

На правах рукописи

МЕЛИХОВ Артем Юрьевич

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ ПЛАВНЫМ
ПУСКОМ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ
СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Специальность: 05.13.06 – Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами (промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Орел 2007

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования Орловском государственном техническом университете

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Колоколов Юрий Васильевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Загрядцкий Владимир Иванович

кандидат технических наук, доцент
Хвостов Вячеслав Алексеевич

Ведущая организация: Белгородский Государственный
Технологический Университет
им. В.Г. Шухова

Защита состоится «9» ноября 2007 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д212.182.01 Орловского государственного технического университета (302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 40; факс: (4862) 41-98-19; тел: (4862) 41-66-84).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Орловского государственного технического университета.

Автореферат разослан «9» октября 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.182.01,
доктор технических наук, профессор

 А.И. Суздальцев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время автоматизация технологических процессов электромеханического преобразования энергии продолжает развиваться по трем основным направлениям: повышение надежности, энергоэффективности и экономичности [Браславский И.Я. и соавт., 2004; Капустин Н.М. и соавт., 2004; Андрижиевский А.А. и соавт., 2005; 1]. Эта тенденция принимает особое значение в тех сферах промышленности и народного хозяйства, в которых основу технологических процессов составляет асинхронный электропривод (АЭП) исполнительных механизмов. В частности, АЭП турбомеханизмов (вентиляторы, компрессоры, насосы и др.) по различным оценкам потребляет до 25% всей вырабатываемой электроэнергии [Браславский И.Я. и соавт., 2004; Lee K. и соавт., 2005] и, следовательно, в приложение к этой сфере поступательное движение по любому из перечисленных выше направлений может привести к значительному совокупному эффекту.

В части энергии, потребляемой турбомеханизмами, наибольшая доля принадлежит центробежным насосам, применяющимся в основном для транспортирования жидкостей в системах водоснабжения, водоотведения и магистральных трубопроводах. Это обстоятельство на фоне стремительного повышения тарифов на электроэнергию придает особую **актуальность** проблеме автоматизации и энергосбережения в системе коммунального и промышленного водоснабжения.

Решение задачи автоматизации управления насосной станцией (НС) системы водоснабжения в первую очередь связано с выбором и применением такого типа АЭП, который позволит удовлетворить требования технологического процесса к надежности, энергоэффективности и экономичности. Благодаря высокой надежности, удовлетворительным стоимостным, массогабаритным и регулировочным показателям широкое распространение в качестве электропривода насосных агрегатов получил АЭП без обратной связи по скорости с системой импульсно-фазового управления тиристорным преобразователем напряжения (СИФУ-ТПН) [Загорский А.Е. и соавт., 2006; Поздеев Д.А. и соавт., 2006; Ткачук А.А. и соавт., 2007; Зюзев А.М., Нестеров К.Е., 2007; 2].

Основы теории АЭП с СИФУ-ТПН были заложены в конце 60-х, начале 70-х годов XX века. В настоящее время развитие этого направления продолжается рядом отечественных и зарубежных научных школ: И.Я. Браславский, А.М. Зюзев, А.В. Костылев и др. (Уральский ГТУ); А.К. Загорский, В.И. Радин и др. (АО ВНИИЭ); В.И. Хрисанов (СПб ГУ телекоммуникаций), Р. Бржезинский (Технический университет г. Зелона Гу-

ра (Польша)); О.А. Андрищенко, А.А. Бойко и др. (Одесский Национальный политехнический университет); N.A. Demerdash, B. Mirafzal, M.G. Solveson (Университет Маркетта, Милуоки, шт. Висконсин); Gürkan Zenginobuz, Isik Cadirci и др. (Средневозточнй технический университет г. Анкары (Турция)); Ю.В. Колоколов, С.Л. Косчинский и др. (Орловский государственный технический университет совместно с ЗАО «Электротекс» г. Орел).

Главное назначение АЭП насосного агрегата заключается в том, чтобы сформировать такую траекторию пуска (останова) двигателя насоса от начальной (номинальной) скорости до номинальной (начальной), которая, с одной стороны, обеспечит ограничение бросков тока в статорных обмотках и знакопеременных колебаний электромагнитного момента двигателя, с другой стороны, ограничит прирост давления в трубопроводе до допустимого значения. Сущность указанной выше задачи привела к тому, что АЭП, обеспечивающий ее решение, получил название устройства плавного пуска (УПП).

Современный уровень разработки УПП характеризуется унификацией их силовой части. В этой связи, повышение эффективности процессов преобразования электромеханической энергии в УПП в большей степени связано с усовершенствованием алгоритмов формирования пускотормозных траекторий асинхронных двигателей (АД).

В значительной части публикаций, посвященных разработке новых алгоритмов плавного пуска АД, основное внимание уделяется вопросам ограничения свободных составляющих токов статорных обмоток и электромагнитного момента на валу АД в переходных режимах. Однако проблема взаимосвязи энергоэффективности управления плавным пуском АД и вводимых при этом ограничений фактически не рассматривается. Это обстоятельство затрудняет разработку новых энергоэффективных алгоритмов управления плавным пуском АД, что обуславливает *актуальность и практическую значимость* диссертационной работы.

Объект исследования: процесс электромеханического преобразования энергии в устройстве плавного пуска асинхронных двигателей насосной станции системы водоснабжения.

Предмет исследования: процесс управления преобразованием энергии в устройстве плавного пуска, построенном на базе разомкнутой по скорости существенно-нелинейной системы импульсно-фазового управления тиристорным преобразователем напряжения асинхронного двигателя.

Цель диссертационной работы: сокращение потерь электрической энергии в обмотках асинхронных двигателей насосной станции системы

водоснабжения при управляемом формировании пуско-тормозных траекторий.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- сформулировать ограничения и определить критерий эффективности процессов электромеханического преобразования энергии в устройстве плавного пуска АД насосной станции;
- разработать математическую модель и методику моделирования процесса преобразования электромеханической энергии в насосной станции системы водоснабжения;
- разработать алгоритм управления плавным пуском асинхронных двигателей, позволяющий сократить потери электрической энергии в их обмотках при удовлетворении ограничений, накладываемых на показатели переходных процессов преобразования электромеханической энергии в АЭП насосной станции системы водоснабжения;
- провести экспериментальное исследование адекватности математической модели системы «электрическая сеть - УПП - АД - насос - трубопровод».

