

УДК 622.243.27

И. Ф. НУГАЕВ, Р. И. АЛИМБЕКОВ, В. И. ВАСИЛЬЕВ

АЛГОРИТМЫ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ И ПРОГНОЗА ТРАЕКТОРИИ В ПРОЦЕССЕ БУРЕНИЯ НАКЛОННО НАПРАВЛЕННЫХ И ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН

Рассматривается проблема построения системы автоматического управления траекторией движения бурового инструмента на основе применения современных технологий бурения и методов управления. Приводится математическая постановка задачи управления, модель движения бурового инструмента. Рассматривается трехуровневая структура системы управления, состоящая из проектного, следящего и программного уровней управления. Исследуются алгоритмы следящего управления, основанные на нечеткой логике, а также алгоритмы управления по прогнозируемой модели. Представлены результаты анализа эффективности алгоритмов следящего управления, полученные на основе математического моделирования. *Бурение наклонно направленных и горизонтальных скважин; нечеткое управление; управление по прогнозируемой модели; краткосрочный и долгосрочный прогноз*

ВВЕДЕНИЕ

Проблема управления траекторией нефтяных скважин является одной из наиболее актуальных в современном нефтяном бурении. Качество решения данной задачи определяет такие важнейшие показатели, как точность вскрытия продуктивного пласта, затраты на строительство скважины [1, 2]. Применение эффективной автоматизированной системы управления может снизить сроки бурения в 1,5–2 раза и соответственно на 25–30% снизить затраты на проводку скважины, повысить точность попадания скважины в заданную область продуктивного пласта и, как следствие, на 20–30% повысить нефтеотдачу.

Перспективным направлением решения данной задачи является применение компьютеризированных технологий управления в процессе бурения нефтяной скважины [3, 4]. Эффективное применение современных информационных технологий в данной области основано на использовании новых поколений измерительных систем и исполнительных механизмов, к которым относятся:

- телеметрические MWD системы (Measurement While Drilling), обеспечивающие точное определение формы траектории скважины в процессе бурения;

- телеуправляемые исполнительные механизмы, обеспечивающие оперативную кор-

рекцию траектории движения бурового инструмента в процессе бурения.

Современные подходы к автоматизации управления траекторией скважины связаны в основном с разработкой измерительных систем, основанных на преобразовании данных инклинометрических измерений, также создании нового класса исполнительных механизмов — телеуправляемых отклонителей. Нерешенной остается проблема автоматизации выработки эффективных управляющих решений. Применяемые сегодня методы принятия решений в процессе бурения основываются на упрощенных моделях процесса бурения, опыте и интуиции буровика-технолога и не рассчитаны на интенсивное применение вычислительной техники.

Основными функциями нового поколения автоматизированных систем управления траекторией скважины (АСУ ТС) являются следующие:

- информационное обеспечение — определение текущих координат бурового инструмента, фильтрация шумов измерения, компенсация ошибок измерительных систем;

- принятие управляющих решений — автоматизированная поддержка действий оператора на основе систем автоматического управления реального времени;

- осуществление управления — автоматизированное, оперативное изменение парамет-

ров бурового инструмента в соответствии с принятым управляющим решением.

Данная статья посвящена решению одного из важнейших аспектов проблемы автоматизации управления траекторией скважины — выработке управляющих решений АСУ ТС, основанных на использовании математической модели движения бурового инструмента, опыта буровиков и современных методов теории управления. Предлагаемые ниже подходы основаны на результатах многолетних исследований, проводимых в УГАТУ совместно с НИИ Технических систем «Пилот».

1. ОБЩАЯ ПРОБЛЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ТРАЕКТОРИЕЙ СКВАЖИНЫ

1.1. Постановка задачи

Целью управления траекторией движения бурового инструмента является обеспечение следующих требований:

- достижение требуемой области для вскрытия продуктивного пласта (терминальная задача);
- обеспечение ограничений на форму траектории скважины (интегральная задача);
- информирование оператора о текущем состоянии траектории и критических ситуациях (задача контроля).

1.2. Параметры траектории скважины

Для описания траектории скважины могут использоваться системы координат:

1) сферическая система координат (эти координаты непосредственно измеряются в процессе бурения):

- зенитный угол θ — угол между вертикалью и касательной к траектории в рассматриваемой точке;

- азимутальный угол α — угол между горизонтальной проекцией касательной к траектории скважины в рассматриваемой точке и направлением на географический Север;

2) прямоугольная система координат (координаты рассчитываются косвенно на основе сферических координат):

- ось X — направлена в сторону географического Севера;
- ось Y — направлена в сторону географического Востока;
- ось Z — направлена вертикально вниз.

