

1001 0010 0100 0101  
1011 1100 0001 0101  
0100 1010 1100 1010  
ССМ 1739-5068 0010  
1110 1101  
1110 0100


# СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО-  
ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ЖУРНАЛ

№ 3.2(37)  
2009

ПЕР. ТЕХНИЧЕСКОЕ  
ИССЛЕДОВАНИЕ

<http://www.sbook.ru/csit>



---

# **СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ**

---

**Основан в 1995 г.**

**2009**

**№ 1.3(35)**

**Москва-Воронеж**

**Научная книга**



**2009**

## Содержание

## Перспективные исследования

Багаева Т.А. Имитационная модель организации контура реконфигурации сложной технической системы при выходе из строя отдельных объектов .....	316
Балашова Е.А., Битюкова В.В., Худякова О.В. Непараметрические методы в классификации тактики лечения и оценке ее эффективности .....	319
Богданова М.В. Исследование транспортных задач в условиях стохастического характера мощностей вершин .....	322
Брянцева Л.В. Алгоритмизация индикаторов промышленно-производственной безопасности в условиях кластеризации .....	326
Голубинский А.Н. Метод аналитического расчета параметров математических моделей речевого сигнала, построенных на основе теории модуляции .....	332
Дидрих В.Е., Петренко С.В., Сушков Ю.А., Яковлев А.В. Математическая модель и алгоритм решения задачи парирования отклонения воздушного судна при заходе на посадку двойным разворотом .....	337
Ефимов Б.И. Применение алгоритмов теории графов для решения задач, связанных с обеспечением информационной безопасности в системах принятия решений .....	342
Ефимов С.Н., Семенкин Е.С., Тынченко В.В. Многокритериальный многопопуляционный генетический алгоритм для структурно-параметрического синтеза нейросетевых моделей .....	346
Калашников А.О. Предупредительная роль страхования в управлении информационными рисками .....	351
Калашников А.О. Предупредительная роль страхования в управлении информационными рисками многоэлементных систем .....	356
Ковалев И.В., Карасева М.В., Лесков В.О. Компоненты информационной поддержки мультилингвистической адаптивно-обучающей технологии .....	360
Колоколов Ю.В., Мелихов А.Ю. Разработка энергосберегающего алгоритма управления плавным пуском асинхронных двигателей насосных станций. Часть 1. Постановка задачи .....	364
Колоколов Ю.В., Мелихов А.Ю. Разработка энергосберегающего алгоритма управления плавным пуском асинхронных двигателей насосных станций. Часть 2. Математическая модель энергетической подсистемы насосной станции .....	369
Лапко А.В., Лапко В.А., Лебедев П.А. Коллектив непараметрических регрессий, основанный на технологии «размножения» статистических данных .....	374
Лаптева Н.С., Перцев Н.В. Многопараметрическая модель регулирования численности сотрудников предприятия .....	377
Машанова С.В., Данилова С.Д. Построение семантической сети текста в задаче автоматического реферирования .....	383
Полозова А.Н., Гребнева И.В., Горковенко Е.В. Факторно-инструментарная система управления организационным развитием .....	386
Проскурин Д.К., Земцов А.В., Печенкин Н.С. Использование численных моделей дифракции Кирхгофа в задачах получения структуры рассеянных полей на сложных поверхностях .....	393
Пчелинцев А.Н., Погонин В.А. О способе построения дуги траектории динамической системы типа Маркова в распределенной компьютерной среде .....	398
Седых И.А. Смешанное управление динамическими недетерминированными окрестностными моделями сетей Петри .....	401
Солдушкин С.И. Стабилизация систем с запаздыванием по времени в координатах и управлении .....	404
Шульга Т.Э. Метод построения восстанавливающих последовательностей для систем без потери информации .....	407
Котов С.С., Столбов В.Ю. Управление структурой образовательных программ компетентностного содержания с учетом нечетких социальных предпочтений .....	411

