

# МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 1 (118)

январь

2011

**Редакционный совет:**

КУЗНЕЦОВ Н. А.  
МАКАРОВ И. М.  
МАТВЕЕНКО А. М.  
ПЕШЕХОНОВ В. Г.  
СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М.  
ФЕДОРОВ И. Б.

**Главный редактор:**

ТЕРЯЕВ Е. Д.

**Заместители гл. редактора:**

ПОДУРАЕВ Ю. В.  
ПУТОВ В. В.  
ЮЩЕНКО А. С.

**Выпускающий редактор:**

ФИЛИМОНОВ Н. Б.

**Ответственный секретарь:**

ПЕТРИН К. В.

**Редакционная коллегия:**

АЛЕКСАНДРОВ В. В.  
АНТОНОВ Б. И.  
АРШАНСКИЙ М. М.  
БОГАЧЕВ Ю. П.  
БУКОВ В. Н.  
ВОСТРИКОВ А. С.  
ГРАДЕЦКИЙ В. Г.  
ГОЛУБЯТНИКОВ И. В.  
ИВЧЕНКО В. Д.  
ИЛЬЯСОВ Б. Г.  
КАЛЯЕВ И. А.  
КОЛОСОВ О. С.  
КОРОСТЕЛЕВ В. Ф.  
КРАСНЕВСКИЙ Л. Г.  
КУЗЬМИН Н. Н.  
ЛЕБЕДЕВ Г. Н.  
ЛЕОНОВ Г. А.  
ЛЁВИН Б. А.  
ЛОХИН В. М.  
НОРЕНКОВ И. П.  
ПАВЛОВСКИЙ В. Е.  
РАПОПОРТ Э. Я.  
РАЧКОВ М. Ю.  
РЕЗЧИКОВ А. Ф.  
СЕБРЯКОВ Г. Г.  
СИГОВ А. С.  
СИРОТКИН О. С.  
СОЙФЕР В. А.  
ТИМОФЕЕВ А. В.  
ФИЛАРЕТОВ В. Ф.  
ФУРСОВ В. А.  
ХИМЕНКО В. И.  
ЮРЕВИЧ Е. И.  
ЮСУПОВ Р. М.

**Редакция:**

БЕЗМЕНОВА М. Ю.  
ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.  
ЧУГУНОВА А. В.

## СОДЕРЖАНИЕ

### МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Пшихопов В. Х., Медведев М. Ю.** Блочный синтез робастных автоматических систем при ограничениях на управления и координаты состояния . . . . . 2  
**Ким Д. П.** Алгебраический метод синтеза линейных непрерывных систем управления . . . . . 9

### ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

- Иванов А. С., Лапковский Р. Ю., Уков Д. А., Филимонюк Л. Ю.** Кибернетический подход к моделированию разнородных процессов в мехатронных системах . . . . . 16  
**Крыжановский Г. А., Солодухин В. А.** Интеллектуальные транспортные системы и обратные задачи оптимизации . . . . . 21  
**Петухов И. В.** К вопросу обеспечения надежности эргатических систем управления . . . . . 25

### ОЦЕНКА И ПРОГНОЗ В ЗАДАЧАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Мелёшин И. С.** Оценка основного сопротивления поезда метрополитена на основе фильтра Калмана . . . . . 31  
**Новик А. Ю., Иващенко В. А.** Модели и методы прогнозирования показателей качества листового стекла . . . . . 37

### МЕХАТРОННЫЕ ОБУЧАЮЩИЕ И ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ СИСТЕМЫ

- Фрадков А. Л., Андриевский Б. Р., Бойков К. Б., Андриевский А. Б.** Многомятниковый мехатронный комплекс . . . . . 41

### Журнал в журнале

### "УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА В АВИАКОСМИЧЕСКИХ И МОРСКИХ СИСТЕМАХ"

- Солдаткин В. В.** Концепция построения и синтез конструктивных параметров неподвижного многоканального аэрометрического приемника системы воздушных сигналов вертолета . . . . . 56  
**Алексеев К. Б., Шадян А. В.** Об одном способе определения динамических параметров космического летательного аппарата в полете . . . . . 64  
**Челноков Ю. Н., Панкратов И. А.** Переориентация круговой орбиты космического аппарата с тремя точками переключения управления . . . . . 70  
**Басыров А. Г., Лебедев Д. М., Мاستин А. Б.** Планирование параллельной обработки информации в высокопроизводительных вычислительных системах бортовых комплексов управления космическими аппаратами . . . . . 74  
**Contents** . . . . . 79

