

**Редакционный совет журнала:**

Голеников В.А. д.т.н., профессор –  
председатель;  
Степанов Ю.С. д.т.н., профессор –  
зам. председателя;  
Светкин В.В. к.т.н., доцент;  
Колчунов В.И. д.т.н., профессор;  
Гордон В.А. д.т.н., профессор;  
Константинов И.С. д.т.н., профессор;  
Садков В.Г. д.э.н., профессор;  
Фролова Н.А. к.социол.н., доцент;  
Радченко С.Ю. д.т.н., профессор  
Снежко О.А. к.ю.н., доцент;  
Борзенков М.И. к.т.н., доцент;  
Одолеева М.В.;  
Поландова Л.И.

**Редколлегия серии:**

Константинов И.С., д.т.н., профессор –  
зам. главного редактора;  
Еременко В.Т., д.т.н., профессор –  
ответственный секретарь;  
Митин А.А., к.т.н., доцент –  
технический секретарь;  
Колоколов Ю.В., д.т.н., профессор;  
Суздальцев А.И., д.т.н., профессор;  
Савина О.А., д.э.н., профессор;  
Коськин А.В., к.т.н., доцент;  
Раков В.И., к.т.н., доцент;  
Архипов О.П., к.т.н., с.н.с;  
Гайндрик К.Г. д.т.н., профессор;  
Иванов В.А., д.военных.н., профессор;  
Иванников А.Д., д.т.н., профессор;  
Аверченков В.И., д.т.н., профессор;  
Жилияков Е.Г., д.т.н., профессор;  
Иноземцев А.Н., д.т.н., профессор;

Сотников В.В. д.т.н., профессор.

Зарег. в Министерстве РФ по делам  
печати, телерадиовещания и средств  
массовой информации. Свидетельство:  
ПИ № 77-15496 от 20 мая 2003 года

Адрес редколлегии серии:  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29

Формат 96×90/8.  
Печать ризография. Бумага офсетная.  
Усл.печ.л. 14. Заказ № \_\_\_\_\_.  
Тираж 100 экз.  
© ОрелГТУ 2007

<i>Еременко В.Т., Парамохина Т.М., Кириченко О.Е. Математическое моделирование протоколов информационного обмена на основе расширенных конечных автоматов.....</i>	6
<i>Колоколов Ю.В., Устинов П.С., Шолоник А.П. Бифуркационный подход к синтезу систем управления импульсными преобразователями энергии: экспериментальное подтверждение эффективности.....</i>	13
<i>Колоколов Ю.В., Мелихов А.Ю. Моделирование переходных режимов насосной станции первого подъема.....</i>	18
<i>Колоколов Ю.В., Тей Д.О. Алгоритмы исследования экспериментальной динамики гистерезисных регуляторов.....</i>	24
<i>Колоколов Ю.В., Шульгин Е.В. Автоматизация экспериментальных исследований асинхронного электропривода.....</i>	29
<i>Карлов Б.И., Колоколов Ю.В. Параметрическая чувствительность наблюдателей потокоцепления и устойчивость системы векторного управления без обратной связи по скорости.....</i>	34
<i>Гущин Ю.Г. О вербальной модели диссертационной работы.....</i>	39
<i>Моновская А.В., Секаев Д.А. Возможность применения преобразований сигналов для идентификации типов стационарного процесса.....</i>	43
<i>Воронина О.А., Лобанова В.А. Информационное представление системы управления множеством нечетких ситуаций.....</i>	48
<i>Воронина О.А., Борисова М.А. Управление процессами информационного обмена в системе управления нефтеперерабатывающим предприятием.....</i>	50

УДК 621.313.333.2

КОЛОКОЛОВ Ю.В., МЕЛИХОВ А.Ю.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ ПЕРВОГО ПОДЪЕМА

Startup and shutdown transient processes of the source pump station are modeled in the paper. Simulation of the obtained model allows to analyze a conversion energy in the "softstarter – asynchronous machine – centrifugal pump" system under hydraulic transient condition.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время автоматизация технологических процессов электромеханического преобразования энергии продолжает развиваться по трем основным направлениям: повышение надежности, энергоэффективности и экономичности [1-3]. Эта тенденция принимает особое значение в тех сферах промышленности и народного хозяйства, в которых электропривод (ЭП) исполнительных механизмов составляет основу технологических процессов. В частности, ЭП турбомеханизмов (вентиляторы, компрессоры, насосы и др.) по различным оценкам потребляет до 25% всей вырабатываемой электроэнергии [1,2] и, следовательно, поступательное движение по любому из перечисленных выше направлений в этой сфере может привести к значительному совокупному эффекту.