Основные научные результаты, выносимые на защиту:

- адаптивный алгоритм управления плавным пуском асинхронных двигателей, позволяющий сократить потери электрической энергии в обмотках АД, посредством расчета уставки максимального переходного тока с учетом ограничений, накладываемых требованиями безопасности, и текущего состояния процесса электромеханического преобразования энергии в системе «электрическая сеть - УПП - АД - насос - трубопровод»;
- комплекс математических моделей и методика моделирования процессов электромеханического преобразования энергии в УПП АД типовой насосной станции системы водоснабжения при неустановившемся движении жидкости в трубопроводе произвольной конфигурации, позволяющие воспроизводить и исследовать условия протекания переходных процессов в системе «электрическая сеть - УПП - АД - насос - трубопровод» с минимальными затратами машинного времени.

Научная новизна. В работе решена задача автоматизации процессов управления плавным пуском асинхронных двигателей насосной станции системы водоснабжения. В том числе:

- разработан адаптивный алгоритм управления плавным пуском асинхронных двигателей, основанный на формировании программы пуска последовательно для каждого асинхронного двигателя насосной стан-

ции с учетом текущего значения переменных состояния системы импульсно-фазового управления тиристорным преобразователем напряжения АД и гидравлической подсистемы насосной станции, реализованных в виде математических моделей, встроенных в алгоритм.

- Разработан оптимальный (по критерию затрат машинного времени) алгоритм численного интегрирования математической модели системы импульсно-фазового управления тиристорным преобразователем напряжения (СИФУ-ТПН) асинхронного двигателя, основанный на адаптации разностного метода интегрирования к текущему состоянию модели.
- Разработана методика моделирования плавного пуска АД насосной станции системы водоснабжения, включающая в свой состав адаптивный алгоритм управления плавным пуском АД и оптимальный алгоритм интегрирования модели СИФУ-ТПН-АД, и, позволяющая с минимальными затратами машинного времени проводить исследования переходных процессов электромеханического преобразования энергии в системе «электрическая сеть - УПП - АД - насос - трубопровод» при неустановившемся движении жидкости в трубопроводе произвольной конфигурации.

Практическая значимость. Программная реализация предложенной математической модели, методики моделирования и адаптивного алгоритма управления плавным пуском АД позволяет сократить потери энергии в обмотках двигателей в переходных режимах путем внедрения и использования разработанного программного обеспечения на автоматизированном рабочем месте диспетчера насосной станции.

Методы исследования. При проведении исследования использовались методы теоретической электротехники, электромеханики, теории импульсных систем автоматического управления, теории устойчивости, теоретической и прикладной гидродинамики, численные методы интегрирования дифференциальных уравнений.

Реализация работы. Математические модели, методика моделирования и адаптивный алгоритм управления плавным пуском АД, предложенные в диссертационной работе, составляют основу пакета прикладных программ, предназначенных для интерактивного управления, мониторинга и диагностики автоматизированной системы управления плавным пуском асинхронных двигателей типовой насосной станции системы водоснабжения.

Апробация работы. Изложенные в настоящей диссертационной работе материалы докладывались на: третьем международном семинаре «Компьютерное моделирование электромагнитных процессов в физиче-

ских, химических и технических системах» в 2004 г., всероссийской конференции «Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве» в 2004 г., международной научно-технической конференции «Информационные технологии в науке, образовании и производстве» в 2004 г. и 2006 г., десятой и одиннадцатой международных студенческих олимпиадах по автоматическому управлению (Балтийская олимпиада – ВОАС-2004, ВОАС-2006) в 2004 г. и 2006 г. соответственно, всероссийской научной конференции «Методы прикладной математики и компьютерной обработки данных в технике, экономике и экологии» в 2004 г., всероссийской научной конференции «Управление и информационные технологии» (УИТ-2005) в 2005 г., международной конференции «Высокие технологии энергосбережения» в 2005 г., третьей международной научной конференции по физике и управлению (The 3rd International IEEE Scientific Conference on Physics and Control - PhysCon 2007) в 2007 г., третьем международном семинаре «Периодические системы управления» (3rd IFAC Workshop Periodic Control Systems (PSYCO'07)) в 2007 г.

Публикации по теме исследования. По результатам исследования опубликовано 14 работ, в том числе две статьи (из них одна статья в российском журнале, рекомендованном ВАК РФ для публикации результатов научных исследований). Список работ приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 180 страницах и включает в свой состав оглавление, введение, четыре главы собственных исследований, заключение, список литературы из 152 наименований и 4 Приложения. Работа проиллюстрирована 54 рисунками и содержит 7 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации; сформулированы цель и задачи исследования; определены научная новизна, практическая значимость; указаны основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведено исследование предметной области и проблем автоматизации процессов управления преобразованием энергии в УПП АД насосной станции системы водоснабжения. Предложена обобщенная структурная схема НС. Дано определение автоматизированной системе управления плавным пуском (АСУПП) АД с указанием критерия эффективности управления и ограничений, накладываемых требованиями безопасности. Предложена структура АСУПП АД, перечислены основные

требования к ее математической модели.

На основании анализа типовых структурных схем подачи, распределения и дальнего транспорта воды [Попкович Г.С., Гордеев М.А., 1986; Эгильский И.С., 1988; Larock В.Е. и соавт., 2000] предложена обобщенная структурная схема насосной станции, включающая элементы перечисленных подсистем (рис. 1).

