

*На правах рукописи*

ГОРЮНОВ Александр Николаевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ  
РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ  
ПЕРВОГО ПОДЪЕМА**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Чебоксары - 2013

Работа выполнена в ФБГОУ ВПО «Московский государственный открытый университет им. В.С.Черномырдина» на кафедре Электропривода и автоматизации промышленных установок

**Научный руководитель:** **ОНИЩЕНКО Георгий Борисович**,  
доктор технических наук, профессор,  
зав. каф. ЭАПУ ФБГОУ ВПО  
«МГОУ им. В.С.Черномырдина»

**Официальные оппоненты:** **ТИТОВ Владимир Георгиевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
зав. каф. ЭОС ФБГОУ ВПО  
«НГТУ им. Р.Е.Алексеева»

**ЛАРИОНОВ Владимир Николаевич**,  
кандидат технических наук, доцент,  
профессор каф. САУЭП  
ФБГОУ ВПО «ЧГУ им. И.Н.Ульянова»

**Ведущая организация:** **ООО «Электропром» (г. Москва)**

Защита состоится «01» марта 2013 г. в 14 часов 00 минут в зале Ученого совета на заседании диссертационного совета Д212.301.06 при ФБГОУ ВПО «Чувашский государственный университет им. И.Н.Ульянова» (428034, г. Чебоксары, ул. Университетская д.38, библиотечный корпус, третий этаж).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФБГОУ ВПО «Чувашский государственный университет им. И.Н.Ульянова»

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу 428015, г. Чебоксары, Московский пр., 15 на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «\_\_\_» января 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д212.301.06

Н.В. Руссова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Очевидной тенденцией развития техники является все более широкое применение регулируемого электропривода с целью энерго и ресурсосбережения, повышения надежности оборудования, автоматизации технологических процессов.

В мировой и отечественной практике уже накоплен большой положительный опыт использования регулируемого электропривода для насосных агрегатов станций второго и третьего подъема систем водоснабжения. На десятках станций второго подъема успешно эксплуатируются насосные агрегаты большой мощности с регулируемым электроприводом.

Необходимость регулирования производительности насосных агрегатов в системах водоснабжения определяется, прежде всего, переменным графиком водопотребления в течении суток и по времени года. Используемые гидравлические способы регулирования производительности насосных агрегатов, прежде всего дросселирование, ведут к непроизводительным затратам электроэнергии и появлению в гидравлических сетях избыточных напоров, снижающих надежность гидравлических систем.

Вторым способом регулирования подачи воды насосными станциями является включение – отключение насосных агрегатов. Частые включения мощных насосных агрегатов ведут к износу электротехнического и гидравлического оборудования и возникновению гидравлических ударов в трубопроводных сетях.

Применение регулируемого электропривода насосных агрегатов позволяет исключить указанные негативные последствия. Техническая и экономическая эффективность применения регулируемого электропривода для насосных агрегатов станций второго подъема стала общепризнанной.

Иное положение сложилось в оценке целесообразности применения регулируемого электропривода для станций первого подъема водоподготовки. Принципиальным отличием технологии работы этих насосных агрегатов является то, что они работают не на водопроводную сеть, а на аккумулирующие емкости: смесители, отстойники, контактные бассейны озонирования, фильтры, резервуары питьевой воды (РПВ). Аккумулирующие емкости сглаживают неравномерность водопотребления. Из-за стремление сократить земляные и строительные работы на некоторых станциях водоподготовки емкость резервуаров недостаточна, чтобы выполнять функции накопителей. В этом случае аккумулирующий эффект снижается.

Регулирование подачи насосами первого подъема обуславливается необходимостью поддержания уровня воды в резервуарах и осуществляется, как правило, включением – отключением насосных агрегатов, при этом также используется дросселирование. Необходимость последнего способа часто возникает в связи с тем, что насосы имеют избыточный номинальный напор и возникает задача согласования Q-H характеристик насоса с характеристикой трубопроводов.

Вопрос о целесообразности использования регулируемого электропривода для насосных агрегатов первого подъема изучен недостаточно.

В технической литературе практически не рассматривается целесообразность применения регулируемого электропривода для насосных агрегатов первого подъема. Однако эта проблема, несомненно, является актуальной, учитывая, что все города, крупные и промышленные предприятия нашей страны имеют станции первого подъема, оснащенные насосными агрегатами большой мощности.

Применение регулируемого электропривода в насосных станциях первого подъема может дать значительные технические и экономические преимущества:

- Снижение числа пусков насосных агрегатов большой мощности и связанное с этим повышение надежности и увеличение технического ресурса, уменьшение периодичности ремонтов мощных электродвигателей, насосных агрегатов, запорной гидравлической арматуры.
- Более точное поддержание требуемого уровня воды на очистных сооружениях, что ведет к улучшению технологического процесса очистки воды и сокращению расхода реагентов.
- Повышение надежности гидравлического оборудования благодаря редким и плавным пускам насосных агрегатов и снижение вероятности возникновения гидравлических ударов в водоводах первого подъема.
- Предотвращение взмучивания воды в отстойниках за счет плавного изменения скорости течения воды на очистных сооружениях.
- Возможность полной автоматизации технологических процессов, что дает возможность сократить обслуживающий персонал и повысить надежность работы станции.
- Сокращение расхода электроэнергии.

**Целью диссертационной работы** является определение целесообразности применения регулируемого электропривода на насосных агрегатах первого подъема станций водоподготовки и разработка рекомендаций по составу электрооборудования регулируемого электропривода и системы автоматического регулирования уровня воды в резервуарах.

В соответствии с поставленной целью в работе решались следующие задачи:

1. Анализ работы электроприводов насосных агрегатов и технологического оборудования станции первого подъема при существующих способах управления с нерегулируемым электроприводом.
2. Разработка компьютерной модели электрогидравлической системы насосной станции первого подъема и сравнительный анализ работы при нерегулируемом и регулируемом электроприводе насосных агрегатов.
3. Оценка негативных последствий частых пусков насосных агрегатов с синхронными электродвигателями большой мощности.

