

1001 0010 0100 0100  
1011 1100 0001 010  
0100 1010 1100 1010  
ISSN 1729-5068 0010  
1110 1101  
1110 0100


# СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО-  
ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ЖУРНАЛ

№ 3.2(37)  
2009

ПЕР. РЕДАКЦИЯ  
ИЗДАТЕЛЬСТВО

<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 мультимедийной 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

издат, 1975. — 125 с.;

9. Селезнев В.Е., Алешин В.В., Прылов С.Н. Современные компьютерные тренажеры в трубопроводном транспорте: математические методы моделирования и практи-

ческое применение. — М.: МАКС Пресс, 2007. — 200 с.

Югорский государственный университет,  
г.Ханты-Мансийск

УДК 681.521.7: 621.316.717

## РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ПЛАВНЫМ ПУСКОМ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ. ЧАСТЬ 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ПОДСИСТЕМЫ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ

Ю.В.Колоколов, А.Ю.Мелихов

*Цикл из четырех статей посвящен формированию подхода к снижению потерь электрической энергии в обмотках асинхронных двигателей насосной станции. Во второй статье приводится описание математической модели энергетической подсистемы насосной станции.*

### Введение

Проблема разработки энергоэффективного алгоритма управления плавным пуском асинхронных двигателей (АД) насосной станции, обеспечивающего помимо сокращения потерь электрической энергии, безопасность протекания переходных процессов в электроприводе и трубопроводе связана с необходимостью удовлетворения противоречивых требований. С одной стороны, потери электрической энергии в обмотках АД могут быть снижены за счет сокращения времени нахождения АД в области повышенного скольжения и устремления продолжительности пуска к некоторому оптимальному значению  $T_n \rightarrow T_{n,опт}$ ,  $I_{рост,опт} = 0,8$

оптимальная продолжительность нарастания напряжения на статорных обмотках АД. С другой стороны, сокращение продолжительности пуска двигателей насосной станции сдерживается следующими ограничениями, накладываемыми на показатели переходного процесса [1, 2]:

1. Величина ударного пускового тока АД  $I_{уд}$ , А (наибольшая амплитуда статорных токов двигателя в продолжение переходного процесса) не должна вызывать падение номинального напряжения в точке общего присоединения к сети ниже значения  $\Delta U_{норм,доп}$ , устанавливаемого ГОСТ 13109-97 «...Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

2. Величина  $I_{уд}$  не должна превышать амплитуду пускового тока АД  $I_{р}$ , устанавливаемую производителем двигателя.

3. Характер изменения токов статорных обмоток АД в течение переходного процесса не должен вызывать увеличение установившейся температуры статорных обмоток АД  $\theta_s$ , °С, выше предельно допустимого среднего значения  $\theta_{max,доп}$ , °С, устанавливаемого ГОСТ 8865-93 «Система электрической изоляции. Оценка нагрываемости и классификации».

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

Характер перечисленных выше ограничений усложняет задачу разработки оптимальных по тому или иному критерию алгоритмов управления плавным пуском АД насосной станции, поскольку для этого необходимо использовать математическую модель, адекватно отражающую протекание переходных процессов в системе «электрическая сеть — устройство плавного пуска — асинхронный двигатель — центробежный насос — трубопровод». Разработке структуры такой модели и анализу ее составляющих посвящены вторая и третья статья цикла. Во второй статье рассматриваются модели энергетической подсистемы насосной станции: трансформаторная подстанция, устройство плавного пуска АД, модель нестационарного нагрева обмоток АД.

### Структура математической модели насосной станции

В процессе пуска асинхронных двигателей насосной станции (НС) с помощью коммутационного оборудования устройство плавного пуска (УПП), питающееся от силового трансформатора, подключается последовательно к каж-

дому двигателю основных насосов. Пуск АД начинается по команде оператора. При достижении значения угловой скорости двигателя области подсинхронной скорости (-5% от величины синхронной скорости), УПП с помощью обводного контактора подключает запускаемый АД напрямую к электрической сети (вторичной обмотки силового трансформатора). В такой же последовательности производится запуск остальных АД насосной станции.

В зависимости от целей моделирования динамических процессов, применяются два подхода к построению математической модели [1, 3-5]: распределенная постановка задачи и сосредоточенная. При распределенной постановке задачи ставится цель исследовать не только временную динамику протекания процессов, но и пространственную. Математическая модель в этом случае записывается на языке дифференциальных уравнений (ДУ) в частных производных. При использовании сосредоточенной постановки задачи, пространственной динамикой пренебрегают и исследуют эволюцию переменных состояния математической модели во времени. В этом случае ДУ в частных производных сводятся к обыкновенным ДУ.