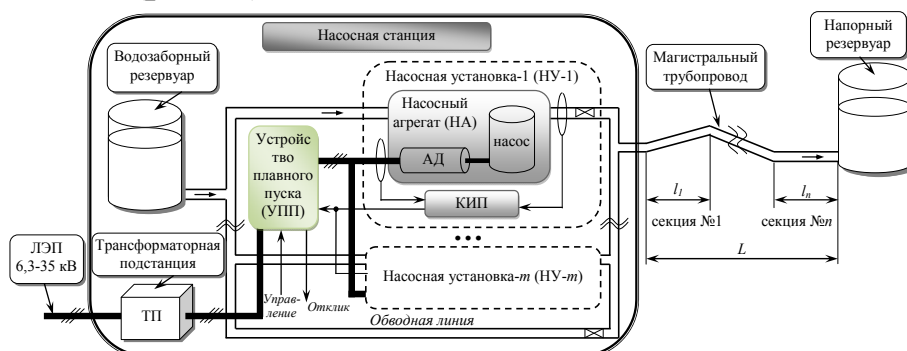


Рис. 1. Обобщенная типовая структура НС системы водоснабжения

Одна из функций АСУ АЭП насосной станции заключается в пуске и останове асинхронных двигателей насосных агрегатов. Многоплановость проблемы формирования пуско-тормозных траекторий, необходимость создания и использования информационного, математического и программного обеспечения для ее эффективного решения, привели к появлению нового подкласса АСУ АЭП, получившего название автоматизированных систем управления плавным пуском асинхронных двигателей (АСУПП АД) [Поздеев и соавт., 2006].

Следуя определению автоматизированной системы управления, устанавливаемого ГОСТ 24.103-84¹, под АСУПП АД будем понимать комплекс средств технического, информационного, математического и программного обеспечения для формирования управляющих сигналов и передачи их без потерь и искажения на устройство плавного пуска АД насосных агрегатов с целью наиболее эффективного протекания переходных процессов в системе «электрическая сеть - УПП - АД - насос - трубопровод». Критерием эффективности в данном случае выступает минимизация потерь электроэнергии с учетом установленных ограничений. На основании анализа литературных источников [Solvenson M.G. и соавт., 2006; Поздеев Д.А. и соавт., 2006; Загорский А. и соавт., 2006] **в работе приняты следующие ограничения:**

1. Величина ударного пускового тока АД $I_{уп}$, А (наибольшая амплитуда статорных токов двигателя в продолжение переходного процесса) не

¹ ГОСТ 24.103-84 «Автоматизированные системы управления. Основные положения»

должна вызывать падение номинального напряжения в точке общего присоединения к сети ниже значения $\Delta U_{\max, \text{доп}}$, устанавливаемого ГОСТ 13109-97². Выполнение этого условия обеспечивает нормальную работу электрического оборудования насосной станции, в том числе вычислительной техники, контрольно-измерительной аппаратуры и прочих.

2. Величина $I_{\text{УП}}$ не должна превышать амплитуду пускового тока АД $I_{\text{П}}$, А, устанавливаемую производителем данного двигателя. Выполнение этого условия обеспечит защиту обмоток АД от механических перегрузок, превышающих величину, устанавливаемую заводом изготовителем.

3. Характер изменения токов статорных обмоток АД в течение переходного процесса не должен вызывать увеличение мгновенной температуры статорных обмоток АД θ_s , °С, выше предельно допустимого среднего значения $\theta_{\max, \text{доп}}$, °С, устанавливаемого ГОСТ 27895³ для системы изоляции соответствующего класса нагревостойкости.

4. Продолжительность переходных процессов $T_{\text{П}}$, с, должна быть выбрана такой, чтобы, с одной стороны, возникающая при этом свободная составляющая статорных токов АД не приводила к нарушению условий 1-3, с другой стороны, наибольший прирост давления в трубопроводе ΔP_{\max} , Па, вызванный таким переходным процессом, не превышал установленной максимально допустимой величины $\Delta P_{\max, \text{доп}}$, Па.

На основании анализа: вариантов реализации системы управления тиристорными преобразователями напряжения различной конфигурации; состава управляющей, информационной и вспомогательной функций АСУПП АД предложена структурная схема АСУПП АД для типовой НС системы водоснабжения (рис.2).

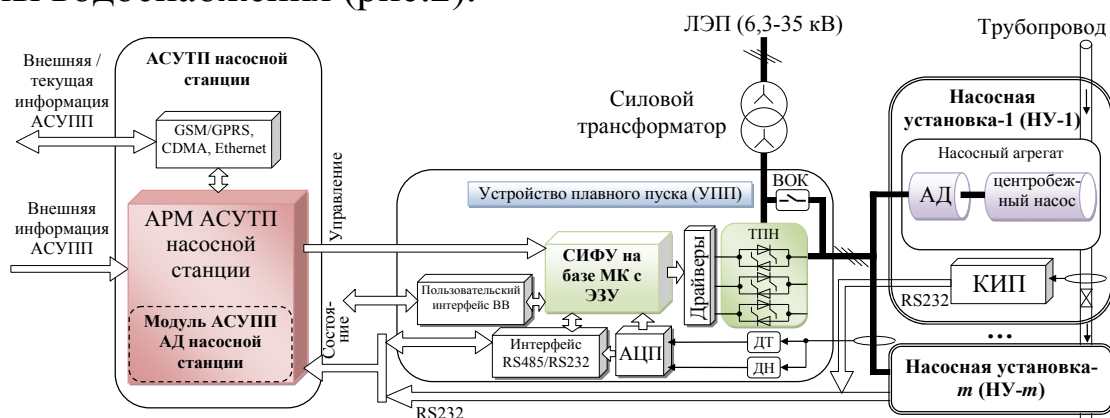


Рис. 2. Структурная схема АСУПП АД насосной станции системы водоснабжения

В структурной схеме АСУПП АД (рис. 2) устройство плавного пуска

² ГОСТ 13109-97 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения»

³ ГОСТ 27895 «Машины электрические вращающиеся. Встроенная температурная защита»

построено на основе: системы импульсно-фазового управления (СИФУ) [2], реализованной на микроконтроллере (МК) с энергонезависимым запоминающим устройством (ЭЗУ); симметричного трехфазного ТПН с драйверами тиристоров и внешним обводным контактором (ВОК); АЦП; датчиков и программно-аппаратных интерфейсов ввода-вывода. Кроме этого, в состав АСУПП АД входит коммутационное высоковольтное оборудование с устройствами релейной защиты и автоматики, не показанное на рис. 2.