4. Выбор рациональной схемы высоковольтного регулируемого привода переменного тока и системы электроснабжения для насосных станций первого подъема.

5. Анализ переходных процессов в синхронном двигателе при прямом пуске и при частотном регулировании.

6. Разработка системы возбуждения синхронного электродвигателя при частотном управлении.

7. Оценка экономической эффективности и разработка рекомендации по применению регулируемых электроприводов для насосных агрегатов станций первого подъема.

Для решения поставленных задач использовались следующие методы:

- эксплуатационные наблюдения и экспериментальное исследование работы электротехнического, гидравлического и технологического оборудования станции первого подъема на Рублевской станции водоподготовки г. Москвы;

- математическое моделирование технологических процессов для характерной структуры станции первого подъема при регулируемом и нерегулируемом электроприводе насосных агрегатов;

- компьютерное моделирование электромагнитных и электромеханических процессов в синхронном электродвигателе при пуске и частотном управлении;

- статистический анализ показателей качества технологического процесса и надежности оборудования.

#### **На защиту выносятся следующие положения:**

1. Обоснование эффективности и целесообразности применения регулируемого электропривода (РЭП) по техническим, технологическим, и экономическим факторам для насосной станции 1-го подъема.

2. Компьютерная технологическая модель станции 1-го подъема позволяющая исследовать работу станции при трех способах регулирования уровня воды в смесителе: дискретный способ путем включения - отключения насосных агрегатов, дросселирование запорной арматурой на трубопроводе и использование РЭП для плавного изменения производительности насосного агрегата.

3. Система частотного регулирования синхронного двигателя при скалярном управлении без контроля углового положения ротора.

4. Система автоматического регулирования тока возбуждения синхронного двигателя в которой внутренний контур подчинен внешнему контуру по cosφ и предусмотрены гибкие стабилизирующие обратные связи.

#### **Научная новизна полученных результатов**

1. Всесторонне обоснована эффективность применения РЭП для насосных станций 1-го подъема, отличающаяся от существующих тем, что комплексно учитываются технические, технологические и экономические факторы.

2. Разработана компьютерная технологическая модель станций первого подъема, отличающаяся от существующих тем, что позволяет рассмотреть технологические процессы при трех способах регулирования уровня воды в смесителе.

3. Разработана система частотного регулирования синхронного двигателя, отличающаяся от существующих тем, что принята скалярная система регулирования без контроля углового положения ротора.

4. Предложена система автоматического регулирования тока возбуждения синхронного двигателя, отличающаяся от существующих тем, что в ней внутренний контур подчинен внешнему контуру по  $\cos\phi$  и предусмотрены гибкие стабилизирующие обратные связи.

**Практическая ценность работы** состоит в следующем:

1. Определены требования к системе автоматического поддержания уровня воды в технологических резервуарах станций водоподготовки.

2. Проведен анализ негативных факторов, связанных с частыми пусками мощных насосных агрегатов с синхронными двигателями.

3. Выполнено технико-экономическое обоснование целесообразности применения регулируемого электропривода для насосных агрегатов первого подъема.

4. Разработаны рекомендации по схемному построению и составу электрооборудования высоковольтных регулируемых электроприводов с синхронными двигателями.

5. Предложена структурная схема автоматического регулирования тока возбуждения синхронного двигателя при частотном скалярном управлении.

Обоснованность и достоверность полученных результатов обеспечивается широким использованием экспериментальных материалов, полученных на действующей насосной станции, и адекватными методами компьютерного моделирования технологических и электромеханических процессов.

**Реализация результатов работы.** Результаты работы приняты к использованию на Рублевской станции водоподготовки г.Москвы при разработке проекта модернизации насосной станции первого подъема № 1 и на Западной станции водоподготовки г.Москвы при модернизации насосной станции первого подъема.

Результаты работы приняты также к использованию в учебном процессе в Московском государственном открытом университете при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Электроэнергетика и электротехника».

**Публикации и апробация работы.** Результаты работы докладывались и обсуждались на VII Международной конференции по автоматизированному электроприводу. г.Иваново 2012 г., на XVIII Международной конференции «Проблемы автоматизированного электропривода», г.Одесса 2011 г.

По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ (из них 3 в изданиях по перечню ВАК).

**Структура и объем диссертации.** Диссертация содержит введение, 4 главы, заключение, список литературы, изложенные на 139 стр.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первой главе** анализируется состав оборудования и режимы работы станции водоподготовки, включающей насосные агрегаты подъема и очистные сооружения. Насосные станции содержат сложный комплекс электромеханического и гидравлического оборудования. Комплекс включает в себя: главные насосные агрегаты с высоковольтными синхронными двигателями мощностью 1250 кВт, запорную гидравлическую арматуру с электрическим приводом, высоковольтное распределительное устройство на 10 кВ. Типичная технологическая схема станции водоподготовки показана на рис. 1.

Общепринятая технологическая схема водоподготовки включает в себя механическую очистку, смешение воды с реагентами, обеззараживание, коагуляцию, отстаивание, фильтрацию и вторичное обеззараживание.

Вода забирается из реки через решетки водоприемной камеры и с помощью насосов подается под давлением в распределительную камеру, где через общий коллектор распределяется по отходящим водоводам. Далее вода подается на очистные сооружения, включающие смесители, отстойники, бассейны озонирования, откуда вода самотеком поступает через фильтры в резервуар чистой воды.

Для эффективной работы очистных сооружений насосные агрегаты первого подъема должны обеспечивать подачу воды в соответствии с усредненным водопотреблением.

Неравномерность водопотребления городом определяется суточным графиком и в определенной степени компенсируется аккумулярующей способностью РПВ, однако она не может использоваться полностью из-за того, что по условиям технологии очистки уровень воды в смесителях и отстойниках должен поддерживаться примерно постоянным.