При моделировании электромеханического преобразования энергии при пуске АД насосной станции, запускаемый двигатель рассматривается как часть электропривода, что позволяет воспользоваться сосредоточенной постановкой задачи при моделировании системы «УПП – АД – центробежный насос». На этом же основании для определения максимального прироста температуры в течение переходного процесса тепловая модель АД может рассматриваться в сосредоточенной постановке.

Модель электрической сети может быть адекватно (в контексте данного исследования) отражена с помощью модели ЛЭП (в виде источника синусоидального тока бесконечной мощности) и трансформаторной подстанции (ТП). Модель ТП представляет собой идеальный понижающий трансформатор ко вторичной обмотке которого последовательно во времени подключаются АД в продолжение пуска насосных агрегатов. 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.

Разработка алгоритмов управления плавным пуском АД, обеспечивающих формирование оптимальных пуско-тормозных траекторий, снижающих энергетические потери, и, исклю-

чающих возникновение гидравлического удара в трубопроводе, требует использования ММ неустановившегося движения жидкости, позволяющей воспроизводить условия и особенности протекания гидравлического удара. Такая цель обуславливает необходимость использования распределенной постановки задачи описания динамики движения жидкости в трубопроводе на языке ДУ в частных производных.

#### Модель системы импульсно-фазового управления тиристорным преобразователем напряжения асинхронного двигателя

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 (СИФУ) тиристорным регулятором напряжения (ТРН) [2]. Сосредоточенная постановка задачи описания электромеханического преобразования энергии в СИФУ-ТРН-АД, обоснованная выше, определяет совокупность допущений, используемых в этом случае [1, 3]. 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 во времени и соответствуют параметрам установившегося режима. Каждый тиристор преобразователя напряжения представляется идеальным ключом, наличие параллельной демпфирующей RC-цепи не учитывается.

Импульсный характер функционирования симметричного трехфазного ТРН (рис. 1) позволяет выделить в продолжение периода питающего напряжения интервалы постоянства структуры (ИПС), количество которых соответствует количеству коммутируемых тиристоров и равно шести. Каждый интервал характеризуется соответствующим режимом подключения АД к сети переменного тока. Можно выделить три несимметричных двух фазных режима: «АВ», «ВС», «АС»; и два симметричных: «АВС» и «0» (режим отключения АД от сети) [6]. Относительная продолжительность ИПС устанавливается с помощью угла открытия тиристоров  $\alpha$ , эл. град., что позволяет изменять действующее напряжение на выходе ТРН, управляя скоростью АД. В частности, в симметричном ТРН (рис. 1), при использовании СИФУ, синхронизированной по напряжению сети, и АД, подключенного звездой с изолиро-

ванной нейтралью, угол управления  $\alpha$  изменяется в диапазоне  $\alpha \in [60; 120]$ .

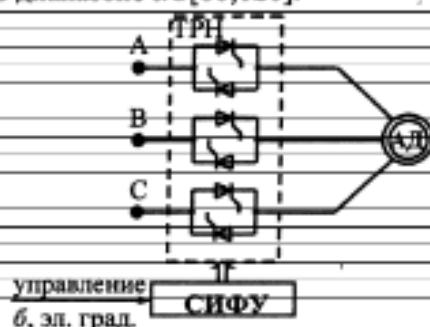


Рис. 1. Структурная схема устройства плавного пуска АД

При составлении математической модели СИФУ-ТРИ-АД для каждого ИНС на основании законов Ома и Кирхгофа записывается система обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) в следующей форме [6]:

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = f_i[x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), g(t)], x_i(t) \in \mathbb{R}, \quad (1)$$