В структуре энергетических потерь в АД наиболее значительная часть принадлежит потерям в обмотках статора и ротора двигателя [Браславский И.Я. и соавт., 2004; Solveson M.G. и соавт., 2006]. Для пояснения дальнейшего изложения приведем выражение мощности потерь в обмотках статора и ротора трехфазного АД:

$$\Delta P(t) = \Delta P_s(t) + \Delta P_r(t) = R_s [i_{s\alpha}^2(t) + i_{s\beta}^2(t) + i_{s\gamma}^2(t)] + R_r [i_{r\alpha}^2(t) + i_{r\beta}^2(t) + i_{r\gamma}^2(t)], \quad (1)$$

где R_s (R_r) – активное сопротивление статорной (роторной) обмотки АД; $i_{s\alpha}(t), i_{s\beta}(t), i_{s\gamma}(t)$ [$i_{r\alpha}(t), i_{r\beta}(t), i_{r\gamma}(t)$] – мгновенные статорные (роторные) токи обмоток АД в $\alpha - \beta - \gamma$ системе координат. При этом потери энергии ΔW , Вт, за время переходного процесса T_{Π} составляют:

$$\Delta W = \int_0^{T_{\Pi}} \Delta P(t) dt. \quad (2)$$

На рис. 3 приведены графики изменения потерь энергии в АД при прямом (неуправляемом) пуске $\Delta W_{\text{НП}}$ в отношении к потерям энергии при плавном (управляемом) пуске $\Delta W_{\text{УП}}$ в функции длительности нарастания

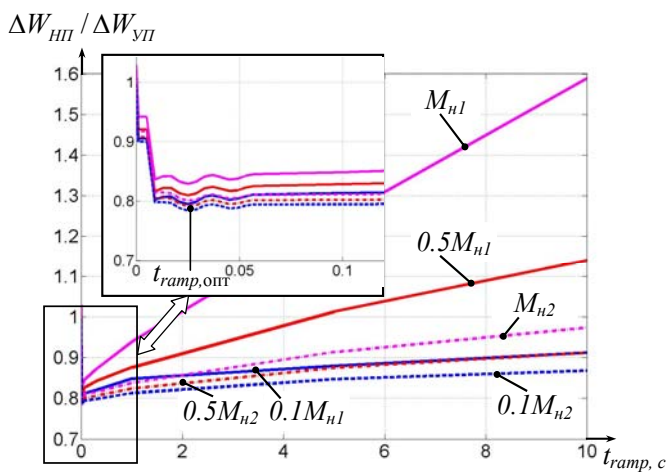


Рис. 3. Изменение относительных потерь энергии при плавном пуске АД

угла управления ТПН (t_{ramp}). При этом за T_{Π} при вычислении интеграла (2) принимался момент времени, в который мгновенная угловая скорость ротора АД $\omega_r(t)$ попадала и далее не покидала диапазон $\omega_r(t) \in [0.95 \cdot \omega_{r,y}; 1.05 \cdot \omega_{r,y}]$, где $\omega_{r,y}$ – установившееся значение угловой скорости ротора АД. Построение кривых рис. 3 проводилось для двух АД со значением момента сопротивления на валу $M_{c1} = \{0.1 \cdot M_{n1}, 0.5 \cdot M_{n1}, M_{n1}\}$ для двигателя

4АС132S4У3 (номинальная мощность $P_n = 8,5$ кВт) с номинальным электромагнитным моментом $M_{n1} = 58$ Н·м и $M_{c2} = \{0.1 \cdot M_{n2}, 0.5 \cdot M_{n2}, M_{n2}\}$ для

двигателя 4АС250М4У3 ($P_n=63$ кВт) с номинальным электромагнитным моментом $M_{н2}=430$ Н·м соответственно.

На рис. 3 показан минимум потерь энергии, вызванный снижением колебательности переменных состояния в течение переходного процесса. При $t_{ramp}=t_{ramp,опт}=0.02\dots0.03$ сек потери энергии $\Delta W_{уп}$ снижаются на 14-20% по сравнению с потерями при неуправляемом пуске $\Delta W_{нп}$. Дальнейшее увеличение $T_{п}$ приводит к возрастанию потерь за счет увеличения времени нахождения АД в области пониженной скорости. Возрастание потерь происходит быстрее с уменьшением номинальной мощности АД и увеличением механической нагрузки на валу двигателя. Анализ графиков, приведенных на рис.3, позволяет подчеркнуть, что необоснованное увеличение длительности плавного пуска приводит в итоге к превышению потерь энергии по сравнению с прямым пуском.

Большинство фирм производителей, как правило, снабжают УПП алгоритмом пуска с ограничением по току. Коэффициент кратности тока при управляемом пуске задают следующим соотношением:

$$k_{I,уп} = I_y/I_n, \quad (3)$$

где I_y – уставка тока, ограничивающая величину ударного тока АД $I_{уп}$, А; I_n – номинальный ток статорных обмоток АД, А. Значение коэффициента $k_{I,уп}$ определяет итоговую продолжительность пуска двигателя $T_{п}$. В общепринятом алгоритме управления плавным пуском одно и то же значение $k_{I,уп}$ используется для всех АД насосных агрегатов. При этом не учитываются изменения в системе «сеть - УПП - АД - насос - трубопровод», вносимые пуском очередного двигателя. В частности, выбор заниженного значения $k_{I,уп}$ приводит к необоснованному затягиванию пуска, что не может считаться оптимальным с точки зрения энергосбережения; выбор завышенного значения $k_{I,уп}$ не может гарантировать безопасный режим функционирования для обмоток АД и трубопровода.

Таким образом, с целью сокращения потерь электрической энергии в обмотках асинхронных двигателей насосной станции системы водоснабжения необходимо с использованием математической модели системы «электрическая сеть - УПП - АД - насос - трубопровод» разработать алгоритм вычисления $k_{I,уп}$, который обеспечит устремление $T_{п}$ к $T_{п,опт} \Big|_{t_{ramp}=t_{ramp,опт}}$ при условии удовлетворения перечисленных выше ограничений ($I_{п}$, $\Theta_{\max,доп}$, $\Delta U_{\max,доп}$, $\Delta P_{\max,доп}$), накладываемых на показатели переходных процессов.