Регулирование режимов работы станций водоподготовки в большинстве случаев осуществляется изменением числа параллельно работающих насосных агрегатов. Обычно насосные агрегаты работают по стандартной схе-

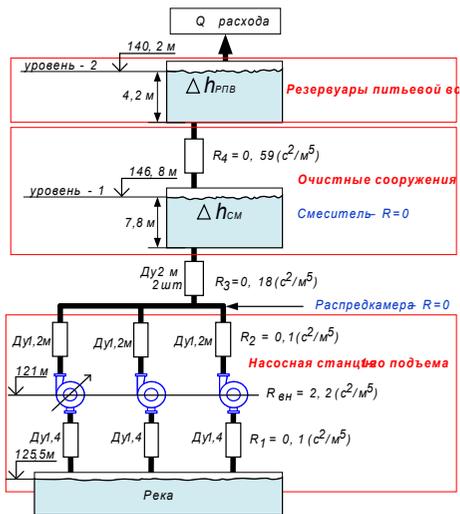


Рис. 1. Технологическая схема станции водоподготовки

ме – в группах по 3 насоса. Один из них включают при снижении водопотребления. Если запасы питьевой воды в резервуаре быстро срабатываются, насос вновь включается. Дискретное регулирование подачи воды на очистные сооружения путем изменения числа работающих насосов приводит к резкому увеличению потока воды и повышает мутность в отстойниках, поэтому наряду с дискретным регулированием применяют дросселирование, т.е. регулирование затворов в ручном режиме.

Проведенные натурные исследования показали, что нерегулируемый электропривод не обеспечивает согласование работы насосных агрегатов первого подъема и очистных сооружений, приводит к частным пускам мощных электродвигателей, износу оборудования и другим негативным последствиям. Указанные обстоятельства позволяют пересмотреть существующую точку зрения, что регулируемый привод целесообразно применять только на насосах II подъема.

**Во второй главе** составлено математическое описание процессов работы насосной станции I подъема.

Структурная схема базовой модели станции водоподготовки дана на рис. 2.

Схема составлена на основе следующих уравнений:

$$H' = H_0 - (R_{вн} + R_1 + R_2)Q^2.$$

Совместная работа 3-х насосов (1 регулируемого и 2 нерегулируемых)

$$Q_{\Sigma} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = \sqrt{\frac{A\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 - H'}{R_{\Sigma}}} + 2\sqrt{\frac{H_0 - H'}{R_{\Sigma}}}.$$

Работа насосов на смеситель

$$H' = h_{см} + R_3Q_{\Sigma}^2.$$

Заполнение смесителя

$$\Delta h_{см} = \frac{1}{S_{см}} \int (Q_{\Sigma} - Q_{рпв}) dt.$$

Объем воды, поступающей в резервуар питьевой воды

$$Q_{рпв} = \sqrt{\frac{h_{см} - h_{рпв}}{R_4}}.$$

Уровень воды в резервуаре

$$\Delta h_{рпв}(t) = \frac{1}{S_{рпв}} \int (Q_{рпв} - Q_{расх}) dt.$$

Для исследования режимов работы станции водоподготовки на основе базовой модели (рис. 2) были созданы три модели, каждая из которых соответствует трем методам регулирования уровня в смесителе:

- Модель станции водоподготовки с дискретной системой регулирования уровня в смесителе путем включения-отключения насосов;

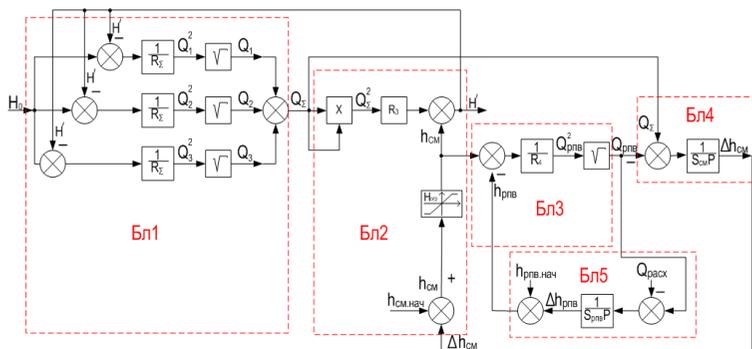


Рис. 2. Структурная схема базовой модели станции водоподготовки

- Модель станции водоподготовки с замкнутой системой регулирования уровня смесителя путем дросселирования запорной арматуры на напорных водоводах к очистным сооружениям;
- Модель станции водоподготовки с замкнутой системой регулирования уровня смесителя путем изменения производительности одного из насосных агрегатов первого подъема.

В качестве регулируемого параметра во всех трех случаях выбирается заданный технологический уровень воды в смесителе  $H_{зад}$ .

В дискретной системе регулирования уровня в смесителе включение – отключение насосных агрегатов осуществляется по сигналу датчиков уровня. Если реальный уровень превышает заданный, то один насос отключается, а при понижении уровня, ниже заданного, включается. Для исследования динамических режимов работы были составлены алгоритм и программа расчета модели. В качестве возмущающего воздействия был принят типовой график водопотребления города  $Q_{расх} = f(t)$ , характеризующийся существенной неравномерностью.

График дискретной системы регулирования приведен на рис.3.

За сутки при выбранном типовом графике  $Q_{расх}$  происходит 4 включения – отключения насоса. Такой режим работы насосных агрегатов неблагоприятен по следующим соображениям. За год включение насосных агрегатов достигает 1460 пусков, т.е. каждый насосный агрегат включается 486 раз при равномерном планировании наработки. В то же время из паспорта электродвигателя СДВ-3-143/51-10УХЛ4 общее количество пусков, не должно превышать 120 пусков в год.