УДК 681.521.7:621.316.717

## РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ПЛАВНЫМ ПУСКОМ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ. ЧАСТЬ 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Ю.В. Колоколов, А.Ю. Мелихов

*Цикл из четырех статей посвящен формированию подхода к снижению потерь электрической энергии в обмотках асинхронных двигателей насосной станции. В первой статье проводится анализ требований энергоэффективности и энергобезопасности, предъявляемых к процессу электрохимического преобразования энергии в асинхронном электроприводе насосной станции в пуско-тормозных режимах.*

### Введение

Проблема повышения энергоэффективности особое значение имеет 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 [1], следовательно, даже незначительное сокращение потерь электроэнергии в этой сфере может привести к существенному 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. Для приведения в действие центробежных насосов наибольшее распространение получили асинхронные электродвигатели (АД). Однако, прямой (непосредственный) пуск АД обладает рядом негативных особенностей [1-4]:

1. Амплитуда переходных составляющих токов обмоток двигателя при прямом пуске в 6-8, а иногда и более раз превосходит амплитуду токов установившегося режима. При этом на проводники, расположенные в лобовых частях обмотки электродвигателя, действуют значительные усилия, приводящие к ослаблению бандажирования обмотки, постепенному нарушению изоляции и в конечном итоге — короткому замыканию витков и преждевременному выходу АД из строя. Кроме того, протекание больших пусковых токов может привести к просадке напряжения в сети (до 40%) [4] вследствие падения напряжения на внутреннем со-

противлении источника питания при использовании автономных генераторов или других источников малой мощности.

2. Амплитуда переходных составляющих электромагнитного момента АД при прямом пуске в 4-5 раз превосходит амплитуду номинального момента. При этом воздействие повышенных нагрузок приводит к постепенному увеличению зазоров в механических соединениях между двигателем и насосом, сокращая межремонтный интервал.

3. Быстрый пуск или останов электродвигателей насосных агрегатов в системе водоснабжения, канализации и магистральных трубопроводов может послужить причиной возникновения гидравлического удара, создающего дополнительные нагрузки на трубы, соединительные муфты, фланцы, уплотнители и другие монтажные конструкции, приводя к их преждевременному износу и выходу из строя.

Отмеченные негативные особенности прямого пуска и останова АД привели к необходимости разработки и использования технических и организационных мер, позволяющих устранить, а, если это невозможно — ограничить влияние перечисленных факторов. С этой целью разработан и используется специальный класс асинхронного электропривода — устройства плавного пуска (УПП), основное назначение которых заключается в том, что бы 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 двигателя и знакопеременных колебаний электромагнитного момента на его валу, с другой стороны, ограничит прирост давления в трубопроводе до допустимого значения.

Вместе с тем, необходимо подчеркнуть, что современный уровень разработки УПП характеризуется унификацией их силовой части, представляющей в большинстве случаев тиристорный регулятор напряжения (ТРН) с системой импульсно-фазового управления (СИФУ), следовательно, повышение эффективности процессов преобразования электрохимической энергии в значительной степени связыва-

ется с усовершенствованием алгоритмов формирования пуско-тормозных траекторий асинхронных двигателей (АД).

Комплексный характер указанной задачи, необходимость создания и использования информационного, математического и программного обеспечения для ее эффективного решения, привели к появлению нового подкласса автоматизированных систем управления АЭП, получившего название автоматизированных систем управления плавным пуском (АСУПП) АД [4].

В первой статье цикла обсуждается постановка задачи разработки энергоэффективного алгоритма управления автоматизированной системой плавного пуска асинхронных двигателей насосной станции (НС), позволяющего, с одной стороны, сократить потери электрической энергии в обмотках АД, с другой стороны, учесть ограничения, накладываемые требованиями безопасности технологического процесса преобразования электромеханической энергии в системе «электрическая сеть - устройство плавного пуска - асинхронный двигатель - центробежный насос - трубопровод».