*Журнал входит в Перечень периодических изданий, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук; журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования*

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу:  
<http://novtex.ru/mech>, e-mail: [mec@novtex.ru](mailto:mec@novtex.ru)

# ОЦЕНКА И ПРОГНОЗ В ЗАДАЧАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 681.5

**И. С. Мелёшин**, ассистент,  
Московский институт инженеров транспорта  
ivanmel@mail.ru

## Оценка основного сопротивления поезда метрополитена на основе фильтра Калмана

*Представлен способ идентификации параметров основного сопротивления движению поезда с использованием фильтра Калмана, результаты которого могут использоваться в тяговом расчете и системах автоведения.*

**Ключевые слова:** метрополитен, модель движения поезда, сопротивление движению, нелинейная фильтрация, фильтр Калмана, сигма-точечный фильтр Калмана

Внедрение систем автоматизированного управления движением поезда метрополитена позволяет повысить точность выполнения заданного расписания движения, уменьшить энергозатраты на тягу, улучшить условия труда локомотивных бригад. Автоматический выбор режимов управления поездом, позволяющий с фиксированной точностью соблюдать заданное время хода и минимизировать расход электроэнергии на тягу с учетом ограничений на все фазовые переменные, относится к классу изопериметрических задач вариационного исчисления. Решение этих задач выполняется методом динамического программирования и его разновидностями, методом случайного поиска, а также с использованием принципа максимума Понтрягина в формулировке Милютина и Дубовицкого [1]. Получение результата, соответствующего реальным условиям движения, непосредственно связано с точным моделированием движения поезда. Как показали многочисленные исследования и опыт внедрения автоматизированных систем управления, основные погрешности возникают при моделировании (как на борту, так и в стационарных условиях) движения поезда по инерции — в режиме выбега. Это связано с погрешностью определения основного сопротивления движению поезда в этом режиме. В данной статье приведена методика определения основного сопротивления движению поезда метрополитена с помощью фильтра Калмана.

## Особенности модели сопротивления движению поезда

Для точного расчета необходима адекватная модель движения поезда, которая описывается дифференциальным уравнением [1]

$$\dot{V} = \xi(f - w_0 - w_d - b_T), \quad (1)$$

где  $V$  — мгновенная текущая скорость поезда;  $\dot{V}$  — производная скорости по времени;  $\xi$  — коэффициент, учитывающий размерность величин и инерцию вращающихся масс поезда;  $f$  — удельная сила тяги;  $w_0$  — удельная сила основного сопротивления движению поезда;  $w_d$  — удельная сила дополнительного сопротивления движению поезда;  $b_T$  — удельная сила торможения.

Силу основного сопротивления можно представить как функцию скорости в форме полинома второй степени:

$$w_0 = a + bV + cV^2, \quad (2)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  — коэффициенты основного сопротивления.

Коэффициенты полинома (2) зависят от внешней среды и самого поезда. Обычно параметры основного сопротивления определяются на основе правил тягового расчета [2] или в результате опытных поездок при определенных условиях. На практике данные параметры являются уникальными для каждого подвижного состава и перегона [2, 3] и со временем могут изменяться. Более точная оценка параметров основного сопротивления возможна на основе экспериментальных данных. Для систем автоведения желательнее, чтобы оценка происходила в процессе движения поезда. Эта задача может быть решена на основе текущих измерений скорости через обратное решение уравнения движения. Следует также отметить, что поскольку сила основного сопротивления при разгоне и торможении много меньше сил тяги и торможения, то для повышения точности  $w_0$  следует рассчитывать на выбеге. Определение основного сопротивления движению при заданной модели поезда и измеренных значениях скорости является так называемой обратной задачей, решение которой при наличии шумов сталкивается с известными трудностями [4, 5].

Фильтрация шумов может быть осуществлена с помощью метода наименьших квадратов [6]. Повышение точности оценки возможно с использованием фильтра Калмана [7, 8], который позволяет учитывать шумы измерений. В связи с тем, что объект описывается нелинейным уравнением (2), для оценки параметров необходимо использовать модифицированные для нелинейных систем фильтры. В данной статье рассмотрен способ оценки параметров основного сопротивления с помощью расширенного (ЕФК) и сигма-точечного (УФК) фильтров Калмана [8].