Частые пуски ведут к повышению мутности воды в отстойнике и к ряду других негативных последствий:

- сокращается межремонтный период насосов и электродвигателей, в частности изнашиваются подшипники скольжения;
- сокращается межремонтный период запорной арматуры в системе охлаждения электродвигателя, изнашивается запорная арматура насоса;
- изнашивается коммутационная аппаратура в КРУ 10 кВ и в щитах управления, приводах запорной арматуры.

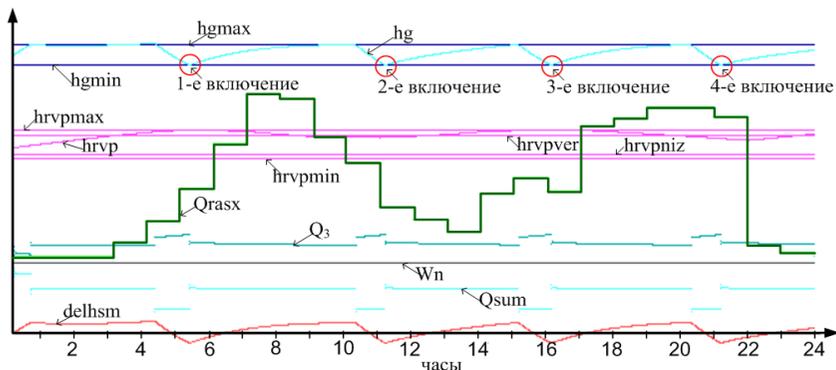


Рис. 3. График модели дискретной системы регулирования уровня смесителя станции водоподготовки

Вторым возможным способом регулирования уровня воды в смесителе является дросселирование. Принцип дросселирования отражается в модели введением переменного гидравлического сопротивления  $R_3$ . Физически это реализуется электроприводом запорной арматуры, регулирующей проходное отверстие в функции сигнала ошибки регулирования уровня смесителя  $\Delta h_g$ .

За счет регулирования запорной арматуры изменение ( $R_3$ ) удастся поддерживать заданный уровень  $H_{гзад}$ , не переходя заданные границы. Если регулировочной способности запорной арматуры не хватит, то предусматривается возможность отключения одного насосного агрегата.

Основными недостатками дросселирования, как способа регулирования расхода жидкости являются:

- существенные непроизводительные затраты энергии на преодоление дополнительного гидравлического сопротивления оказываемого задвижкой. Средняя величина потерь составит 300 тыс. кВт в год;
- быстрый износ и снижение надежности запорной арматуры большого диаметра, которая не предназначена для работы в режиме регулирования потока;
- сложность реализации системы автоматического регулирования, в которой управляющим органом является задвижка.

Наилучшие технико-экономические показатели имеет третий способ регулирования производительности насосной станции – регулирование скорости вращения одного из трех параллельно работающих агрегатов. В этом случае практически без ухудшения к.п.д. насосного агрегата можно плавно регулировать подачу. Реализация этого способа связана с переводом приводного синхронного двигателя на питание от преобразователя частоты. Поскольку речь идет о двигателях большой мощности, то преобразователь частоты должен быть высоковольтным.

Моделирование работы насосной станции с регулируемым приводом показало, что поддержание уровня воды в смесителе не требует включения-отключения насосных агрегатов. Но даже в тех случаях, когда требуется

включать насосный агрегат, его синхронный двигатель включается в режиме частотного пуска, свободного от недостатков, присущих прямому пуску.

Регулирование уровня осуществляется посредством замкнутой системы автоматического регулирования, структурная схема которой представлена на рис.4.

Исследования структурной схемы показали, что поскольку изменение  $Q_{расх}$  (возмущающего воздействия) происходит медленно и на входе системы присутствует фильтр (датчика интенсивности) с большой постоянной времени, то переходные процессы носят апериодический характер, что и требуется для данного технологического процесса.

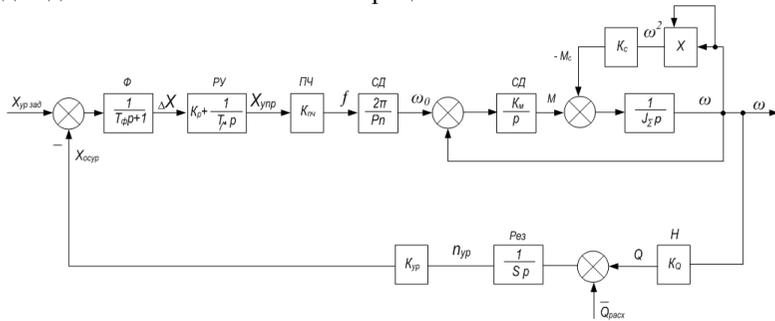


Рис. 4. Упрощенная структурная схема регулирования уровня воды в смеси-теле

Результаты анализа работы станции при различных способах регулирования показывают, что установка регулируемого электропривода на насосных станциях 1-го подъема позволяет улучшить работу очистных сооружений водоподготовки, улучшит процесс регулирования подачи воды на очистные сооружения и приведёт к более полной наработке всех насосных агрегатов первого подъема. Плавное изменение производительности приводит к уменьшению гидравлических ударов в магистральных трубопроводах.

Для оптимизации работы насосной станции и очистных сооружений необходима установка регулируемого электропривода на одном из насосных агрегатов первого подъема для автоматического изменения производительности в зависимости от уровней на очистных сооружениях и резервуарах чистой воды с учетом прогноза водопотребления.

**Третья глава** посвящена исследованию электромагнитных и электромеханических переходных процессов регулируемых электроприводов на базе высоковольтных синхронных двигателей, возникающих при пуске, регулировании скорости и приложении нагрузки.

При частотном регулировании принципиально возможны два способа управления: векторный и скалярный. При векторном способе обобщенный вектор поля статора во всех установившихся и переходных режимах ориентируется в пространстве по положению вектора потока ротора. При этом достигаются оптимальные соотношения тока статора и потока ротора и исключается возможность неконтролируемого превышения угла между пото-

ками, что исключает колебательные движения ротора. При таком управлении синхронный двигатель работает в режиме вентильного двигателя, приобретая регулировочные свойства двигателя постоянного тока. Этот режим управления необходим для динамичных электроприводов, когда требуется быстрое изменение скорости двигателя и малая чувствительность к набросу-сбросу момента нагрузки. Работа синхронной машины в режиме вентильного двигателя достаточно хорошо изучена.

