямителем на стороне переменного тока, имеет благоприятный гармонический состав, в котором основная (полезная) гармоника и высшие гармоники существенно различаются по частоте. Это повышает эффективность фильтрации высших гармоник тока, потребляемого из сети электроснабжения сетевыми дросселями. Таким образом, решается задача потребления из сети практически синусоидального тока.

Фазовый угол потребляемого тока зависит от соотношения амплитуд и фазовых углов напряжений, приложенных к сетевым дросселям со стороны сети электроснабжения, а также от их параметров (индуктивности и активного сопротивления). Варьируя с

помощью системы управления активного выпрямителя параметрами основной гармоники переменного напряжения, можно обеспечить потребление из сети необходимого тока с заданным фазовым углом. Иными словами, можно обеспечить работу ПЧ с заданным значением коэффициента мощности, например, равным единице, а также с «опережающим» или «отстающим» коэффициентом мощности.

Как преобразователь энергии постоянного тока в энергию переменного тока, автономный инвертор обладает чрезвычайно ценным свойством – возможностью двустороннего энергетического обмена между сетями постоянного и переменного тока. Это свойство сохраняется и в обращенной схеме включения автономного инвертора в качестве активного выпрямителя. В итоге двухзвенный ПЧ с активным выпрямителем обеспечивает двусторонний энергетический обмен между питающей сетью и электрическим двигателем, в том числе режимы рекуперации энергии в питающую сеть.

Технологические проблемы МЭС, т. е. обеспечение индивидуального управления каждым асинхронным двигателем электропривода, можно решить за счет использования многоинверторного преобразователя частоты. Каждый автономный инвертор такого преобразователя частоты, который формирует на обмотках статора приводных электродвигателей напряжения заданной амплитуды и частоты, имеет автономную систему управления, что позволяет регулировать электромеханические координаты каждого двигателя МЭС индивидуально.

Все инверторы такого преобразователя частоты подключены к общему активному выпрямителю, который обеспечивает поддержание стабильного напряжения в звене постоянного тока и уровень электромагнитной совместимости с сетью электроснабжения на заданном уровне.

Использование многоинверторного преобразователя частоты с активным выпрямителем в МЭС технологической установки подачи теплоэлектростанций. Одним из примеров эксплуатации МЭС является технологическая установка подачи

воды теплоэлектростанций (ТЭЦ). На многих ТЭЦ данные установки являются либо нерегулируемыми, т. е. приводные двигатели насосов подключаются напрямую к сети электроснабжения и регулирование их частоты вращения не осуществляется либо используется общий двухзвенный преобразователь частоты для реализации общего управления всеми приводными электродвигателями насосов подачи воды.

Структурная схема МЭС технологической подачи воды ТЭУ «Центральная» г. Санкт-Петербурга ана-

логична схеме, приведенной на рис. 1 и обладает описанными выше недостатками. На рис. 2 приведена структурная схема МЭС технологической подачи воды с многоинверторным преобразователем частоты с активным выпрямителем и индивидуальным управлением приводными асинхронными двигателями насосов. В технологической установке подачи воды используется три насоса К-100-65-250 и три асинхронных двигателя. Основные технические характеристики насосов и электродвигателей приведены в таблице.