Траектория скважины представляется в параметрической форме в виде следующих функций: $\theta = \theta(l)$; $\alpha = \alpha(l)$; $x = x(l)$; $y = y(l)$; $z = z(l)$, где l — длина траектории.

1.3. Объект управления

Объектом управления является компоновка низа буровой колонны (КНБК), включающая в себя следующие компоненты:

- отклонитель КНБК;
- буровой двигатель (турбинный или электрический)
- долото;
- утяжеленные буровые трубы;
- калибрующие и стабилизирующие устройства.

Для обеспечения полной управляемости движения КНБК будем рассматривать двухрежимный роторно-турбинный принцип бурения.



Рис. 1

Турбинный режим бурения характеризуется вращением долота посредством бурового двигателя. Применяется при формировании искривленных участков траектории скважины (рис. 1, а).

Роторный режим бурения характеризуется вращением всей КНБК посредством вращения колонны буровых труб специальным приводом на поверхности. Этот принцип применяется для формирования прямой или слабо искривленной траектории скважины (рис. 1, б).

Управляющими воздействиями при турбинном режиме бурения являются следующие:

φ — угол установки отклонителя, т. е. угол между плоскостью действия КНБК (апсидальной плоскостью) и вертикальной плоскостью, проходящей через касательную к траектории скважины в точке забоя, которая определяет направление развития траектории. Устанавливается путем поворота колонны буровых труб с поверхности;

γ — угол перекоса отклонителя, определяет интенсивность искривления траектории скважины; устанавливается путем смены отклонителя при подъеме КНБК на поверхность либо автоматически сигналом с поверхности (телеуправляемый отклонитель).

В режиме роторного бурения эффективных управляющих воздействий, обеспечивающих непрерывное управление траекторией скважины, в настоящее время нет. Таким образом, ошибки управления, возникающие при роторном бурении соответствующих участков, компенсируются путем переключения на турбинный режим.

1.4. Структура многоуровневой системы управления

Как показали исследования, для достижения сформированной выше цели управления необходима трехуровневая организация АСУ ТС, включающая в себя [5]:

Проектный уровень управления. Задача данного уровня — формирование проектной траектории скважины и проектной программы управления на основе технологических, геологических и экономических ограничений.

Следящий уровень управления. Задача уровня — компенсация отклонений от проектной траектории в процессе бурения в условиях действия случайных возмущающих воздействий.

Программный уровень управления обеспечивает контроль достижимости цели в процессе бурения и соответствующую коррекцию проектной траектории.

2. АЛГОРИТМЫ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

2.1. Проектный уровень

Проектная траектория формируется на основе множества требований и ограничений, обеспечивающих возможность ее строительства и эксплуатации с минимальными затратами. Существуют эффективные методики формирования типовых проектных траекторий [6], которые в данной работе не рассматриваются. Проектная траектория в дальнейшем рассматривается как заданная цель управления.

2.2. Следящий уровень

Целью следящего уровня управления является непрерывная компенсация отклонений фактической траектории скважины от

проектной. Каждая точка проектной траектории характеризуется пятью фазовыми координатами $(\alpha, \theta, x, y, z)$. Таким образом, идеальная система управления должна иметь пять соответствующих управляющих воздействий. Однако современные технологии бурения обеспечивают непрерывное изменение только одного управляющего воздействия — угла установки отклонителя (φ) . Для решения данного противоречия предлагается применение принципа редукции числа управляемых координат. В качестве управляемых координат при этом предлагается использовать азимутальный и зенитный углы, слежение за которыми обеспечивает параллельность фактической траектории проектной. При достаточном быстродействии управления данный подход обеспечивает допустимый уровень пространственного отклонения фактической траектории от проектной, т.е. решение сформулированной выше терминальной и интегральной задач управления.

Предлагаемая структура следящей системы управления представлена на рис. 2, где α_r, θ_r — проектные значения азимутального и зенитного углов.