Второй способ – скалярного управления не связан с ориентацией потоков статора и ротора в пространстве. Как при частотном регулировании асинхронного двигателя здесь поддерживается постоянное соотношение между амплитудой и частотой питающего напряжения  $u/f = const$ . Двигатель при этом работает в синхронном режиме с постоянной для данной частоты скоростью вращения и электромагнитным моментом, определяемым угловой характеристикой, которая для машин с явнополюсным ротором имеет вид:

$$M = \frac{3 U_1 E \sin \theta_{эл}}{\omega_0 x_{1d}} + \frac{3 U_1^2}{2 \omega_0} \left( \frac{1}{x_{1q}} - \frac{1}{x_{1d}} \right) \sin 2 \theta_{эл};$$

Первая составляющая момента обусловлена взаимодействием вращающегося поля статора с полем, создаваемым обмоткой возбуждения ротора. Вторая представляет собой реактивный момент, возникающий из-за неравенства индуктивностей по продольной и поперечной осям.

Поскольку в области моментов, близких к номинальному  $\sin \theta_{эл} \approx \theta_{эл}$ , то  $dM = C_{эм}(\omega_0 - \omega)dt$  и синхронный момент является упругим, что определяет склонность синхронного двигателя к колебаниям скорости в переходных режимах.

Для демпфирования колебаний на роторе двигателя предусмотрена короткозамкнутая демпферная обмотка, которая при отклонении скорости  $\omega$  от синхронной  $\omega_0$  создает асинхронный момент, устраняющий колебания ротора. Эта же демпферная обмотка является пусковой при прямом пуске синхронного двигателя. Результирующий момент синхронного двигателя в переходных режимах является суммой синхронного и асинхронного моментов  $M = M_{син} + M_{ас} = C_{эм}\theta_{эл} + \beta(\omega_0 - \omega)$

где  $\beta$  – жесткость механической характеристики при работе на демпферной обмотке. Упрощенная структурная схема синхронного двигателя дана на рис. 5.

При исследовании переходных режимов ставились следующие задачи:

1. Исследовать прямой пуск синхронного двигателя с целью определения негативных явлений, возникающих в этом режиме.

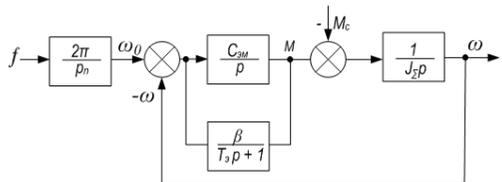


Рис. 5. Упрощенная структурная схема синхронного двигателя при частотном скалярном управлении при  $U/f=const$

2. Исследовать частотный пуск синхронного двигателя с реальной нагрузкой и сопоставить пусковые характеристики с режимом прямого пуска.
3. Исследовать режим приложения нагрузки при работе на различных скоростях.
4. Определить допустимую интенсивность разгона при частотном пуске.
5. Исследовать влияние начального угла положения ротора на характеристики частотного пуска.

Указанные вопросы для частотно-регулируемого синхронного электропривода при скалярном управлении исследованы недостаточно.

При компьютерном моделировании синхронного двигателя, в качестве модели двигателя была принята стандартная модель Synchronous Machine SI Fundamental из библиотеки SimPowerSystems Matlab/Simulink.

Результаты моделирования пуска представлены на осциллограмме рис.6.

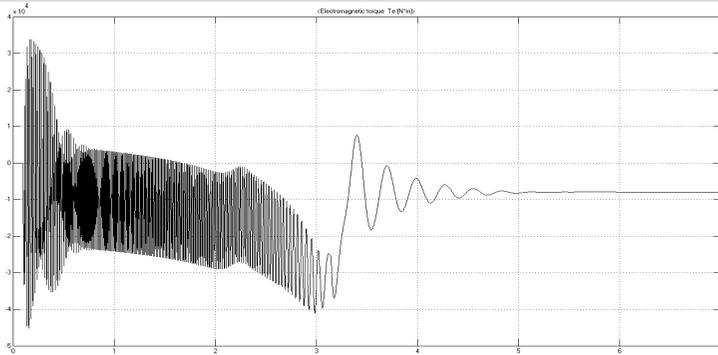


Рис. 6. Прямой пуск синхронного двигателя  $M=f(t)$

При прямом пуске наблюдаются большие динамические пики электромагнитного момента, достигающие 4-х кратного значения. Пусковой ток статора в 6,0 раз больше номинального. Напряжение на обмотке возбуждения достигает значений, значительно превышающих номинальное. Во время пуска в пусковой обмотке выделяется энергия порядка 1250 кДж.

Расчетная модель частотного пуска двигателя представлена на рис. 7. К двигателю подключается источник напряжения с возможностью регулирования частоты и напряжения с различной скоростью нарастания напряжения и частоты.

Для всех режимов пуска в обмотке возбуждения, до начала пуска, протекает установившийся ток, величина которого подобрана таким образом, чтобы при номинальной скорости двигатель потреблял реактивную мощность соответствующую  $\cos \varphi = 0,9$ . На рис.8 представлена осциллограмма частотного пуска.