Сформулированное выше определение АСУПП АД насосной станции и приведенные на рис. 1, 2 структурные схемы позволяют заключить, что математическая модель системы «электрическая сеть - УПП - АД -

насос - трубопровод» должна адекватно отражать протекание процесса электромеханического преобразования энергии в переходных режимах [1, 4]. Поскольку в этом случае не требуется описания взаимовлияния конструктивных параметров АД и электромеханического преобразования энергии, математическая модель АД может быть получена с использованием сосредоточенной постановки задачи [5 - 9]. При этом необходимо учесть импульсный характер функционирования СИФУ-ТПН [10, 11] и существование двух способов синхронизации СИФУ: по току нагрузки и напряжению сети [10, 12, 13]. Напротив, необходимость рассмотрения условий и механизма протекания гидравлического удара требует использования распределенной постановки задачи при описании неустановившегося движения жидкости в трубопроводе.

Во второй главе разрабатываются математические модели подсистем АСУПП АД насосной станции.

Сосредоточенная постановка задачи описания электромеханического преобразования энергии в СИФУ-ТПН-АД, обоснованная выше, определяет совокупность допущений, используемых в этом случае [5]. В частности предполагается, что насыщение магнитопровода статора и ротора АД не происходит; воздушный зазор между статором и ротором является гладким, пазы – отсутствуют; обмотки двигателя являются сосредоточенными и сдвинутыми относительно друг друга на фазный угол; параметры схемы замещения двигателя не изменяются в переходных процессах и соответствуют параметрам установившегося режима. Каждый тиристор преобразователя напряжения представляется идеальным ключом, наличие параллельной демпфирующей RC-цепи не учитывается.

При составлении математической модели СИФУ-ТПН-АД для каждого интервала постоянства структуры на основании законов Ома и Кирхгофа записывается система обыкновенных дифференциальных уравнений, которая характеризуется высоким порядком (больше третьего) и нелинейностью (за исключением модели режима “0”). При этом численное интегрирование полной математической модели СИФУ-ТПН-АД требует существенных затрат машинного времени.

Для сокращения затрат машинного времени в диссертационной работе разработан узкоспециализированный алгоритм, названный «гибридным», сущность которого заключается в следующем: 1 – на основании анализа жесткости систем дифференциальных уравнений, требования устойчивости разностной схемы и заданной точности интегрирования обосновывается выбор методов интегрирования и их параметров (порядок аппроксимации и шаг интегрирования) для каждого интервала постоянства структуры; 2 – суб-алгоритмы, реализующие каждый из выбранных мето-

дов, обеспечивают наименьшее время интегрирования для интервалов постоянства структуры определенной длительности; 3 – для снижения затрат машинного времени предлагается объединение суб-алгоритмов в один гибридный алгоритм, который организует выбор одного из них для интегрирования модели текущего интервала постоянства структуры. Реализация и использование гибридного алгоритма в среде “MATLAB 7.4”[®] (The MathWorks, Inc.) позволила до 30% сократить затраты машинного времени на моделирование динамики СИФУ-ТПН-АД по сравнению со временем решения аналогичной задачи при использовании встроенной функции *ode45* [2].

С использованием модели ТПН-АД и гибридного алгоритма интегрирования исследованы показатели качества стационарных и переходных режимов ТПН-АД для двух вариантов синхронизации СИФУ: по напряжению сети и току нагрузки. Лучшие показатели качества СИФУ с синхронизацией по току нагрузки позволяют рекомендовать такой тип синхронизации для реализации УПП АД насосных станций [10, 12, 13].

Требования ГОСТ 27895 устанавливают предельно допустимое среднее значение температуры статорных обмоток АД ($\Theta_{\text{max, доп}}$, °C) превышение которого должно вызывать срабатывание тепловой защиты в случае, если двигатель оснащен встроенными температурными датчиками. Для вычисления максимальной температуры обмоток статора АД (Θ_{max} , °C) при управляемом пуске в продолжение времени $T_{\text{п}}$, с в диссертационной работе используется подход, основанный на составлении эквивалентной тепловой схемы замещения АД [Беспалов В.Я. и соавт., 2003; Pillay Р., Manuяage M., 2006].

Модель энергетической подсистемы АСУПП АД включает в свой состав: источник тока бесконечной мощности с номинальным напряжением линии электропередач и модель идеального понижающего трансформатора ко вторичной обмотке которого последовательно один за другим подключаются АД в продолжение пуска. При этом, т.к. по окончании пуска очередного двигателя, включается внешний обводной контактор, шунтирующий УПП, то модель запущенного АД представляется моделью идеального электромеханического преобразователя энергии, работающего в номинальном режиме.

При составлении модели неустановившегося движения жидкости традиционно используют следующие допущения: в трубопроводе отсутствуют локальные потери напора, связанные с его геометрией и, соответственно, учитываются только потери на трение (f), постоянные по длине трубопровода, и, вычисляемые по формуле Дарси-Вейсбаха [Larock В.Е. и соавт., 2000]; жидкость считается гомогенной, ее параметры (вязкость,

плотность и др.) одинаковы по трем пространственным координатам – это позволяет ограничиться исследованием динамики жидкости только по одной координате – в направлении ее движения. С учетом введенных допущений неустановившееся движение жидкости в каждой i -ой секции трубопровода описывается известной системой уравнений Эйлера [1], интегрирование которой проводится с использованием численного метода характеристик (разновидность сеточных методов).

Для записи функционального выражения насосной нагрузки в аналитической форме используется аппроксимация паспортных графиков характеристических кривых насоса, полученных экспериментально фирмой производителем. При этом предполагается, что прототип насоса является гомологичным, т.е. имеет геометрическое и кинематическое подобие с моделью.