### Алгоритм рекуррентной оценки коэффициентов основного сопротивления движению поезда

Рассмотрим *расширенный фильтр Калмана*. Для получения оценок вектора состояния по серии зашумленных измерений необходимо представить модель динамики системы и измерения для каждого такта работы фильтра.

Нелинейная модель динамики системы позволяет определить вектор состояний системы в момент  $k$  при известном состоянии в момент  $(k - 1)$  в соответствии с уравнением [9]

$$x_k = f_{k-1}(x_{k-1}) + w_{k-1}, \quad (3)$$

где  $k$  — номер отсчета;  $x_k$  — вектор текущего состояния системы;  $x_{k-1}$  — вектор состояния, полученный в предыдущий момент времени;  $f_{k-1}$  — вектор-функция, определяемая нелинейным уравнением системы;  $w_{k-1}$  — шум системы, заданный гауссовским законом распределения с нулевым математическим ожиданием и СКО  $Q_{k-1}$ .

В результате работы фильтра происходит оценка вектора состояния  $x$ , который включает в себя коэффициенты основного сопротивления и в решаемой задаче был определен следующим образом:

$$x = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T, \quad (4)$$

где  $x_1 = V$  — скорость подвижного состава;  $x_2 = a + w_d$ ;  $x_3 = b$ ;  $x_4 = c$ , причем  $a$ ,  $b$  и  $c$  — коэффициенты основного сопротивления;  $w_d$  — дополнительное сопротивление движению поезда.

В момент  $k$  проводится измерение  $z_k$  истинного вектора состояния  $x_k$ :

$$z_k = h_k(x_k) + v_k, \quad (5)$$

где  $z_k$  — результат измерения в момент  $k$ ;  $h_k$  — вектор-функция, определяемая нелинейной моделью измерения;  $v_k$  — шум измерения, заданный гауссовским законом распределения с нулевым математическим ожиданием и СКО  $R_k$ .

Весь процесс оценки разбивается на два этапа — прогноза и коррекции оценки. На этапе предсказания для экстраполяции состояния системы для момента времени  $k$  используется модель динамики системы и оценка состояния на предыдущем  $k - 1$  такте работы:

$$\hat{x}_k^- = f_{k-1}(\hat{x}_{k-1}^+), \quad (6)$$

где  $-$  и  $+$  — здесь и далее в тексте априорная и апостериорная оценки соответственно.

В соответствии с (1) скорость поезда, движущегося в режиме выбега, в момент  $k$  будет определяться следующим образом:

$$V_k = V_{k-1} + \dot{V}\xi\Delta T = V_{k-1} - (w_0 + w_d)\xi\Delta T, \quad (7)$$

где  $T$  — шаг временной дискретизации.

Тогда вектор-функция  $f$  имеет следующий вид:

$$f = \begin{bmatrix} x_1 - (x_2 + x_3x_1 + x_4x_1^2)\xi\Delta T \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Используя модель измерения (5) и априорную оценку вектора состояния (6), вычисляем оценку ожидаемого измерения:

$$\hat{z}_k = h_k(\hat{x}_k^-). \quad (9)$$

Результатом измерения  $z_k$  является скорость, первый элемент вектора состояния  $x$ . Тогда модель измерения будет определена как

$$h = x_1. \quad (10)$$

После получения очередного измерения наступает этап коррекции, для работы которого необходимы оценка состояния систем и оценка погрешности определения этого состояния. Коррекция оценки вектора состояния описывается уравнением

$$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + \bar{K}_k(z_k - \hat{z}_k), \quad (11)$$

где  $\hat{x}_k^+$  — апостериорная оценка состояния системы для текущего отсчета;  $\bar{K}_k$  — оптимальная по Калману матрица коэффициентов усиления.

Матрица коэффициентов усиления определяется следующим образом:

$$\bar{K}_k = P_k^- H_k^T [H_k P_k^- H_k^T + R_k]^{-1}, \quad (12)$$

где  $P_k^-$  — априорная оценка ковариационной матрицы оценки вектора состояния;  $H_k$  — матрица Якоби.

Как видно из уравнения (12), для нахождения матрицы коэффициентов усиления необходима ковариационная матрица, которая является оценкой погрешности определения состояния. Данная матрица определяет точность полученной оценки вектора состояния и включает в себя оценку дисперсий погрешности вычисленного состояния и ковариаций между параметрами состояния системы. Вычисление матрицы ковариаций происходит перед моментом вычисления матрицы коэффициентов усиления по формуле

$$P_k^- = \Phi_{k-1} P_{k-1}^+ \Phi_{k-1}^T + Q_{k-1}, \quad (13)$$

где  $\Phi_{k-1}$  — матрица Якоби (линеаризация уравнения состояния системы);  $P_{k-1}^+$  — апостериорная оценка ковариационной матрицы оценки вектора состояния на предыдущем такте.