#### Структура насосной станции

Анализ структурных схем подачи, распределения и дальнего транспорта воды [5, 6] позволяют предложить структурную схему типовой НС, которая будет одинаково подходить для систем водоснабжения и водоотведения.

Структурная схема НС приведена на рис. 1.

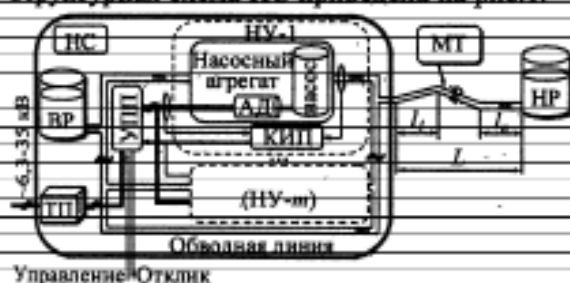


Рис. 1. Структурная схема типовой насосной станции

На рис. 1 приняты следующие сокращения: водозаборный резервуар (ВР), в который в случае НС системы водоснабжения вода поступает после соответствующей обработки в водоочистной подсистеме;  $m$  насосных установок (НУ), в состав которых входит насосный агрегат, примыкающие к нему всасывающий и напорный трубопровод с арматурой и контрольно-измерительными приборами (КИП); УПН; обводная линия; магистральный трубопровод (МТ) длиной  $L$ , состоящий из  $n$  сегментов, и, предназначенный для передачи воды в напорный резервуар (НР) системы дальнего транс-

порта воды, откуда вода перекачивается НС следующего подъема или поступает непосредственно в сеть; трансформаторная подстанция (ТП), обеспечивающая питание основного и вспомогательного электрооборудования НС.

#### Алгоритмы формирования пуско-тормозных траекторий АД

Анализ литературных источников [3, 7] позволил выделить два основных подхода к формированию траекторий угла управления в СИФУ-ТРН: алгоритм управления с нарастанием напряжения и алгоритм управления с ограничением тока.

Первый подход требует задания функциональной зависимости угла управления от времени. Производители УПП для наиболее распространенных нагрузок записывают в энергонезависимую память микроконтроллера несколько типовых пуско-тормозных программ, предлагая пользователю самостоятельно выбирать их параметры. Форма одной из типовых программ изменения угла управления ТРН приведена на рис. 2.



Рис. 2. Типовая форма кривой угла управления

На рис. 2  $\alpha_{min}$  соответствует углу открытия тиристоры, обеспечивающего нижний уровень действующего напряжения на выходе ТРН;  $\alpha_{max}$  соответствует углу открытия тиристоры, обеспечивающего верхний уровень действующего напряжения на выходе ТРН;  $t_{рост}$  — продолжительность нарастания угла, которая определяет продолжительность нарастания действующего напряжения на выходе ТРН;  $\alpha_{сик}$  и  $t_{сик}$  — величина угла и длительность пускового (кик-) импульса, предназначенного для создания требуемого пускового момента.

Использование приведенного выше алгоритма управления УПП не позволяет априорно установить зависимость величины максимального пускового тока от времени пуска данного двигателя. Вместе с тем, как было указано во введении, информация о токах статорных обмоток АД в переходных режимах необходима для ограничения механических перегрузок и температурного перегрева обмоток двигателя.

Использование алгоритма управления СИФУ-ТРН с ограничением по току устраняет

указанный недостаток. Коэффициент кратности тока при управляемом пуске задают следующим отношением:

$$k_{I,уп} = I_{уп}/I_n \quad (1)$$

где  $I_n$  – номинальный ток статорных обмоток АД, А.