По доли потребляемой энергии среди турбомеханизмов особое положение занимают центробежные насосы, применяющиеся в основном для транспортирования жидкостей в системах водоснабжения, водоотведения и магистральных трубопроводах. При этом стремительное повышение тарифов на электроэнергию придает особую актуальность проблеме автоматизации и энергосбережения в системах коммунального и промышленного водоснабжения.

Решение задачи автоматизации насосных станций (НС) в первую очередь связано с выбором и применением такого типа ЭП, который позволит удовлетворить требования технологического процесса к надежности, энергоэффективности и экономичности. Для автоматизации НС широкое распространение получил асинхронный ЭП с системой импульсно-фазового управления тиристорным преобразователем напряжения (СИФУ-ТПН) [1].

Главное назначение ЭП 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 обмотках двигателя, с другой стороны ограничит прирост давления в трубопроводе до допустимого значения [1,4]. Сущность указанной задачи привела к тому, что ЭП, обеспечивающий ее решение, получил название – "устройство плавного пуска" (УПП).

В значительной части публикаций, посвященных разработке и усовершенствованию УПП асинхронных двигателей (АД) с СИФУ-ТПН, основное внимание уделяется вопросам ограничения свободных составляющих токов статорных обмоток и электромагнитного момента без учета процессов, протекающих в механической нагрузке, приведенной к валу двигателя [1,4]. Однако, возникновение гидравлических ударов, приводящих к появлению опасных напряжений в трубопроводе [5] на фоне повышенных требований к надежности УПП насосных агрегатов системы водоснабжения и магистральных трубопроводов [1,3], приводят к необходимости совместного рассмотрения процессов электро-механо-гидравлического преобразования

энергии в системе “электрическая сеть – УПП – АД – центробежный насос – трубопровод”. Для описания порядка получения такой модели настоящая статья организована следующим образом: в первом разделе приводится типовая структурная схема насосной станции первого подъема, описываются ее составляющие и постановка задачи; во втором разделе рассматривается подход к получению математической модели системы “УПП-АД-насос” в переходных режимах. Перед заключением в третьем разделе приводятся исходные данные и результаты численного моделирования неустановившегося течения жидкости в трубопроводе при плавном пуске и останове насосных агрегатов.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Структура системы водоснабжения зависит от множества факторов (рельефа местности, характера и числа водоисточников, объема водопотребления и др.) и разрабатывается индивидуально для каждого конкретного объекта. Обзор литературы, приведенной в [3,5], позволил определить типовую структурную схему насосной станции (НС) первого подъема (рисунок 1).