Рис. 2

Математическая модель движения бурового инструмента может быть представлена в виде следующей системы уравнений [6]:

$$\begin{aligned} d\theta/dl &= k \cos \varphi, & dx/dl &= \sin \theta \cos \alpha, \\ d\alpha/dl &= k \sin \varphi / \sin \theta, & dy/dl &= \sin \theta \sin \alpha, \\ d\varphi/dl &= -k \sin \varphi / \operatorname{tg} \theta, & dz/dl &= \cos \theta, \end{aligned} \quad (1)$$

где k — интенсивность искривления траектории.

Эффективное применение классической теории автоматического регулирования в данном случае невозможно в связи с тем, что число управляющих воздействий (φ) меньше числа управляемых координат (α, θ) и математическая модель (1) имеет существенно нелинейный характер.

Выходом из создавшегося положения является применение нелинейного алгоритма

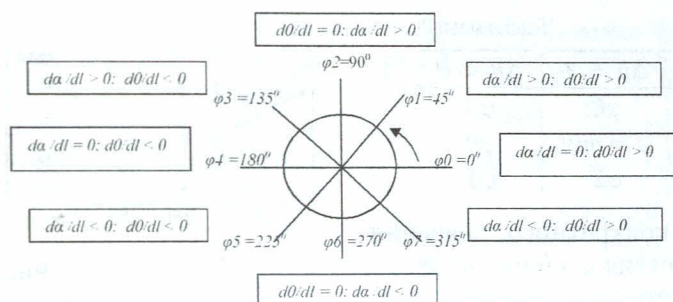


Рис. 3

управления, основанного на множестве решающих правил, обеспечивающих одновременное снижение отклонений азимутально-го и зенитного углов [5]. Эти правила могут быть построены на основе анализа влияния управляющего воздействия (φ) на знаки производных управляемых координат ($d\varphi/dl, d\theta/dl$). Полученная зависимость представлена на рис.3. Область значений φ содержит четыре значения ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$), в которых производные одной из управляемых координат равны нулю, и четыре зоны — $[0^\circ; 90^\circ], [90^\circ; 180^\circ], [180^\circ; 270^\circ], [270^\circ; 360^\circ]$, в пределах которых знаки этих производных не изменяются.

На основе данной зависимости можно сформулировать решающие правила для выбора значения φ (табл. 1), обеспечивающего снижение ошибки управления по координатам α и θ .

Таблица 1

	$\Delta\theta < 0$	$\Delta\theta = 0$	$\Delta\theta > 0$
$\Delta\alpha < 0$	$180 < \varphi < 270$	$\varphi = 270$	$270 < \varphi < 360$
$\Delta\alpha = 0$	$\varphi = 180$	$\varphi = \text{null}$	$\varphi = 0$
$\Delta\alpha > 0$	$90 < \varphi < 180$	$\varphi < 90$	$90 < \varphi < 0$

В таблице приняты обозначения: $\Delta\alpha = \alpha_r - \alpha$; $\Delta\theta = \theta_r - \theta$; $\varphi = \text{null}$ означает прямолинейное движение ($d\alpha/dt = 0; d\theta/dt = 0$), т.е. переход на роторный режим бурения.

Применение правил в представленном виде затрудняется из-за наличия интервальных решений ($\varphi_1 < \varphi < \varphi_2$), которые вносят неопределенность в выбор значения φ . Для вычисления определенных значений управляющего воздействия φ в рамках каждого из интервалов можно применить нечеткую логику. Структура нечеткого регулятора представлена на рис. 4.

Здесь фаззификатор осуществляет переход от численных значений $\Delta\alpha, \Delta\theta$ к значениям лингвистических переменных (термам).



Рис. 4

Ниже применяются следующие значения лингвистических переменных: Z — Zero; N — Negative; P — Positive. Множество значений управляющего воздействия задано в виде дискретных отсчетов (single tons) $\varphi_0 \dots \varphi_7$.

Соответствующие графики функций принадлежности для $\Delta\alpha, \Delta\theta$ и φ представлены на рис. 5, где величина Δ принимается равной 1° .