На рис. 3 приведены графики кривой мгновенного тока статорной обмотки «А» АД 4АС250М4УЗ (рис. 3а, 3в), угловой скорости ( $\omega$ ) и электромагнитного момента  $M$  (рис. 3б, 3г) в функции времени при использовании алгоритма (1) при  $I_{уп} = 2.5 \cdot I_n$  (рис. 3а, 3б) и  $I_{уп} = 2.1 \cdot I_n$  (рис. 3в, 3г).

Анализ графиков рис. 3 позволяет заключить, что уставка тока  $I_{уп}$  алгоритмом обрабатывается корректно: огибающая статорных токов гладкая, электромагнитный момент не имеет отрицательных значений. Продолжительность пуска при  $I_{уп} = 2.5 \cdot I_n$  составила  $T_{п} = 1.85$  с; при  $I_{уп} = 2.1 \cdot I_n$  продолжительность пуска составила  $T_{п} = 5.23$  с.

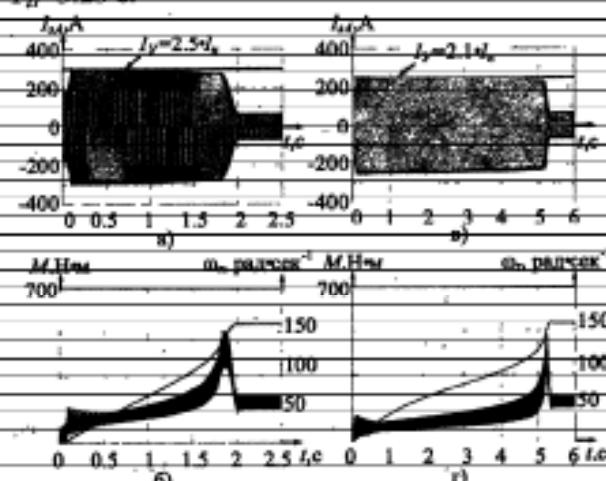


Рис. 3. Кривые статорных токов (а,в), угловой скорости и электромагнитного момента (б,г) при плавном пуске АД 4АС250М4УЗ с СИФУ-ТРН, синхронизированной по току, и алгоритмом управления (1) при  $I_{уп} = 2.5 \cdot I_n$  (а,б) и  $I_{уп} = 2.1 \cdot I_n$  (в,г).

#### Энергетические потери в обмотках АД в режиме плавного пуска

В структуре энергетических потерь в АД наиболее значительная часть принадлежит потерям в обмотках статора и ротора двигателя [2]. Для пояснения дальнейшего изложения приведем выражение мощности потерь в обмотках статора и ротора трехфазного АД:

$$\begin{aligned} \Delta P(t) &= \Delta P_s(t) + \Delta P_r(t); \\ \Delta P_s(t) &= R_s [i_{sa}^2(t) + i_{sb}^2(t) + i_{sc}^2(t)]; \\ \Delta P_r(t) &= R_r [i_{ra}^2(t) + i_{rb}^2(t) + i_{rc}^2(t)]; \end{aligned} \quad (2)$$

где  $R_s$  ( $R_r$ ) – активное сопротивление статорной (роторной) обмотки АД;  $i_{sa}(t)$ ,  $i_{sb}(t)$ ,  $i_{sc}(t)$

$i_{ra}(t)$ ,  $i_{rb}(t)$ ,  $i_{rc}(t)$  – мгновенные статорные (роторные) токи обмоток АД в  $\alpha$ - $\beta$ - $\gamma$  системе координат. При этом потери энергии  $\Delta W$ , Вт, за время переходного процесса  $T_{п}$  составляют:

$$\Delta W = \int_0^{T_{п}} \Delta P(t) dt \quad (3)$$

На рис. 4 приведены графики изменения потерь энергии в обмотках АД при прямом (неуправляемом) пуске  $\Delta W_{пр}$  в отношении к потерям энергии при плавном (управляемом) пуске  $\Delta W_{уп}$  в функции длительности нарастания угла управления ТРН ( $t_{упр}$ ).