$$t \in [t_0, t_m], i = 1, 2, \dots, n; x_i(0) = x_i^0, i = 1, 2, \dots, n,$$

где  $f_i$  — нелинейные функции напряжения сети  $g(t)$  и переменных состояния  $x_i$  (в качестве  $x_i$  выступают угловая скорость вала ротора, токи и/или потокосцепления обмоток АД);  $n$  соответствует числу переменных состояния модели ( $n=4$  в режиме "0";  $n=5$  в несимметричных режимах "AB", "BC", "AC";  $n=7$  в симметричном трехфазном режиме "ABC"). Системы уравнений вида (1) характеризуются высоким порядком ( $n \geq 4$ ) и нелинейностью (за исключением модели режима "0"). При этом численное интегрирование полной математической модели СИФУ-ТРИ-АД требует существенных затрат машинного времени, для сокращения которых был разработан узкоспециализированный алгоритм, названный «гибридным» [7]. Реализация и использование гибридного алгоритма в среде "MATLAB 7.4"® (The MathWorks, Inc.) позволила до 30% сократить затраты машинного времени на моделирование динамики СИФУ-ТРИ-АД по сравнению со временем решения аналогичной задачи при использовании встроенной функции *ode45* [7].

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

На рис. 2а,б (2в,г) приведены кривые мгновенного тока статорной обмотки фазы "С"  $i_{c}(t)$  при управляемом пуске АД вхолостую из заторможенного состояния с углом управления  $\alpha$

$= 100$  эл. град. на интервале времени от нуля до выхода на установившейся режим при проведении физического (численного) эксперимента.

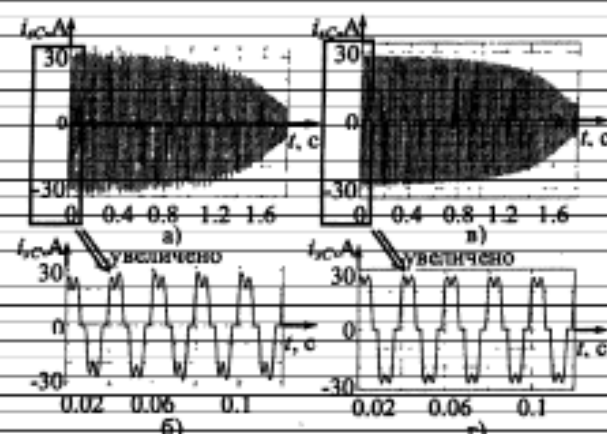


Рис. 2. Результаты физического и численного экспериментальных исследований пуска АД 4А112М4У3 с УПП-ТПП-50-380-50-УХЛ4

Оценка адекватности математической модели СИФУ-ТРИ-АД проводилась посредством расчета значения относительной погрешности ударного тока АД  $\delta I_{\text{уп}}$  в диапазоне варьирования угла управления  $\alpha \in [80; 116]$  эл. град. по формуле:  $\delta I_{\text{уп}} = \frac{|I_{\text{м,фз}} - I_{\text{м,сз}}|}{I_{\text{м,фз}}} \cdot 100\%$ , где  $I_{\text{уп,фз}}$

( $I_{\text{уп,сз}}$ ) — максимальный ток статорных обмоток АД при проведении физического (численного) эксперимента. При этом из серии экспериментов для анализа выбирается тот, в котором зафиксировано максимальное мгновенное значение тока. Шаг варьирования угла управления принимался равным  $\Delta\alpha=2$  эл. град., что позволило для  $\alpha \in [80; 116]$  получить 19 отсчетов.

На рис. 3а приведены зависимости коэффициента кратности ударного тока статорной обмотки "С" к номинальному току АД ( $k_{i,\text{уп}}$ ) в функции длительности пуска  $T_{\text{п}}$  при варьировании угла управления в диапазоне  $\alpha \in [80; 116]$  эл. град. На рис. 3б приведен график зависимости  $k_{i,\text{уп}}=f(T_{\text{п}})$ , построенной по данным физического эксперимента, и аппроксимированной экспоненциальной функцией вида:

$$k_{i,\text{уп}} = 6,8 \cdot \exp(-2,0 \cdot T_{\text{п}}) - 2,5 \cdot \exp(-0,06 \cdot T_{\text{п}}), \quad (2)$$

для которой нанесены границы 95% доверительного интервала.

Для полученной аппроксимации коэффициент корреляции равен  $R^2 \approx 0,991$ , сумма квадратов ошибок  $SSE \approx 0,25$ , что свидетельствует о достоверном описании экспоненциальной функцией (2) исследуемой зависимости  $k_{i,\text{уп}}=f(T_{\text{п}})$ .

Анализ графиков, приведенных на рис.3, позволяет сделать вывод об удов-

летворительном для сосредоточенной модели СИФУ-ТРН-АД совпадении результатов численного и физического экспериментов, в частности, при небольшой длительности переходного процесса (рис. 3б) относительная погрешность в определении максимального тока статорной обмотки АД приблизительно равна  $\delta I_{уп} \approx 8,2\%$ , далее при увеличении длительности пуска погрешность возрастает и при  $\alpha = 116$  эл. град. принимает максимальное значение  $\delta I_{уп} \approx 13,5\%$ .