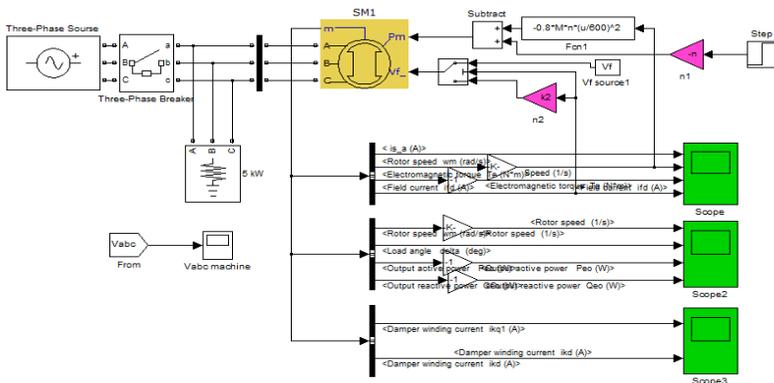


Рис. 7. Расчетная модель частотного пуска двигателя

В момент времени  $t=10$  сек. подается напряжение переменной частоты, процесс пуска длится 10 секунд, за это время частота меняется от 0 до 50 Гц, напряжение от 0 до 10000 В (напряжение линейное). Нагрузка вентиляторная. Установившееся значение тока ротора 70 А, установившийся угол нагрузки  $-40^\circ$ .

На устойчивость синхронного режима при пуске (разгоне) двигателя определенное значение имеет интенсивность пуска. Если время разгона до номинальной скорости превышает 1,5 сек. (примерно три электромеханических постоянных времени), то разгон происходит плавно с сохранением синхронного режима. При большей интенсивности разгона возможно выпадение из синхронного режима и запуск в асинхронном режиме.

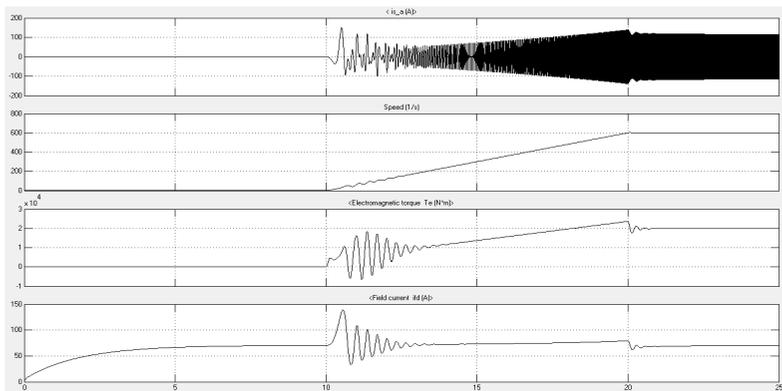


Рис. 8. Частотный пуск двигателя

1 - ток статора, А; 2 - частота вращения двигателя, об./мин.; 3 - электромагнитный момент, Н·м, 4 - ток ротора, А

Величина тока возбуждения при пуске в синхронном режиме оказывает влияние на величину колебаний электромагнитного момента – чем больше ток возбуждения, тем колебания меньше.

Уменьшение колебаний ротора в начальный период пуска возможно, если принудительно установить ось ротора в наиболее выгодное положение – на  $-90^0$  относительно оси фазы А статора. Это может быть достигнуто предварительной (перед пуском) подачей постоянного тока в две фазы статора.

При приложении нагрузки при работе на рабочей частоте в установившемся режиме возникают колебания ротора и при относительно малых значениях тока возбуждения возможно выпадение двигателя из синхронизма. Для предотвращения этого необходима форсировка возбуждения при приложении нагрузки.

**Четвертая глава** посвящена выбору основного электрооборудования для частотно-регулируемого электропривода насосных агрегатов I подъема. Регулируемые электроприводы выполняются на основе существующих синхронных двигателей серии СДВЗ с напряжением статора 6,0 и 10,0 кВ.

Сформированы требования к высоковольтным преобразователям частоты в составе частотно-регулируемого синхронного электропривода насосных агрегатов. Основные требования – выходное напряжение – до 10,0 кВ и хорошее качество выходного напряжения и тока преобразователя частоты в части содержания высших гармоник, оказывающих кроме общих недостатков влияние на нагрев демпферной клетки синхронного двигателя. Допустимая величина полного коэффициента гармоник  $THD \leq 5\%$ .

Анализ возможных технических решений по построению преобразователя частоты на 10 кВ для питания синхронных двигателей насосных агрегатов показал, что в настоящее время наиболее эффективным и отработанным решением является схема многоуровневых инверторов напряжения с каскадным соединением низковольтных инверторов с общим трансформатором.

На рис. 9 приведена схема многоуровневого инвертора напряжения с последовательным включением в каждую фазу 9 однофазных инверторов (см. рис. 10) с выходным напряжением 690 В, что позволяет получить на выходе преобразователя линейное напряжение 10,0 кВ. Каждая ячейка питается от одной из 27 групп вторичных обмоток входного трансформатора. Регулирование величины выходного напряжения производится синхронизированной широтно-импульсной модуляцией напряжения в каждой ячейке. Данный принцип построения позволяет получить практически синусоидальную форму выходного напряжения и тока.

Возможно также применение преобразователей частоты с автономным инвертором тока с широтно-импульсной модуляцией тока, однако такая схема имеет существенно более высокую стоимость.

Для насосных станций первого подъема характерно групповое включение насосов. При этом два насоса могут работать в нерегулируемом режиме,

один в регулируемом. Целесообразно на группу из трех насосов иметь один преобразователь частоты (или два на группу из 6-7 насосов).