Матрица  $\Phi$  представляет собой матрицу частных производных нелинейного уравнения динамики системы по вектору состояния:

$$\Phi = \left. \frac{\delta f}{\delta x} \right|_{x = \hat{x}^-} = \begin{vmatrix} 1 - (x_3 + 2x_4x_1)\xi\Delta T & -\xi\Delta T & -x_1\xi\Delta T & -x_1^2\xi\Delta T \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (14)$$

Для модели измерения матрица Якоби имеет следующий вид:

$$H = [1 \ 0 \ 0 \ 0]. \quad (15)$$

После уточнения вектора состояния (11) необходимо получить апостериорную оценку ковариационной матрицы, которая потребуется на следующем такте работы фильтра:

$$P_k^+ = [I - \bar{K}_k H_k] P_k^-, \quad (16)$$

где  $I$  — единичная матрица.

Для начала работы алгоритма необходимо задать начальную оценку вектора состояния, которая может быть получена на основе последнего измерения скорости и коэффициентов основного сопротивления, рассчитанных по правилам тягового

расчета [2]. Также требуется начальная оценка матрицы ковариаций  $P_0$ , которая задает представление о разнице между истинным и оцениваемом состоянии. Можно определить оценку  $P_0$ , как это показано в [10]:

$$P_0 = \begin{bmatrix} \sigma_V^2 & \sigma_V\sigma_a & \sigma_V\sigma_b & \sigma_V\sigma_c \\ \sigma_a\sigma_V & \sigma_a^2 & \sigma_a\sigma_V & \sigma_a\sigma_c \\ \sigma_b\sigma_V & \sigma_b\sigma_a & \sigma_b^2 & \sigma_b\sigma_c \\ \sigma_c\sigma_V & \sigma_c\sigma_a & \sigma_c\sigma_b & \sigma_c^2 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

где  $\sigma_V$  — погрешность измерения скорости подвижного состава, км/ч;  $\sigma_a$ ,  $\sigma_b$ ,  $\sigma_c$  — погрешность определения коэффициентов основного сопротивления.

В случае, если это не первый такт работы фильтра, необходимо получить априорную оценку вектора состояния и измерения по уравнениям (6) и (9), используя апостериорную оценку на предыдущем такте работы фильтра. Одной из особенностей работы фильтра является то, что с увеличением погрешности измерений значения матрицы коэффициентов усиления будут уменьшаться, и фильтр будет больше доверять прогнозным оценкам. С уменьшением помех измерения и увеличением шума системы с большим весом используются измеряемые параметры.

Перейдем далее к рассмотрению *сигма-точечного фильтра Калмана* [11]. Его применение позволяет достичь хороших результатов, когда гауссовское приближение рассматриваемых процессов дает большие ошибки. Метод основан на так называемом УТ-преобразовании, которое используется для расчета статистических характеристик случайных величин при их нелинейном преобразовании. УТ-преобразование обеспечивает формирование квазиоптимальных оценок состояния на основе представления плотности распределения вероятности конечным множеством выбранных особым образом сигма-точек. Алгоритм УФК подробно изложен в [12]. Преимущество фильтра УФК по сравнению с ЕФК заключается в том, что первый не требует расчета матрицы Якоби.

Оба алгоритма были реализованы в среде матричных вычислений MATLAB. Хотя использование первого вида алгоритма требует вычисления частных производных на каждом такте работы, в данной задаче, как показала практика, это не вызывает особенных вычислительных трудностей.