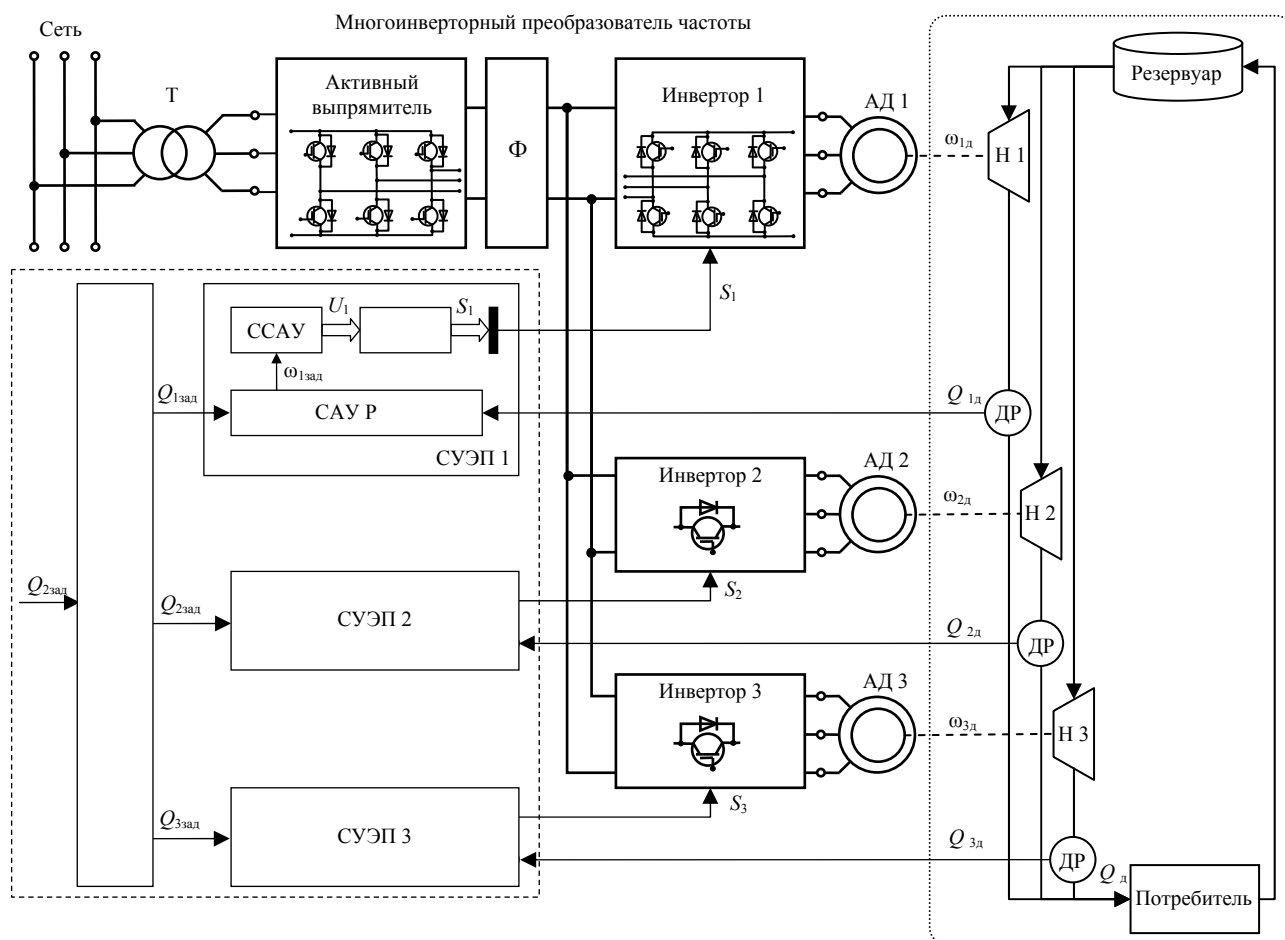


Рис. 2. Функциональная схема МЭС с многоинверторным преобразователем частоты

Таблица

Технические характеристики насосов и двигателей технологической установки подачи воды ТЭЦ «Центральная»

Наименование параметра		Значение параметра
Насос К-100-65-250		
1.	Номинальный расход, м ³ /ч	100
2.	Номинальный напор, м	80
3.	Регулирование расхода, %	от 30 до 130
4.	Номинальная мощность, кВт	32,5
5.	Номинальный КПД, %	67
Асинхронный двигатель		
1	Номинальная мощность, кВт	45
2	Номинальная скорость, об./мин.	2900
3	Номинальный ток, А	84,9
4	Номинальный КПД, %	92
5	Номинальный коэффициент мощности	0,89