Рис. 3. Зависимость  $k_{i,уп}$  от продолжительности пуска АД  $T_{п}$

#### Моделирование переходных процессов энергетической подсистемы при пуске АД насосной станции

Для рассмотрения условий протекания переходных процессов в электрической сети проведем моделирование энергетической системы, включающей в свой состав ЛЭП ( $U_n = 6,3$  кВ), силовой трансформатор ТМ-250/6-10 (номинальная мощность  $S_n = 250$  кВ·А) с параметрами схемы замещения, приведенными в [8], и три асинхронных двигателя типа 4АС250М4У3 (номинальная мощность  $P_n = 63$  кВт) с параметрами схемы замещения, приведенными в [9].

На рис. 4 приведен график изменения действующего линейного напряжения во вторичной обмотке силового трансформатора при последовательном пуске трех АД в моменты времени  $t_{max,1}$ ,  $t_{max,2}$  и  $t_{max,3}$  соответственно.

Из анализа графика, приведенного на рис. 4, можно заключить, что в установившемся режиме отклонение действующего напряжения от номинального в исследуемой сети не превосходит нормально допустимой величины ( $\pm 5\%$  по ГОСТ 13109-97) и по окончании пуска третьего

АД приблизительно равно  $\Delta U_i \approx 3\%$ . Однако, максимальное отклонение действующего напряжения в течение пуска третьего АД составляет  $\Delta U_{max} \approx 10,6\%$ , что превышает предельно допустимое отклонение на  $0,6\%$ .

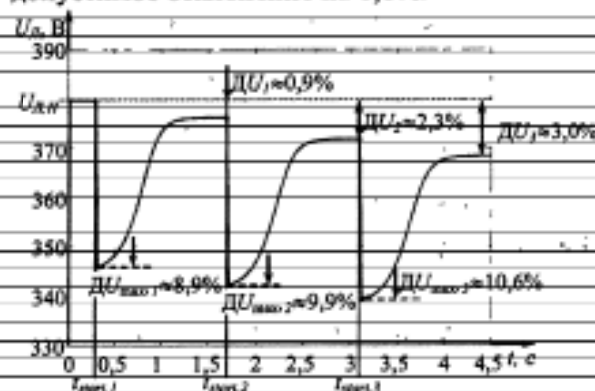


Рис. 4. График действующего линейного напряжения

Таким образом, приведенные на рис. 4 результаты моделирования энергетической подсистемы позволяют подчеркнуть необходимость ограничения переходного тока при пуске АД с использованием УПП. При этом полученная математическая модель энергетической подсистемы насосной станции позволяет рассчитать значение максимально допустимого тока, возникновение которого при пуске очередного двигателя не вызовет падение напряжения в сети ниже предельно допустимого значения.

#### Моделирование нестационарного нагрева обмоток АД

Требования ГОСТ 27895-88 «Машины электрические вращающиеся. Встроенная температурная защита...» устанавливают предельно допустимое среднее значение температуры статорных обмоток АД ( $\Theta_{max, доп}$ , °C) превышение которого должно вызывать срабатывание тепловой защиты в случае, если двигатель оснащен встроенными температурными датчиками.

Для вычисления максимальной температуры обмоток статора АД ( $\Theta_{max}$ , °C) при управляемом пуске в продолжение времени  $T_{п}$  предлагается использовать эквивалентную тепловую схему замещения АД, описываемую матричным уравнением вида [4]:

$$\frac{d\Theta}{dt} = C \cdot P - C^{-1} \cdot G \cdot \Theta, \quad (3)$$

где  $\Theta$  — вектор-столбец превышения температуры элементов тепловой схемы замещения АД над температурой окружающей среды;  $C$  — матрица теплоемкостей элементов схемы;  $P$  — вектор-столбец источников тепла;  $G$  — матрица теплопроводностей.

На рис. 5а приведены кривые нагрева лобо-

вой части обмотки статора АД 4А112М4У3, полученные посредством интегрирования системы уравнений (3). На рис. 5б приведены результаты экспериментального исследования (пунктирная кривая) и моделирования температурного поля АД 4А112М4У3 посредством использования метода конечных элементов (непрерывная кривая), полученные в [5].