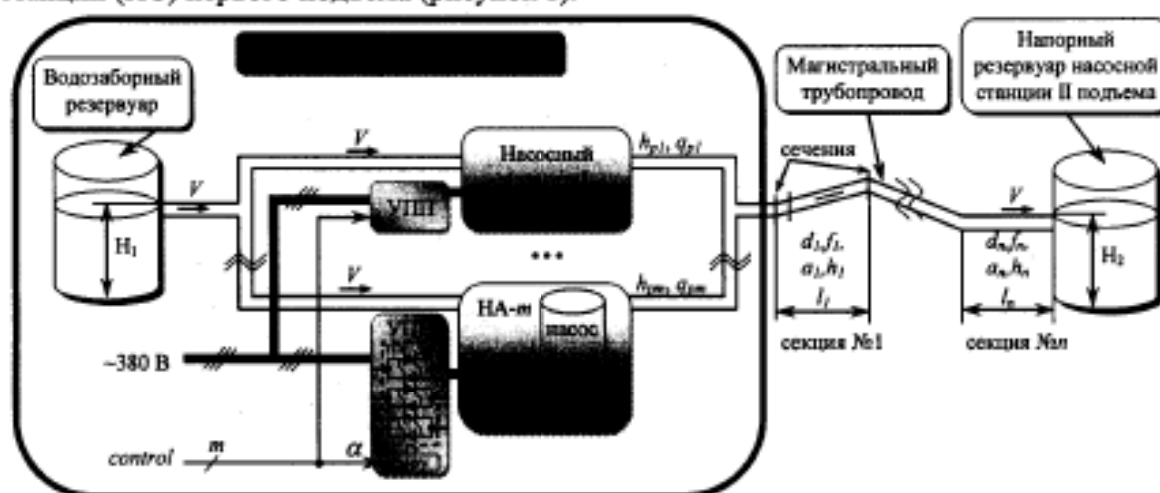


Рисунок 1 – Типовая структурная схема насосной станции первого подъема

С целью построения математической модели НС, приведенной на рисунке 1, и получения численного решения для случая неустановившегося течения жидкости (при пуске или останове насосных агрегатов (НА)) необходимо описать начальные и граничные условия. В статье указанные условия соответствуют следующей ситуации: вода непосредственно из артезианских скважин или из водоема после соответствующей обработки поступает в водозаборный резервуар, в котором поддерживается постоянный уровень  $H_1$ (м). В начальный момент времени ( $t=0$ ) все  $m$  НА работают в установившемся режиме, при этом вал каждого АД вращается с номинальной скоростью  $N_r = N_0$  (об/мин), создавая номинальный момент  $M = M_n$  (Н·м). Такое условие позволяет предположить, что рабочая точка каждого насоса расположена на характеристической кривой в области номинальных напора  $h_p = H_n$ (м) и подачи  $q_p = Q_n$ (м<sup>3</sup>/с). Тогда, зная уровень воды в напорном резервуаре НС второго подъема ( $H_2$ ) и параметры каждого  $i$ -ого сегмента магистрального трубопровода ( $l_i$ -длина,  $d_i$ -диаметр,  $f_i$ -коэффициент сопротивления,  $a_i$ -скорость распространения давления,  $h_i$ -уровень воды), можно вычислить начальную скорость движения воды  $v_0$ , давление  $P$ , расход  $Q$  и напор  $H$  для любого сечения трубопровода в момент времени  $t=0$ .

Постановка задачи. Пусть для каждого  $j$ -ого НА ( $j=1,2,...,m$ ) с помощью УПП формируется линейная траектория пуска (останова), начиная с момента времени  $t_{start,j}$

( $t_{stop,j}$ ), продолжительностью  $t_{ramp,j}$  (сек). При этом предполагается, что АД каждого НА уже имеет некоторую начальную скорость  $N_{start,j}$  (например, при условии предварительного пуска на закрытую задвижку). Требуется получить изменение зависимости давления воды в трубопроводе в продолжение переходного процесса (пуска и останова), определив сечение и амплитуду его максимального прироста по отношению к значению установившегося режима.

Для решения поставленной задачи вначале необходимо составить уравнения, описывающие неустановившееся течение жидкости в трубопроводе, сделав ряд допущений. В частности предполагается, что: (1) 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 Darcy-Weisbach [5]; (2) 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 системой уравнений Эйлера [5]:

$$\begin{cases} \frac{dV}{dt} + g \frac{\partial H}{\partial s} + \frac{f}{2D} V|V| = 0, \\ a^2 \frac{\partial V}{\partial s} + g \frac{dH}{dt} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $V$  – скорость движения жидкости вдоль  $i$ -ой секции трубопровода (в направлении  $s$ );  $H$  – напор воды;  $D$  – диаметр трубы;  $a$  – скорость распространения волны давления;  $g$  – ускорение свободного падения.

Система уравнений (1) представляет собой систему дифференциальных уравнений (ДУ) в частных производных второго порядка. Решение этой системы осложнено тем, что до настоящего времени его не удалось получить аналитически в замкнутой форме. Вместе с тем, использование численного метода характеристик (разновидность сеточных методов) позволяет получить решение этой системы для трубопровода сколь угодно сложной конфигурации [5]. При этом система уравнений (1) приводится к разностной форме для двумерной сетки и записывается для каждой секции трубопровода отдельно с учетом принципа неразрывности потока в узлах сопряжения.

Характерная особенность рассматриваемой задачи заключается в том, что краевые условия в конце против течения трубопровода (расход и напор в первом сечении первой секции (сечения каждой секции нумеруются последовательно, начиная от единицы с конца против течения) будут изменяться в продолжение переходного процесса вместе с изменением скорости вращения насосов. Следовательно, прежде чем приступить к интегрированию системы ДУ (1), необходимо составить модель системы “УПП-АД-насос”, адекватную переходным режимам.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ “УПП-АД-НАСОС”