На рис. 2 приняты следующие условные обозначения: Т – трансформатор; АД – асинхронный двигатель; Н – насос; Ф – фильтр; ТСАУ – технологическая система автоматического управления; САУ Р – система автоматического управления расхода; ССАУ – скалярная система автоматического управления; ДР – датчик расхода; СУЭП – система автоматического регулирования электроприводом; $Q_{1зад}$ ($Q_{2зад}$, $Q_{3зад}$) – заданное значение расхода первого насоса (второго, третьего); $Q_{1д}$ ($Q_{2д}$, $Q_{3д}$) – действующее значение расхода первого насоса (второго, третьего); $\omega_{1зад}$ ($\omega_{2зад}$, $\omega_{3зад}$) – заданная частота вращения первого двигателя (второго, третьего); $\omega_{1д}$ ($\omega_{2д}$, $\omega_{3д}$) – действующая частота вращения первого двигателя (второго, третьего); S_1 (S_2 , S_3) – коммутационная функция первого автономного инвертора (второго, третьего); U_1 – напряжение обмоток статора асинхронного двигателя.

Управление каждым электродвигателем осуществляется индивидуально. Входным управляющим воздействием для технологической системы автоматического управления электромеханической системы является задание на расход – $Q_{зад}$, расход воды, который необходим поддерживать на входе потребителя для обеспечения необходимых технологических процессов. Технологическая САУ, в соответствии с заданием на расход, должна сформировать задание на частоту вращения каждого двигателя ($\omega_{1зад}$ – заданная частота вращения первого электродвигателя; $\omega_{2зад}$ – заданная частота вращения второго электродвигателя; $\omega_{3зад}$ – заданная частота вращения третьего электродвигателя).

Расход воды на входе потребителя изменяется в пределах от 0 до 390 м³/ч. Частота вращения каждого двигателя изменяется от 0 до 2900 об./мин.

Задание на частоту вращения каждого двигателя формируется по следующему алгоритму (правилам управления или условиям):

1. Если $0 < Q_{зад} \leq 130$, то первый электродвигатель АД1 будет работать с частотой вращения $\omega_{1зад} = \omega_{зад}$, при чем $0 < \omega_{1зад} < 1,3 \omega_{ном}$; второй электродвигатель АД2 будет остановлен, т. е. $\omega_{2зад} = 0$; третий электродвигатель АД3 будет остановлен, т. е. $\omega_{3зад} = 0$.

2. Если $130 < Q_{зад} \leq 230$, то первый электродвигатель АД1 будет работать с номинальной частотой вращения $\omega_{1зад} = \omega_{ном}$, при которой первый насос обеспечивает номинальный расход $Q_{ном} = 100 \text{ м}^3/\text{ч}$; второй электродвигатель АД2 будет работать с частотой вращения $\omega_{2зад} = \omega_{зад} - \omega_{ном}$, причем $0 < \omega_{2зад} < 1,3 \omega_{ном}$; третий электродвигатель АД3 будет остановлен, т. е. $\omega_{3зад} = 0$.

3. Если $230 < Q_{зад} \leq 330$, то первый электродвигатель АД1 будет работать с номинальной частотой вращения $\omega_{1зад} = \omega_{ном}$ (при которой первый насос обеспечивает номинальный расход $Q_{ном} = 100 \text{ м}^3/\text{ч}$); второй электродвигатель АД2 будет работать с номинальной частотой вращения $\omega_{2зад} = \omega_{ном}$ (при которой второй насос обеспечивает номинальный расход $Q_{ном} = 100 \text{ м}^3/\text{ч}$); третий электродвигатель АД3 будет

работать с частотой вращения $\omega_{3зад} = \omega_{зад} - 2\omega_{ном}$, причем $0 < \omega_{3зад} < 1,3 \omega_{ном}$.

4. Если $330 < Q_{зад} \leq 390$, то первый электродвигатель АД1 будет работать с частотой вращения $\omega_{1зад} = \omega_{зад}/3$, причем $\omega_{ном} < \omega_{1зад} < 1,3 \omega_{ном}$; второй электродвигатель АД2 будет работать с частотой вращения $\omega_{2зад} = \omega_{зад}/3$ причем $\omega_{ном} < \omega_{2зад} < 1,3 \omega_{ном}$; третий электродвигатель АД3 будет работать с частотой вращения $\omega_{3зад} = \omega_{зад}/3$ причем $\omega_{ном} < \omega_{3зад} < 1,3 \omega_{ном}$.