Анализ графиков рис.5 позволяет сделать вывод об удовлетворительной сходимости результатов расчета с использованием системы (3) и результатов, полученных экспериментально. Незначительное отличие в скорости нарастания температуры (ср. рис. 5.а и 5.б) в продолжение переходного процесса компенсируется хорошим совпадением установившегося значения, приблизительно равного  $\theta_y \approx 120^\circ\text{C}$ .

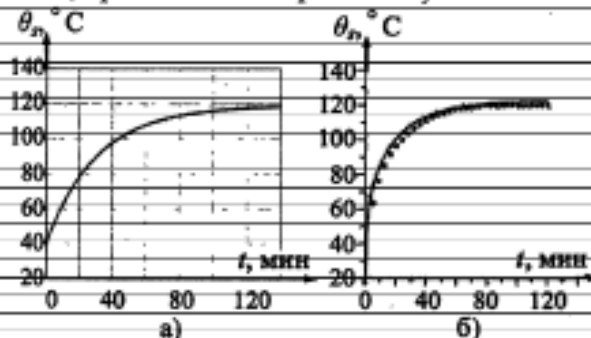


Рис. 5. Кривая нагрева лобовой части обмотки статора АД 4А112М4У3: а) результат интегрирования системы уравнений (3); б) результаты эксперимента (пунктирная линия) и расчета методом конечных элементов (непрерывная линия).

#### Заключение

В статье проанализирована структура и описаны составляющие энергетической подсистемы насосной станции.

Приведено сравнение результатов физического и численного экспериментальных исследований пуска АД с УПП. Наибольшая относительная погрешность в определении максимального тока статорной обмотки АД составила  $\delta I_{y\text{п}} \approx 13,5\%$ , что позволяет сделать вывод об адекватности используемой математической модели СИФУ-ТРН-АД, поскольку получить более точные результаты при использовании сосредоточенной модели АД в переходных режимах, как правило, не удается [1, 5].

Моделирование прямого последовательного пуска трех АД насосной станции позволило подчеркнуть необходимость ограничения переходного тока в статорных обмотках АД с помощью УПП, поскольку при пуске последнего двигателя максимальное отклонение действующего напряжения во вторичной обмотке

силового трансформатора составило 10,6%, что превышает предельно допустимое отклонение, устанавливаемое ГОСТ 13109-97.

Характер зависимости коэффициента кратности тока  $k_{I_{y\text{п}}}$  от времени пуска АД ( $T_{\text{п}}$ ) позволяет достоверно описать такую зависимость с помощью экспоненциальной функции вида (2). Расчет постоянных коэффициентов аппроксимирующей функции может быть выполнен по четырем точкам. Зависимость  $k_{I_{y\text{п}}} = f(T_{\text{п}})$  обладает некоторой грубостью в силу принятых при построении модели СИФУ-ТРН-АД допущений, однако качественный характер полученной аппроксимации позволяет использовать ее при разработке алгоритмов управления плавным пуском асинхронных двигателей с учетом ограничения, накладываемого на значение ударного пускового тока  $I_{y\text{п}}$ .

Значение температуры нагрева лобовой части статорных обмоток АД может быть с достаточной точностью получена с использованием тепловой схемы замещения АД, что подтверждается сравнением результатов численного моделирования с результатами экспериментальных исследований [5].

В следующей статье цикла будет приведена модель неустановившегося движения жидкости в трубопроводе, предназначенная для адекватного отражения условий возникновения и протекания гидравлического удара.

#### Список использованных источников

1. Копылов И.П. Электрические машины: учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 2002. 607 с.
2. 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.
3. Мелихов А.Ю. Математическое описание электромеханического преобразования энергии в пакете «Maxwell 10.0» // Матер. междунар. НТК «Информационные технологии в науке, образовании и производстве» ОрелГТУ. – Орел, 2006. – С. 126–130.
4. Беспалов В.Я., Мошинский Ю.А., Цуканов В.И. Упрощенная математическая модель нестационарного нагрева и охлаждения обмотки статора асинхронного двигателя // Электричество. – 2003. – № 4. – С. 20–26.
5. Mezani S., Takorabet N., Laporte B. A Combined Electromagnetic and Thermal Analysis of Induction Motors // IEEE Transactions on Magnetics. – 2005. – № 5. – Pp. 1572–1575.
6. Колоколов Ю.В., Мелихов А.Ю., Цуканов В.Г. Математическая модель асинхронного



двигателя при несимметричном подключении к сети// Матер. междунар. НТК «Информационные технологии в науке, образовании и производстве» Орел ТУ. – Орел, 2006. С. 106–110.