Глава 3 посвящена проверке адекватности полученных в работе составляющих математической модели АСУПП АД. С этой целью осуществляется постановка и проведение физического и численного экспериментальных исследований пуска АД с УПП; проведение численного моделирования нестационарного нагрева обмоток АД, функционирования энергетической и гидравлической подсистем АСУПП АД насосной станции системы водоснабжения. Для реализации математической модели и алгоритма управления плавным пуском АД проведено обоснование выбора системы компьютерной математики “*MATLAB 7.4*”[®], накладывающей соответствующие требования на конфигурацию ПЭВМ.

Для проведения экспериментального исследования пуска АД 4А112М4У3 ($P_n=5,5$ кВт) использовалось серийно выпускаемое ЗАО «Электротекс» г. Орел. УПП-ТПП-50-380-50-УХЛ4, разработанное на основе симметричного ТПН с СИФУ, синхронизированной по напряжению сети.

Проверка адекватности описанной в работе тепловой модели нестационарного нагрева лобовых частей обмоток статора АД проводится посредством сопоставления результатов численного интегрирования указанной модели и результатов, полученных экспериментально, и, опубликованных в [Mezani S. и соавт., 2005].

С целью проверки адекватности модели гидравлической подсистемы проведено численное моделирование неустановившегося движения жидкости в трубопроводе для типовой задачи с двумя резервуарами при различном значении продолжительности закрывания вентиля [Смирнов Д.Н., Зубов Л.Б., 1975; Lagock В.Е. и соавт., 2000; Васильева С.В., 2007].

Сопоставление полученных в работе результатов численных расчетов с результатами экспериментальных и теоретических исследований

подтверждает адекватность полученных математических моделей и эффективность алгоритмов их интегрирования. Программная реализация итоговой комплексной математической модели АСУПП АД в среде “MATLAB 7.4”[®] позволила создать инструментальную программно-алгоритмическую базу, необходимую для разработки алгоритма управления УПП АД насосной станции.

Глава 4 посвящена разработке адаптивного алгоритма формирования пуско-тормозных траекторий АД насосных агрегатов, обеспечивающего сокращение потерь электрической энергии в процессе управляемого пуска АД насосной станции системы водоснабжения. Разрабатывается программный модуль подсистемы АСУПП АД для АРМ диспетчера НС. Посредством численного эксперимента проверяется эффективность предложенного в работе алгоритма управления АСУПП АД.

На этапе ввода в эксплуатацию машинной программы, реализующей алгоритм управления АСУПП АД, в базу данных (БД) программы заносится исходная информация по следующим категориям: электрическая подсистема (параметры трансформаторной подстанции и АД, включая теплофизические параметры материалов АД); механическая подсистема (параметры центробежных насосов); гидравлическая подсистема (параметры магистрального трубопровода, обводной линии, резервуаров). Особое значение среди исходных данных имеют ограничения, накладываемые на протекание пуско-тормозных процессов в АД насосной станции, которые можно разделить на две группы: фиксированные, обусловленные типом используемых АД (I_{Π} , $\Theta_{\max, \text{доп}}$), и варьируемые в зависимости от условий эксплуатации НС ($\Delta U_{\max, \text{доп}}$, $\Delta P_{\max, \text{доп}}$). После внесения и проверки всех исходных данных осуществляется процедура инициализации переменных и параметров программы. Затем адаптивный алгоритм передает управление предиктору, который выполняет две функции:

1. Получение j отсчетов максимального прироста давления $\Delta P_{\max, ij}$ в трубопроводе в функции продолжительности пуска i -ого АД $T_{\Pi, ij}$. Отсчеты вычисляются автоматически посредством численного интегрирования модели гидравлической подсистемы. Форма зависимости $\Delta P_{\max} = f(T_{\Pi})$ позволяет с достаточной для практики точностью использовать экспоненциальную аппроксимацию вида:

$$\Delta P_{\max} = a_1 \cdot \exp(a_2 \cdot T_{\Pi}) + a_3 \cdot \exp(a_4 \cdot T_{\Pi}), \quad (4)$$

где a_j , $j=1, 2, \dots, 4$ – постоянные коэффициенты. Монотонный характер функции (4) позволяет утверждать, что для вычисления постоянных коэффициентов в (4) минимально необходимое количество точек

$\{\Delta P_{max,ij}; T_{\Pi,ij}\}$ соответствует числу неизвестных, т.е. равно четырем. Если получение отсчетов функции $\Delta P_{max,i}=f(T_{\Pi,i})$ для гидравлической подсистемы заданной конфигурации уже проводилось, то значения постоянных коэффициентов функции (4) считываются из БД программы. В результате проведенной аппроксимации определяется значение $T_{\Pi,i}^*$, соответствующее установленному ограничению $\Delta P_{max,доп}$.

2. Составляется электрическая схема, включающая в свой состав: источник бесконечной мощности синусоидального тока с номинальным напряжением ЛЭП; понижающий силовой трансформатор и уже запущенные АД (если таковые имеются), для которых используется упрощенная схема замещения, соответствующая номинальному режиму работы. Для такой цепи производится расчет значения амплитуды максимально допустимого ударного тока $I_{УП,доп}$, соответствующего установленному ограничению $\Delta U_{max,доп}$. Определяется значение $I_{УП,i}^*=\min(I_{УП,доп}, I_{\Pi,i})$, где $I_{\Pi,i}$ – пусковой ток i -ого АД, соответствующий каталожным данным производителя.