В настоящее время УПП выполняются на базе СИФУ с симметричным ТПН, структурная схема которого приведена на рисунке 1. Алгоритм функционирования ТПН позволяет выделить интервалы времени, в течение которых структура системы СИФУ-ТПН-АД остается постоянной [1,4]. Такие интервалы постоянства соответствуют пяти режимам подключения двигателя к сети переменного тока: симметричному (АВС), несимметричным (АВ, ВС, АС) и “нулевому” режимам (в этом случае статорные обмотки АД отключаются от сети). Относительная

продолжительность перечисленных режимов устанавливается с помощью угла открытия тиристоров  $\alpha$ , что позволяет изменять действующее напряжение на выходе ТПН, управляя скоростью АД. При составлении математической модели СИФУ-ТПН-АД для каждого интервала на основании законов Ома и Кирхгофа записывается система обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) в следующей форме [4]:

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = f_i[x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), g(t)], \quad x_i(t) \in \mathbf{R}^n, \quad (2)$$
$$t \in [t_j, t_{j+1}], \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad x_i(0) = x_i^0, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

где  $f_i$  – нелинейные функции переменных состояния  $x_i$  (в качестве  $x_i$  выступают угловая скорость вала, токи и/или потокосцепления обмоток АД) и напряжения сети  $g(t)$ ;  $n$  соответствует числу зависимых переменных ( $n=4$  в “нулевом” режиме;  $n=5$  в несимметричных режимах “АВ”, “ВС”, “АС”;  $n=7$  в симметричном трехфазном режиме “АВС”).

Составив математические модели для всех режимов постоянства структуры, их интегрирование проводят численными методами с использованием принципа приспосабливания: результат решения в конце предыдущего интервала постоянства структуры является начальным условием для интегрирования системы ОДУ, соответствующей последующему интервалу [1,4].

Для записи функционального выражения насосной нагрузки в аналитической форме используют аппроксимацию 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. Из принципа подобия, в частности, вытекает, что, если поставлены в соответствие два множества точек расхода ( $q_{0j}$ ) и напора ( $h_{0j}$ ), расположенные на характеристической кривой, отвечающей номинальному режиму работы со скоростью вращения  $N_0$ , то для получения пары значений  $q_{pj} - h_{pj}$ , лежащей на характеристической кривой, соответствующей скорости  $N_j < N_0$ , достаточно воспользоваться следующими соотношениями:

$$q_{pj} = q_{p0} \frac{N_j}{N_0}; \quad h_{pj} = h_{p0} \left( \frac{N_j}{N_0} \right)^2. \quad (3)$$

В следующем разделе приводятся результаты совместного численного интегрирования моделей неустановившегося течения жидкости (1), СИФУ-ТПН-АД (2) и центробежного насоса (3).

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ

Ниже перечислены основные параметры насосной станции (рисунок 1), моделирование которой проводилось в работе: число последовательно соединенных секций трубопровода  $n=3$ ; уровень воды в резервуарах  $H_1=395(\text{м})$ ,  $H_2=840(\text{м})$ ; число параллельных НА  $m=4$  (все насосы НА идентичны центробежному насосу Ingersoll-Dresser 15H277 и имеют характеристические кривые, приведенные в [5]). Моменты времени пуска насосов:  $t_{start,j}=\{60 \ 70 \ 80 \ 90\}$ ,  $j=1 \dots 4$ ; остановка насосов:  $t_{stop,j}=\{200 \ 210 \ 220 \ 230\}$ ,  $j=1 \dots 4$ ; продолжительность переходного процесса для каждого насоса выбрана одинаковой и равной  $t_{ramp}=10$  сек. Параметры схемы замещения АД соответствуют двигателю 4АН280М4УЗ.

На рисунке 2.а приведены графики изменения давления  $P$  (в метрах водяного столба) во времени в тех сечениях каждой из трех секций трубопровода, в которых было зафиксировано максимальное давление. Анализ графиков, приведенных на рисунке 2.а, позволяет установить, что максимальное давление ( $P_{max}=2986$  м.вод.ст.) возникает в продолжение пуска второго насоса в момент времени  $t_{p,max}=77.02$  (сек) в

первой секции трубопровода, примыкающей к расходной стороне НС. Для этой секции на рисунке 2.6 приведен график изменения давления  $P$  по длине  $L$ (м) в функции времени  $T$ .