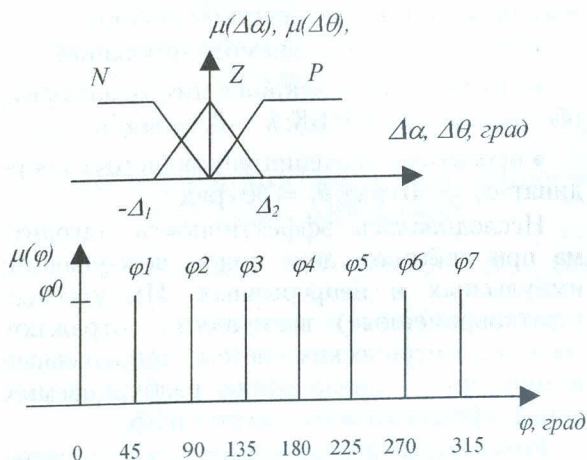


Рис. 5

Расчет значения управляющего воздействия φ производится в блоке механизма вывода на основе правил, представленных в табл. 2.

Данная таблица содержит 9 правил, сопоставляющих каждой паре значений лингвистических переменных ($\Delta\alpha, \Delta\theta$) соответствующее значение φ_i . Например: если $\Delta\alpha = N$ и $\Delta\theta = N$, то $\varphi = \varphi_5$, и т.д.

Таблица 2

	$\Delta\theta = N$	$\Delta\theta = Z$	$\Delta\theta = P$
$\Delta\alpha = N$	$\varphi 5$	$\varphi 6$	$\varphi 3$
$\Delta\alpha = Z$	$\varphi 4$	$\varphi = \text{null}$	$\varphi 0$
$\Delta\alpha = P$	$\varphi 7$	$\varphi 2$	$\varphi 1$

Для вычисления конкретного значения управляющего воздействия φ (блок дефазфикации) применен метод «центра тяжести», представленный формулой

$$\varphi = \left(\sum_1^n \mu_i \varphi_i \right) / \sum_1^n \mu_i, \quad (2)$$

где φ_i — центральное значение (прототип) i -го нечеткого множества (см. рис. 5); μ_i — минимальное значение функции принадлежности управляемой координаты ($\Delta\alpha$, или $\Delta\theta$), вызвавшей управление φ_i .

2.3. Исследование

эффективности алгоритмов управления на основе математического моделирования

Для исследования эффективности предложенного способа управления проведено математическое моделирование процесса управления траекторией скважины. В качестве объекта управления рассматривалась нелинейная модель движения КНБК (1), управляющее воздействие вычислялось на основе описанного выше алгоритма нечеткой логики.

Исходные данные для моделирования:

- интенсивность искривления траектории, обеспечиваемая КНБК: $k = 0,1$ град/м;
- проектные значения управляемых координат: $\alpha_r = 40$ град; $\theta_r = 30$ град.

Исследовалась эффективность алгоритма при действии двух видов возмущений: импульсных и непрерывных. Импульсные (кратковременные) возмущения отражают сбои телеметрических систем, непрерывные возмущения — анизотропию разбурываемых пород, эффект «наката» долота и др.

Результаты исследований представлены ниже для двух следующих ситуаций:

1) импульсные возмущения:

- на длине траектории $l = 0$ м (начальный участок бурения): $\alpha = \alpha_r + 15$ град; $\theta = \theta_r + 15$ град;
- на длине траектории $l = 300$ м: $\alpha = \alpha_r - 15$ град; $\theta = \theta_r - 15$ град.

На рис. 6 представлено поведение управляемых координат $\alpha(l)$, $\theta(l)$ и управляющего воздействия $\varphi(l)$ в условиях действия указанных импульсных возмущений.

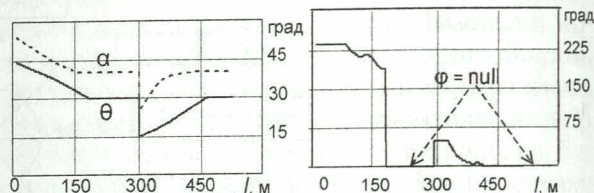


Рис. 6

Результаты моделирования показывают, что алгоритм управления обеспечивает компенсацию импульсных возмущений различных знаков уже через (100–150) м.

2) Непрерывные возмущающие воздействия:

$$\alpha(l) = \alpha_R + 0,001 \int_{L_0}^{L_k} dl,$$

$$\theta(l) = \theta_R + 0,01 \int_{L_f}^{L_k} dl.$$

На рис. 7 представлено поведение управляемых координат $\alpha(l)$, $\theta(l)$ и управляющего воздействия $\varphi(l)$ в условиях действия данного возмущения, где $\alpha 1$, $\theta 1$ — управляемый процесс; $\alpha 2$, $\theta 2$ — неуправляемый процесс.