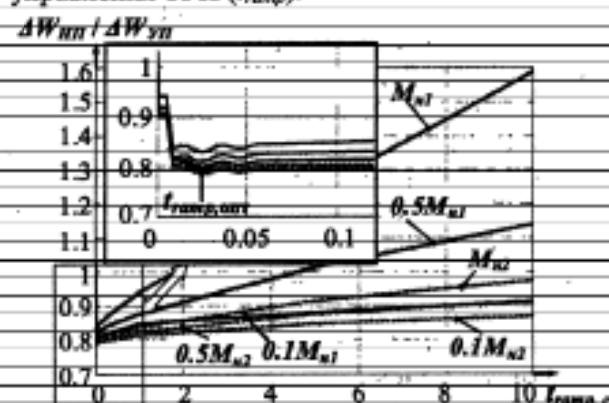


Рис. 4. Изменение потерь энергии при плавном пуске АД

Построение кривых рис. 4 проводилось для двух АД со значением момента сопротивления на валу  $M_{ср} = \{0.1 \cdot M_{н2}, 0.5 \cdot M_{н2}, M_{н2}\}$  для двигателя 4АС132С4УЗ (номинальная мощность  $P_n = 8.5$  кВт) с номинальным электромагнитным моментом  $M_{н2} = 58$  Н·м и  $M_{ср} = \{0.1 \cdot M_{н2}, 0.5 \cdot M_{н2}, M_{н2}\}$  для двигателя 4АС250М4УЗ ( $P_n = 63$  кВт) с номинальным электромагнитным моментом  $M_{н2} = 430$  Н·м соответственно.

На рис. 4 показан минимум потерь энергии, вызванный снижением колебательности переменных состояния модели АД в течение переходного процесса. При  $t_{упр} = t_{упр,опт} = 0.02 - 0.03$  сек потери энергии  $\Delta W_{уп}$  снижаются на 14-20% по сравнению с потерями при неуправляемом пуске  $\Delta W_{пр}$ . Увеличение  $t_{упр}$  приводит к возрастанию потерь за счет увеличения времени нахождения АД в области пониженной скорости. Анализ графиков, приведенных на рис. 4, позволяет подчеркнуть, что необоснованное увеличение длительности плавного пуска приводит в итоге к превышению потерь энергии по сравнению с прямым пуском. Однако, в общепринятом алгоритме управления плавным пуском при использовании алгоритма с токоограничением (1) 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 этом случае, 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. Следовательно, для удовлетворения требований энергосбережения при плавном пуске АД необходимо устремление продолжительности плавного пуска АД  $t_{плав} \rightarrow t_{плав,опт}$ , что, однако, будет сдерживаться требованиями безопасности, накладываемыми на показатели технологического процесса преобразования электромеханической энергии в системе «электрическая сеть - устройство плавного пуска - асинхронный двигатель - центробежный насос - трубопровод», анализу которых посвящен следующий параграф.

#### Физическая сущность процессов преобразования энергии в системе «сеть - УПП - АД - насос - трубопровод»

Для пояснения физической сущности процессов, протекающих при пуске АД насосной станции, рассмотрим логическую схему функционирования АСУПП АД, приведенную на рис. 5, где с целью упрощения рисунка для пуска каждого АД используется отдельное УПП. На практике, как правило, одно УПП с помощью коммутационного оборудования подключается последовательно к каждому АД.