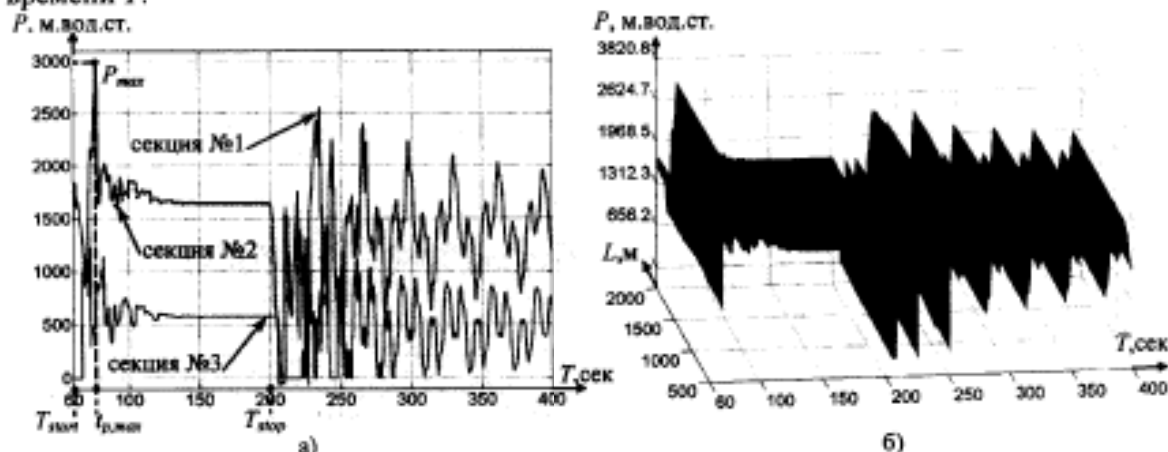


Рисунок 2 – Результаты моделирования переходных процессов пуска и останова НА насосной станции первого подъема

Таким образом, каждый раз при запуске или останове насосных агрегатов персонал станции вынужден решать задачу оптимального выбора продолжительности переходных процессов. Производители УПП записывают в память микроконтроллера несколько типовых пуско-тормозных траекторий для различных нагрузок. Очевидно, что предустановленная длительность траекторий не может гарантировать безопасность при произвольных начальных и граничных условиях. Выбор же максимально возможной продолжительности приводит к необоснованным потерям энергии. Один из способов решения этой задачи состоит в разработке и использовании в составе ПО диспетчерского пульта, пакета прикладных программ, позволяющих моделировать переходные режимы функционирования НС в условиях оперативной обстановки.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрена типовая структурная схема НС первого подъема, для которой получена математическая модель, описаны граничные и начальные условия. Для конкретных параметров НА и магистрального трубопровода проведено моделирование переходных процессов в трубопроводе при пуске и останове насосных агрегатов. В результате моделирования получена информация о локализации и максимальной амплитуде давления, которая для условий данной задачи составило  $P_{max}=2986$  (м.вод.ст.), что фактически в 2 раза превышает исходное установившееся значение  $P_{0}=1676$  (м.вод.ст.).

### ЛИТЕРАТУРА

- 1 Браславский И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков; Под ред. И.Я. Браславского. – М.: Издат. центр «Академия», 2004. – 256 с.
- 2 Андрижиевский А.А. Энергосбережение и энергетический менеджмент: учеб. пособие / А.А. Андрижиевский, В.И. Володин. – 2-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 2005. – 294 с.
- 3 Эгильский И.С. Автоматизированные системы управления технологическими процессами подачи и распределения воды. – Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1988. – 216 с.

4 Solveson M., Mirafzal B., and Demerdash N. Soft-Started Induction Motor Modeling and Heating Issues for Different Starting Profiles Using a Flux Linkage ABC Frame of Reference // IEEE Transactions on Industry Applications. – Vol. 42, No. 4, 2006. – Pp. 973 – 982.

5 Larock B.E. Hydraulics of Pipeline Systems. / B.E. Larock, R.W. Jeppson, G.Z. Watters. – Boca Raton: CRC Press LLC, 2000. – 533 p.

**Колоколов Юрий Васильевич**

Зав. кафедрой проектирования, технологии электронных и вычислительных систем, д.т.н., профессор  
Орловский государственный технический университет, г. Орел

Тел.: +7 (4862) 419879

E-mail: [2kolo@mail.ru](mailto:2kolo@mail.ru)

**Мелихов Артем Юрьевич**

Инженер кафедры проектирования, технологии электронных и вычислительных систем  
Орловский государственный технический университет, г. Орел

Тел.: +7 (4862) 419879

E-mail: [science-orel@mail.ru](mailto:science-orel@mail.ru)