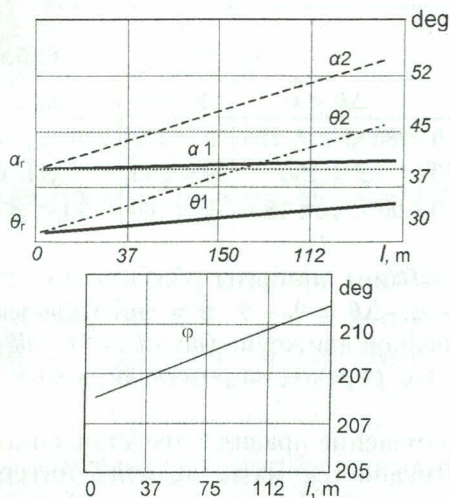


Рис. 7

Как видно из рис. 7, имеет место существенное повышение точности управления. Таким образом, результаты моделирования показали работоспособность предложенного алгоритма управления на основе нечеткой логики. В то же время очевидна зависимость

точности управления от возможностей бурового инструмента обеспечивать достаточно высокую интенсивность искривления траектории. При невысоких интенсивностях искривления и значительных возмущениях возможно накопление ошибки управления по прямоугольным координатам, что может привести к необходимости коррекции (пересмотра) проектной траектории на программном уровне управления АСУ ТС.

2.4. Программный уровень управления

Целью данного уровня управления является определение достижимости заданной конечной области траектории на основе прогноза и соответствующая коррекция проектной программы управления.

3. АЛГОРИТМЫ ПРОГНОЗА ТРАЕКТОРИИ СКВАЖИНЫ

Анализ возможных подходов к решению данной задачи показал целесообразность применения 2-этапной процедуры (рис. 8):

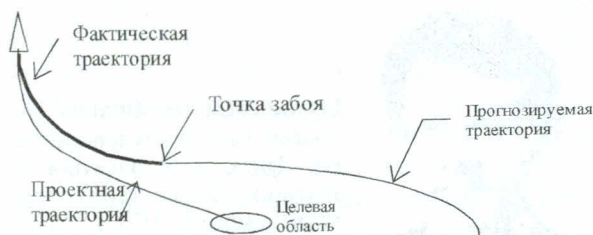


Рис. 8

- **краткосрочный прогноз** — основан на регрессионном анализе пробуренной траектории скважины. Достаточная точность прогноза в данном случае обеспечивается на интервале не более 100 м, при отсутствии замены КНБК;

- **долгосрочный прогноз** — основан на применении кинематической математической модели движения КНБК с учетом особенностей разбуриваемой породы. Достаточная точность прогноза в данном случае обеспечивается на интервале до 1000 м.

3.1. Краткосрочный прогноз

В качестве базовых функций при прогнозе использовались функции:

1) Сферическая система координат.

Прогнозируемые функции: $\alpha = f_1(l, \theta)$; $\theta = f_2(l)$.

Прогнозируемые функции представляются в форме следующих полиномов:

$$\begin{aligned} \theta(l) &= a_0 + a_1 l + \dots + a_p l^{P_0}; \\ \alpha(l, \theta) &= b_0 + b_1 l + \dots + b_{p1} l^{P_1} + \\ &+ b_{p1+1} \theta + \dots + b_{p1+p2} \theta^{P_2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Параметры прогнозируемых функций идентифицируются на основе процедуры регрессионного анализа и включают в себя:

- порядки рассмотренных выше полиномов;
- коэффициенты полиномов.

Точность идентификации указанных параметров характеризуется интегральным показателем

$$J = \sqrt{\frac{1}{n2} \sum_{i=1}^{i=n2} (x1_i - x2_i)^2}, \quad (4)$$

где $x1_i, x2_i$ — соответственно фактические и прогнозируемые координаты на регрессионном интервале; $n2$ — количество измеренных точек на регрессионном интервале.

Прямоугольная система координат. Координаты рассчитываются на основе полученных сферических координат с использованием зависимостей (1).

3.2. Долгосрочный прогноз

Прогнозируемые функции являются решением дифференциальных уравнений

$$d\theta/dl = k \cos \varphi; \quad d\alpha/dl = k \sin \varphi / \sin \theta. \quad (5)$$

Параметры модели (5) идентифицируются на основе следующих соотношений:

$$k = f(\alpha', \theta'); \quad \varphi = \arccos(k/\theta'), \quad (6)$$

где α', θ' — производные α и θ по длине траектории.