Таким образом, результатом работы предиктора являются значения продолжительности пуска $T_{\Pi,i}^*$ и ударного пускового тока $I_{УП,i}^*$ с которыми может быть запущен i -ый АД насосной установки при удовлетворении ограничений на $\Delta U_{max,доп}$ и $\Delta P_{max,доп}$. Затем управление передается корректору, который, так же как и предиктор, выполняет две функции:

1. Проводится получение j отсчетов ударного пускового тока $I_{УП,ij}$ в функции продолжительности пуска $T_{\Pi,ij}$ для i -ого АД. Отсчеты вычисляются автоматически посредством численного интегрирования модели СИФУ-ТПН-АД. Форма зависимости $I_{УП}=f(T_{\Pi})$, так же как и $\Delta P_{max}=f(T_{\Pi})$, позволяет воспользоваться экспоненциальной аппроксимацией, что ограничивает количество численных экспериментов, необходимых для вычисления постоянных коэффициентов в уравнении (4). Если получение отсчетов функции $I_{УП,i}=f(T_{\Pi,i})$ для i -ого АД с текущим моментом сопротивления на валу $M_{c,i}$ уже проводилось, то значения постоянных коэффициентов аппроксимирующей функции (4) считываются из БД программы. Для значения $T_{\Pi,i}^*$ меньшего или равного $T_{\Pi,опт}|_{t_{ramp}=t_{ramp,опт}}$, определяется оптимальная уставка тока $I_{y,i}=f(T_{\Pi,опт}|_{t_{ramp}=0.025})$. В противном случае, т.е. при $T_{\Pi,i}^* > T_{\Pi,опт}$ с использованием аппроксимирующей функции $I_{УП,i}=f(T_{\Pi,i})$ определяется такое значение уставки тока $I_{y,i}$ для которого выполняются два условия: $I_{y,i} \leq I_{УП,i}^*$ и $T_{\Pi,i}=f(I_{y,i}) \geq T_{\Pi,i}^*$.

2. Для полученных значений $I_{y,i}$, $T_{\Pi,i}$ проводится вычисление максимальной температуры $\Theta_{max,i}$ лобовых частей статорных обмоток i -ого АД.

Если выполняется условие $\Theta_{max,i} > \Theta_{max,доп}$, то выводится сообщение о недопустимых условиях пуска текущего АД по причине температурного перегрева обмоток. В этом случае требуется рассмотреть возможность ослабления варьируемых ограничений $\Delta P_{max,доп}$ и $\Delta U_{max,доп}$.

Если запущены не все двигатели, то осуществляется возврат с передачей управления предиктору. По окончании вычислений, рассчитанные оптимальные значения $k_{opt,i} = I_{y,i} / I_{n,i}$ для каждого из АД последовательно посылаются на УПП для отработки пуска по алгоритму с ограничением по току (3).

При плавном останове АД нет необходимости контролировать напряжение сети и температуру обмоток двигателей, следовательно, для вычисления $k_{opt,i}$ может использоваться упрощенный вариант приведенного выше алгоритма.

В соответствие с содержанием п. 1.5 «Требования к программному обеспечению АСУ» ГОСТ 24.104-85⁴, структурными схемами рис. 1,2 и описанным выше алгоритмом управления УПП АД насосной станции водоснабжения разработана структура программного модуля АСУПП АД и осуществлена ее реализация в виде законченного приложения в среде «*MATLAB 7.4*»[®].

Проверка адекватности предложенного в работе алгоритма адаптивного управления плавным пуском АД показала его эффективность в сравнении с традиционным способом управления УПП, который заключается в произвольном выборе значения коэффициента кратности статорного тока $k_{I,УП}$ и использовании этого значения для запуска всех двигателей насосной станции. В частности, при общепринятом алгоритме управления выбор значения $k_{I,УП} = 2 \div 4$ приводил к необоснованному затягиванию пуска и потерям энергии, превышающим потери при использовании алгоритма, предложенного в работе; при выборе значения $k_{I,УП} = 5 \div 7$, в ряде случаев наблюдалось превышение давления в трубопроводе выше установленного максимально допустимого значения и, кроме того, при пуске последнего двигателя переходной ток вызывал падение напряжения в сети ниже значения, допускаемого по ГОСТ 13109-97. Предложенный в работе адаптивный алгоритм управления плавным пуском АД устраняет возникновение подобных режимов, поскольку как было указано выше, величина $k_{I,УП}$ для каждого запускаемого двигателя рассчитывается индивидуально с учетом соответствующих ограничений.

⁴ ГОСТ 24.104-85 «Автоматизированные системы управления. Общие требования»

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ:

1. Разработан новый алгоритм адаптивного формирования пуско-тормозных траекторий асинхронных двигателей насосных агрегатов, обеспечивающий сокращение потерь электрической энергии в устройстве плавного пуска асинхронных двигателей насосной станции системы водоснабжения. Сущность предложенного алгоритма заключается в определении оптимальных (по критерию минимизации энергетических потерь) параметров программы плавного пуска для каждого АД с учетом ограничений на максимальный ток статорных обмоток АД, максимальную температуру статорных обмоток и максимальный прирост давления в трубопроводе в течение переходного процесса. Адаптация предложенного алгоритма обеспечивается за счет формирования индивидуальной программы пуска последовательно для каждого асинхронного двигателя насосных агрегатов с учетом текущего значения переменных состояния электрической и гидравлической подсистем насосной станции. Расчетное повышение уставки максимально-допустимого переходного тока индивидуально для каждого АД приводит к снижению потерь электроэнергии в обмотках до 12-18% в зависимости от мощности АД по сравнению с аналогичными потерями при использовании традиционного алгоритма управления плавным пуском с фиксированной уставкой.
2. Предложенный в работе подход к сокращению потерь электрической энергии в обмотках АД насосной станции системы водоснабжения сформирован на основе разработки комплексной математической модели, включающей в свой состав: ЛЭП с трансформаторной подстанцией, СИФУ-ТПН-АД с насосной нагрузкой, тепловую модель АД, модель движения жидкости в трубопроводе, что позволяет воспроизводить и исследовать процессы преобразования энергии в системе «электрическая сеть - УПП - АД - насос - трубопровод» в переходных и стационарных режимах.
3. Математические модели, методика моделирования и адаптивный алгоритм управления плавным пуском АД, предложенные в диссертационной работе, составляют основу пакета прикладных программ, рекомендуемых для интерактивного управления, мониторинга и диагностики автоматизированной системы управления плавным пуском асинхронных двигателей типовой насосной станции системы водоснабжения.
4. Для сокращения затрат машинного времени при интегрировании систем уравнений, соответствующих переходным и установившимся режимам работы импульсных преобразователей энергии, отличающихся нелинейностью моделей интервалов постоянства структуры и высоким

порядком, предложен новый «гибридный» алгоритм численного интегрирования, адаптирующий метод интегрирования к текущему состоянию модели. Выбор методов интегрирования обосновывается исходя из критерия минимизации машинного времени с учетом выполнения требования устойчивости разностной схемы и заданной точности моделирования. Реализация гибридного алгоритма в среде «*MATLAB 7.4*»[®] и анализ его эффективности показали снижение затрат машинного времени (до 30%) по сравнению с традиционным подходом к решению аналогичной задачи.