При таком управлении приводными асинхронными двигателями будет обеспечиваться, во-первых, индивидуальная работа электродвигателями с поддержанием необходимого потребителю расхода воды; во-вторых, выбор необходимого количества работающих двигателей в соответствии с потребностью по расходу; в-третьих, будет исключена работа электродвигателей с недогрузкой; в-четвертых, приводные асинхронные двигатели будут работать в номинальном режиме при увеличении задания на расход воды выше, чем может обеспечить каждый из них.

СУЭП каждым двигателем МЭС обеспечивает оптимальный скалярный закон управления асинхронным двигателем, а напряжение на обмотках статора формируется по алгоритму широтно-импульсной модуляции.

Результатом работы технологической САУ и СУЭП за счет выбора необходимого количества работающих приводных двигателей насосов и обеспечения их оптимального режима работы будет поддерживаться минимальное энергопотребление на уровне, соответствующем расходу воды на входе потребителя.

Исследование и анализ эффективности предложенных технических решений. Исследование эффективности предложенных технических решений в силовой части преобразователя частоты и управления режимами работы асинхронных двигателей МЭС производилось путем имитационного моделирования данной системы в среде MatLab.

Осциллограммы фазного напряжения и тока, потребляемого электроприводом, приведены на рис. 3а. Осциллограммы активной и реактивной мощности, потребляемой электроприводом в процессе разгона двигателей и в установившихся режимах, показаны на рис. 3б.

Как видно из представленных осциллограмм, использование активного выпрямителя обеспечивает работу МЭС без негативного влияния на форму напряжения сети электроснабжения и потребление МЭС с асинхронными двигателями синусоидальных токов. Также видно, что использование активного выпрямителя в многоинверторном ПЧ обеспечивает потребление практически чисто активной мощности. Эти два фактора обеспечивают работу электропривода с коэффициентом мощности около единицы.

На рис. 4а приведены осциллограммы заданного и действующего расхода воды на входе потребителя; на рис. 4б – заданные и действующие частоты вращения приводных асинхронных двигателей.