3.3. Алгоритм управления по прогнозируемой модели

Алгоритм данного (программного) уровня управления основан на принципах управления по прогнозируемой модели [7].

Обобщенный алгоритм управления включает в себя следующие этапы:

- прогноз траектории вектора переменных состояния скважины $X(l) = (\theta(l), \alpha(l), x(l), y(l), z(l))$;

- если прогнозируемая траектория $X(l) \in G$, где G — допустимая область расположения скважины, то бурение продолжается в

соответствии с текущей программой управления;

• если $X(l) \notin G$, то производится коррекция программы управления и проектной траектории.

Коррекция программы управления основана на использовании методов оптимального (терминального) управления [5]. Оптимальная программа управления траекторией при этом определяется из условия минимизации обобщенного критерия $J = J_1 + J_2$ с учетом ограничений $X(l) \in G$, где J_1 — интегральный критерий, определяющий интегральное отклонение скорректированной траектории от проектной, J_2 — терминальный критерий, характеризующий отклонение конечной точки траектории от заданной проектной точки вскрытия продуктивного пласта. Математическая модель движения бурового инструмента определяется уравнением (1).

Как показывают результаты моделирования, применение предложенного подхода, основанного на трехуровневом управлении, повышает точность вскрытия продуктивного пласта на 50–70%.

ВЫВОДЫ

В работе представлен подход к формированию алгоритмического обеспечения нового поколения компьютеризированных систем управления траекторией нефтяных скважин, основанной на применении современных технологий бурения. Представлена структура трехуровневой системы управления траекторией скважин, основанной на комбинированном применении нечеткой логики, оптимального управления и регрессионного анализа. Приведенные результаты математического моделирования показывают эффективность использования нечеткой логики при управлении сложным объектом при ограниченном числе управляющих воздействий. В перспективе предполагается разработка алгоритмов автоматического управления траекторией с применением бурового инструмента с управляемой интенсивностью искривления траектории движения, что позволит дополнительно повысить эффективность управления траекторией скважины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калинин А. Г., Григорян Н. А., Султанов Б. З. Бурение наклонных скважин. М.: Недра, 1999. 348 с.
2. Anderson R. A. Oil production in the 21st century // Scientific American. 1998. March. P. 68–73.
3. Алимбеков Р. И., Васильев В. И., Нугаев И. Ф. и др. Компьютеризированные технологии управления бурением наклонно направленных скважин // Нефтяное хозяйство. 2000. № 12. С. 120–122.
4. Nugaev I. F., Vasilyev V. I., Alimbekov R. I., Shulakov A. S. Computerized technology of control and decision support for oil well-directed drilling. // Proc. of 4th Int. Conf. on Computer Science and Information Technologies (CSIT'02). Greece, 2002. P. 104–110.
5. Vasilyev V. I., Nugaev I. F., Agzamov Z. V. Automatic control with prediction for autonomous robot-drill // Proc. of Int. Conf. on Intelligent Autonomous Systems. Germany, Karlsruhe: IOS Press, 1995. P. 461–464.
6. Сушон Л. Я., Емельянов П. В., Муллагалиев Р. Т. Управление искривлением наклонных скважин в Западной Сибири. М.: Недра, 1988. 124 с.
7. Rawlings J. B. Tutorial overview of model predictive control // Control Systems Magazine. 2000. June. P. 38–51.

ОБ АВТОРАХ



Нугаев Ильдар Фидаилевич, доцент каф. пром. электроники. Дипл. инж. электронной техники (УАИ, 1985). Канд. техн. наук по АСУ (УГАТУ, 1995). Иссл. в обл. интеллектуальн. автоматич. упр-я сложными системами.



Алимбеков Роберт Ибрагимович, доц., дир. НИИ техн. систем «Пилот». Дипл. инж.-электромех. (УАИ, 1971). Канд. техн. наук по элементам и устройствам систем управления (УАИ, 1977). Иссл. в обл. телеметрич. систем, систем управления.



Васильев Владимир Иванович, проф., зав. каф. выч. техники и защиты информации. Дипл. инж. по промэлектронике (УГАТУ, 1970). Д-р техн. наук по системн. анализу и автоматич. управлению (ЦИАМ, 1990). Исследования в области многосвязных, многофункциональных и интеллектуальных систем.