7. Мелихов А.Ю., Колоколов Ю.В., Мононская А.В. Гибридный алгоритм моделирования динамики импульсных систем преобразования энергии большой размерности. Часть 1. Разработка гибридного алгоритма// Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – №1. – С.

27–34.

8. Бабахаян И.С., Бейдер А.А., Вертебный В.И. и др. Справочник по проектированию электроснабжения. – М.: Энергия, 1980. 456 с.

9. Лихачев В.Л. Электродвигатели асинхронные. – М.: СОЛОН-Р, 2002. – 304 с.

Югорский государственный университет,  
г.Ханты-Мансийск

УДК 519.2

## КОЛЛЕКТИВ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИХ РЕГРЕССИЙ, ОСНОВАННЫЙ НА ТЕХНОЛОГИИ «РАЗМНОЖЕНИЯ» СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

А.В.Лапко, В.А.Лапко, П.А.Лебедев

*Исследуется коллектив непараметрических регрессий, синтез которого основан на технологии «размножения» статистических данных. Для обоснования эффективности предлагаемого подхода построения модели стохастической зависимости устанавливаются асимптотические свойства коллектива.*

### Введение

Большинство статистических методов обработки информации ориентировано на представительные обучающие выборки. Однако при решении прикладных задач часто располагают ограниченным объемом наблюдений – малой выборкой, что обуславливается нестационарностью объекта исследования, высокой стоимостью и сложностью получения дополнительной информации. Получаемые на их основе решающие правила не всегда обеспечивают приемлемые результаты, так как информация малых выборок недостаточна для эффективного оценивания вероятностных характеристик изучаемых закономерностей.

Для «обхода» проблем малых выборок широкое распространение получила технология обработки информации, основанная на бутстреп – методе. В данной работе на основе результатов аналитических исследований обосновывается эффективность его применения при синтезе непараметрической модели стохастической зависимости с использованием принципов коллективного оценивания.

Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ для ведущих научных школ НШ-3431.2008.9.

**Синтез коллектива непараметрических регрессий**

Пусть  $V = \{x^i, y^i, i = \overline{1, n}\}$  – выборка, состав-

ленная из  $n$  независимых наблюдений случайных величин  $x = (x_v, v = \overline{1, k})$  и  $y$ , распределенных с неизвестными плотностями вероятности  $p(x, y)$  и  $p(x) > 0$ .

Априори вид однозначной стохастической зависимости

$$y = \Phi(x_1, \dots, x_k) \quad (1)$$

не задан.

Сформируем на основе исходной выборки  $N$  групп наблюдений  $V_j = \{x^i, y^i, i \in I_j\}$ , где  $I_j$  – множество номеров элементов из  $V$ , составляющих  $j$ -ю группу. Количество элементов в группах одинаково и равно  $\bar{n} = n/n'$ . Каждая пара групп  $V_j, V_t, j, t = \overline{1, N}, j \neq t$  отличается  $n'$  элементами. Количество групп элементов  $N = n/n'$ . По каждой выборке  $V_j$  построим непараметрические регрессии [1]

$$\bar{\Phi}_j(x) = \frac{\sum_{i \in I_j} y^i \prod_{v=1}^k \Phi\left(\frac{x_v - x_v^i}{c_v(j)}\right)}{\sum_{i \in I_j} \prod_{v=1}^k \Phi\left(\frac{x_v - x_v^i}{c_v(j)}\right)}, \quad j = \overline{1, N}, \quad (2)$$

где  $\Phi(u)$  – ядерные функции, удовлетворяющие условиям Н [2]:

$$\begin{aligned} \Phi(u) &= \Phi(-u), \quad 0 \leq \Phi(u) < \infty, \\ \int \Phi(u) du &= 1, \quad \int u^m \Phi(u) du = 1, \\ \int u^m \Phi(u) du &< \infty, \quad 0 \leq m < \infty; \end{aligned}$$

$c_v(j), v = \overline{1, k}$  – коэффициенты размытости ядерных функций, значения которых убывают с ростом количества элементов  $\bar{n}$  множества  $I_j, j = \overline{1, N}$ . Здесь и далее бесконечные пределы интегрирования опускаются.

В качестве приближения  $y = \Phi(x)$  по стати-