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях:

1. Колоколов, Ю. В. Моделирование переходных режимов насосной станции первого подъема / Ю. В. Колоколов, А. Ю. Мелихов // Известия ОрелГТУ. Сер. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии: информационные системы и технологии. – 2007. – №4/268(535). – С. 18–23. (издание, рекомендованное ВАК к публикации результатов научных исследований; участие 70%)
2. Hamzaoui, A. The Experience of Use "MATLAB 6.0"[®] During the Simulation of the Pulse-Phase Control System of the Thyristor Voltage Regulator with the Active-Inductive Load / A. Hamzaoui, A. Melikhov, V. Tsukanov, Yu. Kolokolov // International Scientific Journal of Computing. Vol. 3, Issue 3. – 2004. – P. 76–81. (участие 50%)
3. Melikhov, A. YU. The Realization of the Algorithms of Programmed Control in the Systems of Soft Start with Induction Motor / A. YU. Melikhov, V. G. Tsukanov // Preprints of 10th International Student Olympiad on Automatic Control (Baltic Olympiad – BOAC'2004) / ITMO State University. – Saint-Petersburg, 2004. – Pp. 57–60. (участие 50%)
4. Мелихов, А. Ю. Проблемы анализа переходных процессов в асинхронных двигателях в режимах пуска с источником синусоидального напряжения бесконечной мощности / А. Ю. Мелихов, А. Hamzaoui // Труды международной школы-конференции «Высокие технологии энергосбережения» / Издательский дом «Кварт». – Воронеж, 2005. – С. 60–62. (участие 80%)
5. Мелихов, А. Ю. Реализация трехфазной модели асинхронного двигателя в системе компьютерной математики «MATLAB 6.0»[®] / А. Ю. Мелихов, В. Г. Цуканов // Материалы 3-его международного семинара «Компьютерное моделирование электромагнитных процессов в физических, химических и технических системах» / ВГТУ. – Воронеж, 2004. – С. 224–227. (участие 80%)
6. Мелихов, А. Ю. Устойчивость трехфазной модели асинхронного двигателя с периодическими коэффициентами / А. Ю. Мелихов, В. Г. Цуканов, Ю. В. Колоколов // Материалы Всероссийской научной конференции «Методы прикладной математики и компьютерной обработки данных в технике, экономике и экологии» / ОрелГТУ. – Орел, 2004. – С. 127–130. (участие 60%)
7. Мелихов, А. Ю. Исследование устойчивости математической модели асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором / А. Ю. Мелихов, В. Г. Цуканов, Ю.

- В. Колоколов // Труды Всероссийской научной конференции «Управление и информационные технологии» (УИТ-2005) / ЭТУ. – Санкт-Петербург, 2005. – С. 250–256. (участие 60%)
8. Мелихов, А. Ю. Анализ методов идентификации параметров асинхронных двигателей / А. Ю. Мелихов, И. В. Лоскутов // Труды международной школы-конференции «Высокие технологии энергосбережения» / Издательский дом «Кварта». – Воронеж, 2005. – С. 55–57. (участие 70%)
 9. Мелихов, А. Ю. Математическое описание электромеханического преобразования энергии в пакете “Maxwell 10.0” / А. Ю. Мелихов // Материалы международной научно-технической конференции «Информационные технологии в науке, образовании и производстве» / ОрелГТУ. – Орел, 2006. – С. 126–130.
 10. Мелихов, А. Ю. Алгоритм управления трехфазным тиристорным регулятором напряжения с активно-индуктивной нагрузкой и синхронизацией по току / А. Ю. Мелихов, В. Г. Цуканов // Труды всероссийской конференции «Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве» / ВГТУ. – Воронеж, 2004. – С. 124–127. (участие 70%)
 11. Колоколов, Ю. В. Приложение информационных технологий к решению задач математического моделирования технических систем на примере использования пакета «MATLAB 6.0»[®] / Ю. В. Колоколов, А. Ю. Мелихов, В. Г. Цуканов // Материалы международной научно-технической конференции «Информационные технологии в науке, образовании и производстве» / ОрелГТУ. – Орел, 2004. – С. 70–74. (участие 60%)
 12. Tsukanov, V. G. Evolution of a Non-Deterministic Self-Oscillation Mode in a Pulse-Phase Control System with Induction Motor / V. G. Tsukanov, A. YU. Melikhov // Preprints of 11th International Student Olympiad on Automatic Control (Baltic Olympiad – BOAC’2006) / ITMO State University. – Saint-Petersburg, 2006. – Pp. 100–104. (участие 50%)
 13. Kolokolov, Y. Stability Analysis of a “Thyristor Voltage Controller – Induction Machine” Model / Y. Kolokolov, A. Melikhov, A. Hamzaoui, N. Essounbouli, J. Zaytoon // Abstr. Collect. of the 3rd International IEEE Scientific Conference on Physics and Control (PhysCon 2007) / Universität Potsdam. – Potsdam, 2007. – P. 344 (участие 40%)
 14. Колоколов, Ю. В. Математическая модель асинхронного двигателя при несимметричном подключении к сети / Ю. В. Колоколов, А. Ю. Мелихов, В. Г. Цуканов // Материалы международной научно-технической конференции «Информационные технологии в науке, образовании и производстве» / ОрелГТУ. – Орел, 2006. – С. 106–110. (участие 60%)

Лицензия ИД №00670 от 05.01.2000

Подписано в печать 2/10-07 Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1 Тираж 100 экз. Заказ №6535

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе ОрелГТУ;
302030, г.Орел, ул. Московская, 65.