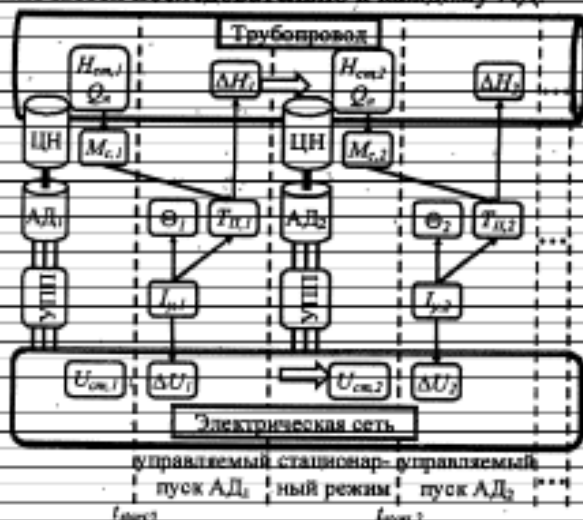


Рис. 5. Логическая схема функционирования АСУПП АД насосной станции

Рассмотрим традиционный пуск АД насосных агрегатов с помощью УПП по программе с токоограничением при которой уставка тока  $I_y$  задается одинаковой для всех АД основных насосов, т.е.  $I_y = I_{y1} = I_{y2} = \dots = I_{yn}$ . Перед нача-

лом пуска первого двигателя АД<sub>1</sub> во вторичной цепи трансформаторной подстанции действующее линейное напряжение имеет величину  $U_{см,1}$ ; в трубопроводе существует установившийся напор воды  $H_{см,1}$ , который вместе с начальным расходом  $Q_n$  обуславливают величину момента сопротивления  $M_{c,1}$  центробежного насоса ЦН<sub>1</sub>. Управляемый пуск первого АД начинается в момент времени  $t_{плав,1}$  при подаче соответствующей команды на УПП. В продолжение переходного процесса: (1) появившиеся пусковые токи вызывают падение напряжения в электрической сети на величину  $\Delta U_1$ ; (2) температура статорных обмоток АД повышается до значения  $\Theta_1$ ; (3) напор воды в трубопроводе возрастает на величину максимальное значение которой равно  $\Delta H_1$ .

По окончании переходного процесса в трубопроводе устанавливается напор  $H_{см,2}$ , который вместе с расходом  $Q_n$  будут обуславливать величину момента сопротивления  $M_{c,2}$  центробежного насоса ЦН<sub>2</sub>.

В таком порядке запускаются все  $n$  АД, причем при запуске каждого последующего двигателя начальными условиями являются значения переменных состояния модели, полученные при пуске предыдущих АД.

#### Постановка задачи разработки энергосберегающего алгоритма управления плавным пуском АД насосной станции

Проведенный выше анализ, а также анализ литературных источников [2, 4, 6, 8] позволяет сформулировать следующие ограничения, учет которых необходим для удовлетворения требования безопасности к технологическому процессу преобразования энергии в системе «электрическая сеть - устройство плавного пуска - асинхронный двигатель - центробежный насос - трубопровод»:

1. Величина ударного пускового тока АД  $I_{yп}$ , А (наибольшая амплитуда статорных токов двигателя в продолжение переходного процесса) не должна вызывать падение номинального напряжения в точке общего присоединения к сети ниже значения  $\Delta U_{мин,доп}$ , устанавливаемого ГОСТ 13109-97 «...Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». Выполнение этого условия обеспечивает нормальную работу электрического оборудования насосной станции, в том числе вычислительной техники, контрольно-измерительной аппаратуры и т.д.

2. Величина  $I_{yп}$  не должна превышать амплитуду пускового тока АД  $I_n$ , А, устанавливаемую производителем данного двигателя. Выполнение этого условия обеспечит защи-

ту 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 установившейся температуры статорных обмоток АД  $\theta_n$ , °С, выше предельно допустимого среднего значения  $\theta_{\text{max, доп}}$ , °С, устанавливаемого ГОСТ 8865-93 «Система электрической изоляции. Оценка нагревостойкости и классификации...» для системы изоляции соответствующего класса нагревостойкости.

4. Продолжительность переходных процессов  $T_n$ , 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  $\Delta P_{\text{max}}$ , Па, вызванный таким переходным процессом, не превышал установленной максимально допустимой величины  $\Delta P_{\text{max, доп}}$ , Па.