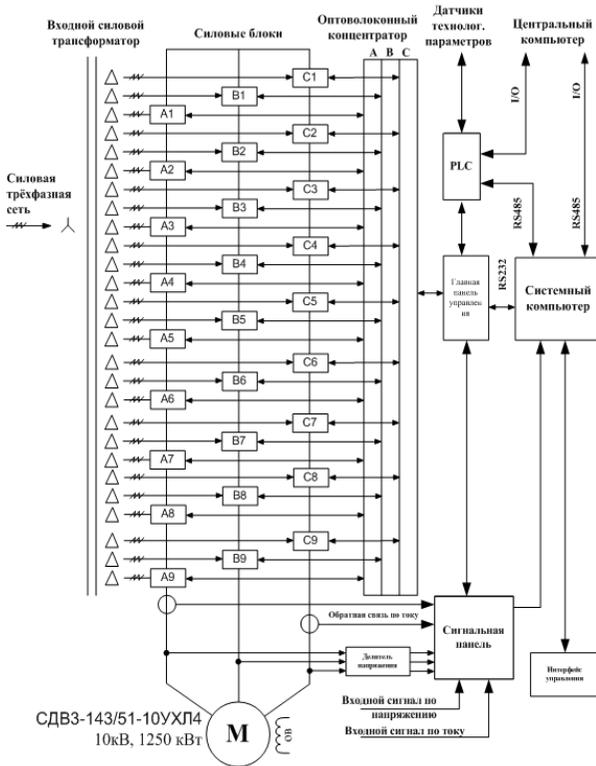


Рис. 9. Схема многоуровневого каскадного преобразователя частоты с многоуровневым АИН

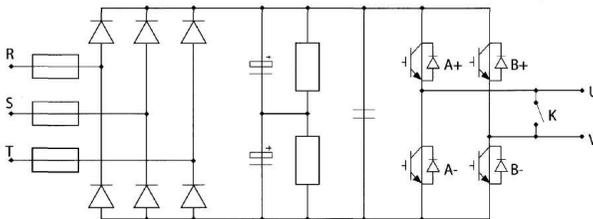


Рис. 10. Схема силового блока каскадного преобразователя частоты

С этой целью система КРУ насосной станции должна строиться таким образом, чтобы иметь возможность подключать к преобразователю частоты любой из двигателей. Такая схема обеспечивает плавное регулирование производительности насосной станции и частотный пуск любого из насосных агрегатов. Должна быть предусмотрена синхронизация преобразователя частоты с питающей сетью для перевода двигателя на питание от сети.

Для частотно-регулируемого синхронного электродвигателя могут применяться в части силовой схемы те же тиристорные агрегаты возбуждения, что и для нерегулируемых двигателей, используемые в настоящее время. Поскольку каждый двигатель насосного агрегата может работать как в нерегулируемом режиме, так и в регулируемом, то автоматическая система возбуждения должна сохранять те функции, которая имела по управлению реактивной мощностью система регулирования возбуждением двигателя (например, поддержание напряжения в узле нагрузки, работа с опережающим коэффициентом мощности).

При питании синхронного двигателя от преобразователя частоты функции автоматического регулирования возбуждения несколько изменяются. Наиболее целесообразно регулирование по минимуму потерь (тока статора) независимо от скорости и нагрузки двигателя. Это достигается регулированием с поддержанием коэффициента мощности статора близким к единице.

Предложена структурная схема автоматического регулирования возбуждения синхронного двигателя при частотном регулировании скорости (рис. 11). Схема содержит внутренний контур тока, настроенный на модульный оптимум и внешние контуры по коэффициенту мощности двигателя и производной от тока статора. Схема рассчитана на микропроцессорную реализацию.

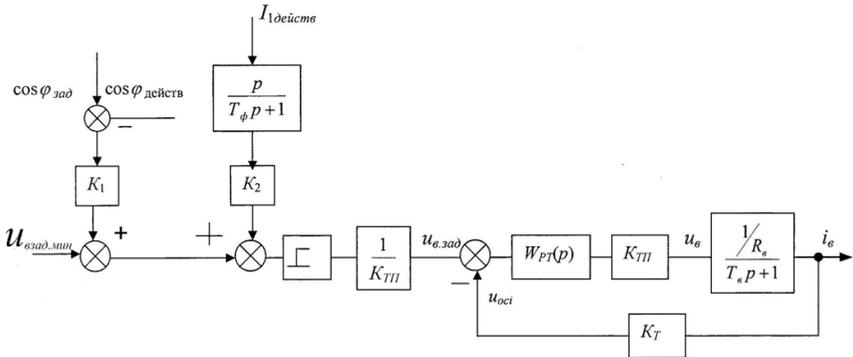


Рис. 11. Структурная схема автоматического регулирования тока возбуждения

Исследование предложенной системы регулирования на компьютерной модели показали ее работоспособность, удовлетворительные технические характеристики и устойчивость синхронного режима.

Внедрение систем автоматизированного управления и регулируемого электропривода насосной станции повышает надежность работы оборудования и позволяет оптимизировать работу насосной станции с очистными сооружениями и уменьшает численность оперативного персонала.

При исследовании режимов работы оборудования и сооружений действующей станции водоподготовки выявились некоторые негативные факторы, которые являются последствием прямых пусков насосных установок первого подъема. При прямом пуске насосной установки на насосе до открытия на-

порного дискового затвора повышается напор выше номинального, насос работает с вибрацией, такой режим работы может привести к пробоем сальникового уплотнения.

Основной экономический эффект внедрения регулируемого электропривода насосных агрегатов достигается за счет увеличения межремонтного цикла электрических двигателей, коммутационной аппаратуры, насосов, запорной арматуры, что обусловлено тем, что существенно снижается число прямых пусков мощных насосных агрегатов.

Плавное изменение подачи воды на очистные сооружения позволит снизить мутность воды тем самым снизить грязевую нагрузку на фильтры.

Проведенные расчеты экономии денежных средств, достигаемой от применения регулируемого электропривода на одном из трех насосных агрегатов I подъема, составляют 3,4 млн. рублей в год, что обеспечивает срок окупаемости реконструкции насосной станции около 3 лет.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Все города и крупные промышленные предприятия имеют системы водоснабжения, включающие насосные станции первого подъема, оснащенные насосными агрегатами большой мощности. Исследования целесообразности применения регулируемого электропривода насосных агрегатов станций первого подъема систем водоснабжения проводились впервые.

2. Насосные станции первого подъема содержат сложный комплекс электромеханического и гидравлического оборудования. Комплекс включает в себя главные насосные агрегаты с высоковольтными синхронными двигателями большой мощности, запорную гидравлическую арматуру с электрическим приводом, высоковольтное распределительное устройство и систему технологического оборудования.