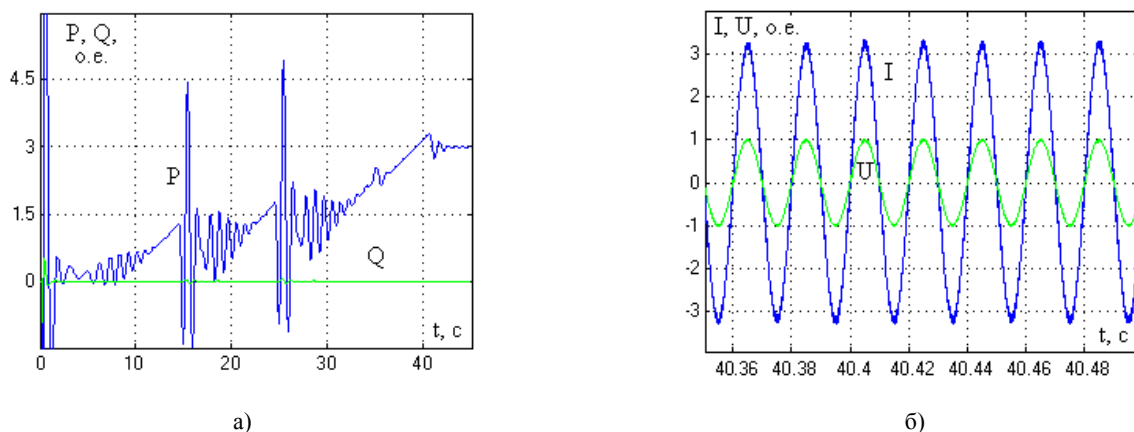


Рис. 3. Осциллограммы активной и реактивной мощности, тока и напряжения

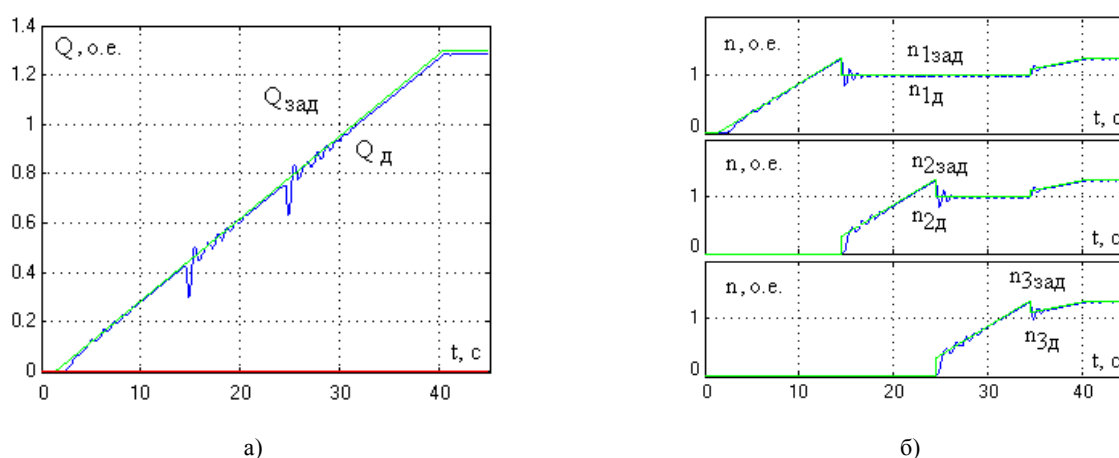


Рис. 4. Осциллограммы расхода и частот вращения

Из осциллограмм видно, что регулирование расхода осуществляется с высокой точностью, статическая ошибка практически равна нулю. Переходные процессы расхода протекают монотонно, без перерегулирования. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей также осуществляется с высокой точностью как в динамических, так и в установившихся режимах.

Заключение.

Исследования на имитационных моделях многоинверторного преобразователя частоты с активным выпрямителем для активной коррекции коэффициента мощности и индивидуальным управлением приводными асинхронными двигателями МЭС показывает эффективность принятых технических решений для обеспечения высоких энергетических и технических характеристик электропривода технологической установки подачи воды на теплоэлектростанциях.

Технические решения в силовой части преобразователя частоты обеспечивают поддержание коэффициента мощности асинхронного многодвигательного электропривода, а разработанная система управления – выбор необходимого числа работающих электродвигателей для поддержания заданного расхода на потребителе и оптимального управления режимами их работы.

Литература

1. Васильев, Б. Ю. Автоматизированный электропривод объектов минерально-сырьевого комплекса (применение, моделирование, исследование) / Б. Ю. Васильев. – СПб., 2014.
2. Васильев, Б. Ю. Повышение энергетических динамических характеристик электроприводов систем динамического позиционирования плавучих платформ / Б. Ю. Васильев // Газовая промышленность. – 2014. – № 8. – С. 29–33.
3. Васильев, Б. Ю. Повышение эффективности работы силовых полупроводниковых преобразователей на основе векторных алгоритмов управления / Б. Ю. Васильев // Электричество. – 2014. – № 9. – С. 44–51.
4. Васильев, Б. Ю. Электропривод. Энергетика электропривода / Б. Ю. Васильев. – М., 2015.
5. Васильев, Б. Ю. Энергетическая эффективность и электромагнитная совместимость преобразователей частоты электроприводов насосных агрегатов // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 9. – С. 118–121.
6. Васильев, Б. Ю. Эффективные алгоритмы управления полупроводниковыми преобразователями в асинхронных электроприводах / Б. Ю. Васильев, В. С. Добуш // Электричество. – 2014. – № 4. – С. 54.
7. Пронин, М. В. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет) / М. В. Пронин, А. Г. Воронцов; под ред. Е. А. Крутякова. – СПб., 2003.
8. Шрейнер, Р. Т. Электроприводы переменного тока на базе непосредственных преобразователей частоты с ШИМ / Р. Т. Шрейнер, А. И. Калыгин, В. К. Кривовяз. – Екатеринбург, 2012.