Итак, с целью сокращения потерь электрической энергии в обмотках асинхронных двигателей насосной необходимо с использованием математической модели системы «электрическая сеть – VIII – АД – насос – трубопровод» разработать алгоритм вычисления уставки  $k_{\text{уст}}$  для каждого АД, который обеспечит ускорение  $T_n \rightarrow T_{n \text{ опт}}$  при условии удовлетворения перечисленных выше ограничений ( $I_n$ ,  $\theta_{\text{max, доп}}$ ,  $\Delta U_{\text{max, доп}}$ ,  $\Delta P_{\text{max, доп}}$ ), накладываемых на показатели переходных процессов.

#### Заключение

Приведена постановка задачи разработки оптимального (по критерию минимизации энергетических потерь) алгоритма вычисления параметров программы плавного пуска для каждого АД насосной станции с учетом ограничений на максимальный ток статорных обмоток АД, максимальную температуру статорных обмоток и максимальный прирост давления в трубопроводе в течение переходного процесса.

Разработке и внедрению новых алгоритмов управления асинхронным электроприводом насосных станций препятствуют трудности экспериментального исследования динамики преобразования энергии, которые обусловлены двумя обстоятельствами. С одной стороны, диапазон амплитуды токов в переходных режимах изменяется от 200А до 4кА и более при изменении напряжения от 220В до 380В. При этом полные мощности, потребляемые от сети, могут достигать 2,5-3МВ·А, что требует сложного и дорогостоящего экспериментального

оборудования. С другой стороны, возникновение гидравлического удара, сопровождаемого кавитацией, может привести к разрушению трубопровода в месте локализации максимального давления [6, 8]. Это обстоятельство не позволяет проводить экспериментальные исследования на действующих объектах. В связи с этим на практике, экспериментальные исследования, а также обучение персонала, проводят, как правило, с использованием компьютерных тренажеров [9]. Таким образом, для проверки эффективности алгоритмов управления АЭП насосной станции необходимо разработать математическую модель и методику моделирования процесса преобразования энергии в системе «электрическая сеть – силовой трансформатор – асинхронный двигатель – центробежный насос – трубопровод», позволяющую воспроизводить переходные электромагнитные и тепловые процессы в асинхронном двигателе при управляемом пуске, а также нестационарное движение жидкости в трубопроводе. Описанию математической модели насосной станции посвящена следующая статья нашего цикла.

#### Список использованных источников

1. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод: учеб. пособ. для студ. высш. учеб. заведений / Под ред. И.Я. Браславского. – М.: Издат. центр «Академия», 2004. – 256 с.;
2. Копылов И.П. Электрические машины: учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 2002. – 607 с.;
3. McElveen R.F., Toney M.K. Starting High-Inertia Loads// IEEE Transactions on Industry Applications. – 2001. – № 1. – Pp. 137–144.;
4. Поздеев Д.А., Ерезеев А.Н., Яковлев О.Г., Котельников О.В. Автоматизированная система плавного пуска высоковольтных двигателей магистральных насосов нефтепровода «Дружба» ОАО «Транснефть» // Электротехника. – 2006. – № 6. – С. 2–10.;
5. Чебаевский В.Ф., Вишневецкий К.П., Накладов Н.Н. Проектирование насосных станций и испытание насосных установок – М.: Колос, 2000. – 376 с.;
6. Larock B.E., Jeppson R.W., Watters G.Z. Hydraulics of Pipeline Systems – Boca Raton: CRC Press LLC, 2000. – 533 p.;
7. Браславский И.Я., Зюзев А.М., Костылев А.В. Исследование свойств систем «тиристорный преобразователь напряжения – асинхронный двигатель» с различными типами синхронизации // Электротехника. – 2000. – № 9. – С. 1–5.;
8. Смирнов Д.Н., Зубов Л.Б. Гидравлический удар в напорных водоводах. – М.: Строй-