Существующие комплексы оборудования не адаптированы для ведения оптимального технологического процесса и управляются оператором.

3. Поскольку расход воды изменяется в течение суток в широких пределах возникает необходимость регулирования производительности не только станций второго подъема, что очевидно, но и станций первого подъема с целью поддержания в определенных пределах уровня воды в технологических резервуарах водоподготовки. В настоящее время регулирование производительности насосных станций первого подъема производится дискретно путем включения-отключения насосных агрегатов (возможно сочетание с дросселированием).

Недостатками данного способа является большое число пусков мощных насосных агрегатов, ведущие к износу оборудования и снижению его надежности, затрудняющие автоматизацию технологических процессов.

4. Разработана имитационная компьютерная модель технологического процесса насосной станции первого подъема, на которой исследованы три варианта поддержания уровня воды в смесителе на выходе насосной станции: включением-отключением насосов; дросселированием общего трубо-

провода перед входом в очистные сооружения; плавным регулированием производительности одного из насосов путем изменения скорости его вращения.

При исследовании на модели было выявлено, что регулирование путем включения-отключения насосов сопряжено с частыми пусками насосных агрегатов большой мощности 4 пуска в сутки (1460 пусков в год). Такой режим работы крайне неблагоприятно сказывается на ресурсе и надежности синхронных двигателей, коммутационной аппаратуры, гидравлической запорной арматуры, ведет к нарушению ламинарности течения воды, повышению ее мутности, ухудшает качество воды на очистных сооружениях.

5. С целью анализа негативных явлений, связанных с частыми пусками мощных синхронных двигателей проведено компьютерное моделирование переходных процессов в синхронном двигателе при прямом пуске и при частотном регулировании.

Исследования на модели показали, что при прямом пуске синхронных двигателей наблюдаются значительные пусковые токи, динамические колебания электромагнитного момента с двукратной амплитудой.

Частотный пуск при  $U/f=\text{const}$  свободен от указанных недостатков. Определены допустимые ускорения при пуске и алгоритм управления при начальном произвольном положении ротора.

Процесс частотного пуска протекает в два этапа. На первом – до скорости примерно 20% происходит втягивание двигателя в синхронизм, если первоначальное положение ротора было произвольным. Затем, если ускорение не превышает допустимого значения, происходит повышение скорости синхронно с нарастанием частоты напряжения статора.

6. Проведено исследование переходных процессов в синхронном двигателе при регулировании скорости вращения, набросе и сбросе нагрузки при частотном скалярном управлении без контроля углового положения ротора. Показано, что наиболее простая система скалярного управления с поддержанием  $U/f=\text{const}$  по своим регулировочным качествам может быть использована в электроприводах насосных агрегатов, где не требуется высокая динамичность управления.

7. Рассмотрены системы возбуждения синхронного двигателя, используемого в электроприводе насосных агрегатов. Показано, что для частотно-регулируемых синхронных приводов со спокойной нагрузкой наиболее целесообразно регулировать ток возбуждения, так чтобы ток статора был минимален, то есть поддерживать  $\cos \varphi$  близким к единице. Предложена структурная схема САПР возбуждения синхронного двигателя, реализующая этот алгоритм.

8. Проведены экспериментальные исследования на действующей насосной станции, направленные на выявление вредных факторов, которые связаны с частыми пусками мощных насосных агрегатов. Реально проявляется повышенный износ синхронных двигателей и запорной гидравлической

арматуры. При частых пусках повышается мутность воды, увеличивается расход реагентов.

9. В результате проведенных исследований доказана техническая и экономическая целесообразность применения регулируемого электропривода на основе высоковольтного преобразователя частоты, подключаемого к одному из двигателей насосов первого подъема станций водоподготовки. Применение регулируемого электропривода позволяет точно поддерживать уровень воды в резервуарах системы водоподготовки, повысить качество воды, уменьшить количество прямых пусков мощных насосных агрегатов, сократить затраты на текущий ремонт и техническое обслуживание оборудования, автоматизировать технологический процесс водоподготовки и сократить обслуживающий персонал.

10. Результаты, полученные в диссертации, приняты для использования при реконструкции Рублевской станции водоподготовки г.Москвы.

**Публикации автора по теме диссертации, научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК**

1. Горюнов А.Н. Исследование влияния прямых пусков насосных агрегатов I подъема на работу очистных сооружений станции водоподготовки // Приводная техника. – 2009. – № 3 – С. 13-17.

2. Горюнов А.Н. Взаимодействие насосных установок первого подъема и очистных сооружений водоподготовки // Водоснабжение и санитарная техника. – 2010. – № 1 – С.24-26.

3. Горюнов А.Н., Онищенко Г.Б. Регулируемый электропривод насосных агрегатов первого подъема станций водоподготовки // Вестник ИГЭУ. - 2012. - № 6 - С.131-134.

**Публикации в других изданиях**

4. Горюнов А.Н., Онищенко Г.Б. Исследование целесообразности применения регулируемого электропривода на насосах первого подъема // Электротехнические и компьютерные системы. – 2011. – № 3. – С. 191-194.

5. Горюнов А.Н. Технологические особенности режимов работы насосных установок первого подъема на станциях водоподготовки // Новые технологии. – 2010. – № 6 – С. 28-31.

6. Горюнов А.Н. Регулируемый электропривод насосных агрегатов первого подъема станций водоподготовки // Труды VII Международной конференции по автоматизированному электроприводу (Иваново, 2-4 октября 2012 г.). – 2012 – С. 574-577.

7. Горюнов А.Н. Автоматическое регулирование тока возбуждения синхронных двигателей при частотном управлении // Новые технологии. – 2012. – № 5-6. – С.25-28.

Подписано в печать «\_\_»\_\_\_\_\_. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.  
Печать офсетная. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ \_\_\_\_\_.

Типография