## Проверка работоспособности алгоритмов

Для проверки работоспособности алгоритмов было проведено имитационное моделирование движения поезда при следующих заданных параметрах: масса загрузки и тары, начальная скорость, время выбега, дополнительное сопротивление движению, число вагонов и коэффициенты основного сопротивления. Затем к полученным значениям скорости добавляется подготовленная предварительно последовательность шумов. Зашумленная скорость подается на входы обоих фильтров и в результате получаются две оценки коэффициентов сопротивления. Использование одинаковой последовательности случайных данных позволяет сравнивать результаты работы между собой. Для упрощения задачи выявления основных особенностей работы алгоритмов предполагается, что в (3) отсутствует шум системы и все параметры движения, кроме параметров основного сопротивления движения ( $w_0$ ), известны точно. Коэффициенты полинома (2) принимаются неизменными в течение поездки, а их начальные оценки принимаются равными истинным со 100 %-ной погрешностью. Следует особо отметить, что на точность и скорость работы алгоритма сильно влияет начальная оценка матрицы ковариаций. При ее задании по формуле (17) алгоритм практически сразу правильно определяет оценки. Погрешности определения оценок при  $\sigma_v = 0,1$  км/ч составляют менее 0,03 % за 4 с работы фильтра. Подробно метод выбора начальной оценки

матрицы ковариаций для рассматриваемой задачи рассмотрен в [8]. При проверке работы рассматриваемых алгоритмов принималось, что начальная матрица ковариаций неизвестна и задается как единичная матрица соответствующей размерности. Расчеты выполняются для различных значений СКО шума измерений и различных условий численного эксперимента — продолжительности выбега, начальной скорости, уклона. Шаг дискретизации принимался равным 0,5 с. Оценим относительную погрешность определения коэффициента "a" следующим образом:

$$\Delta a = \frac{a - a^*}{a} \cdot 100 \%, \quad (18)$$

где  $a$  — коэффициенты, полученные по типовой методике;  $a^*$  — коэффициенты, полученные в результате работы алгоритма.

Относительная погрешность коэффициентов  $b$  и  $c$  определяется аналогичным образом. В результате сравнения работы обоих фильтров при всех перечисленных условиях было установлено, что их результаты практически совпадают. При задании закона распределения помехи, отличного от гауссовского, немного лучших результатов достигает сигматочечный фильтр Калмана по сравнению с ЕФК. Использование алгоритма УФК позволяет уменьшить погрешность оценок на 0,05 %. В дальнейшем рассматривался только расширенный фильтр Калмана. На рис. 1 представлен результат модели-

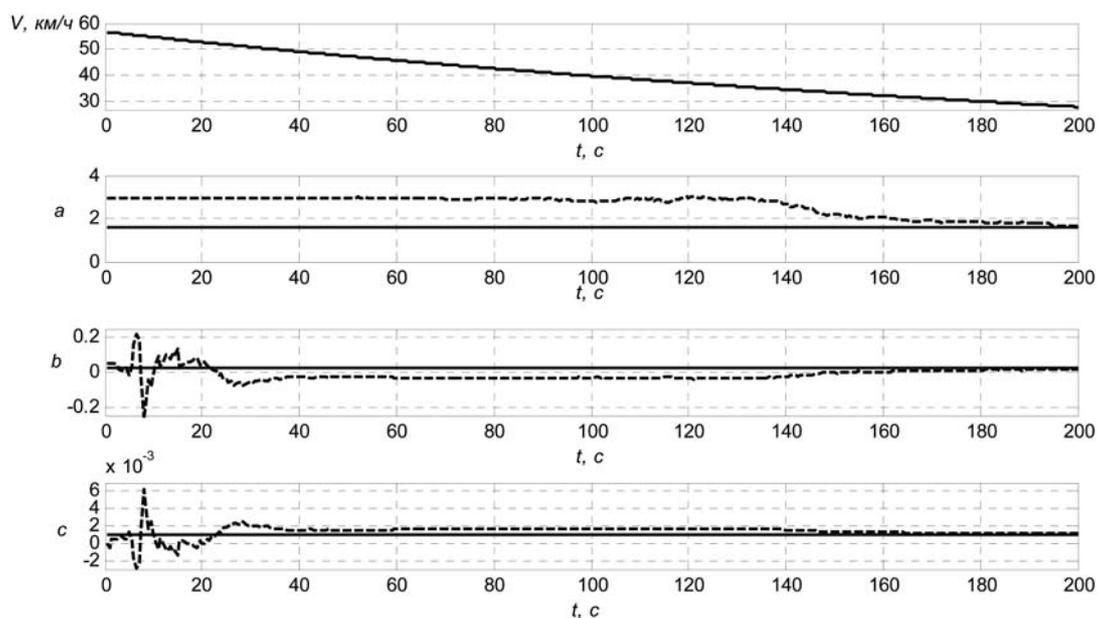


Рис. 1. Процесс моделирования движения поезда на выбегае и оценки коэффициентов: сплошная линия — истинные заданные значения, штриховая — результат работы фильтра

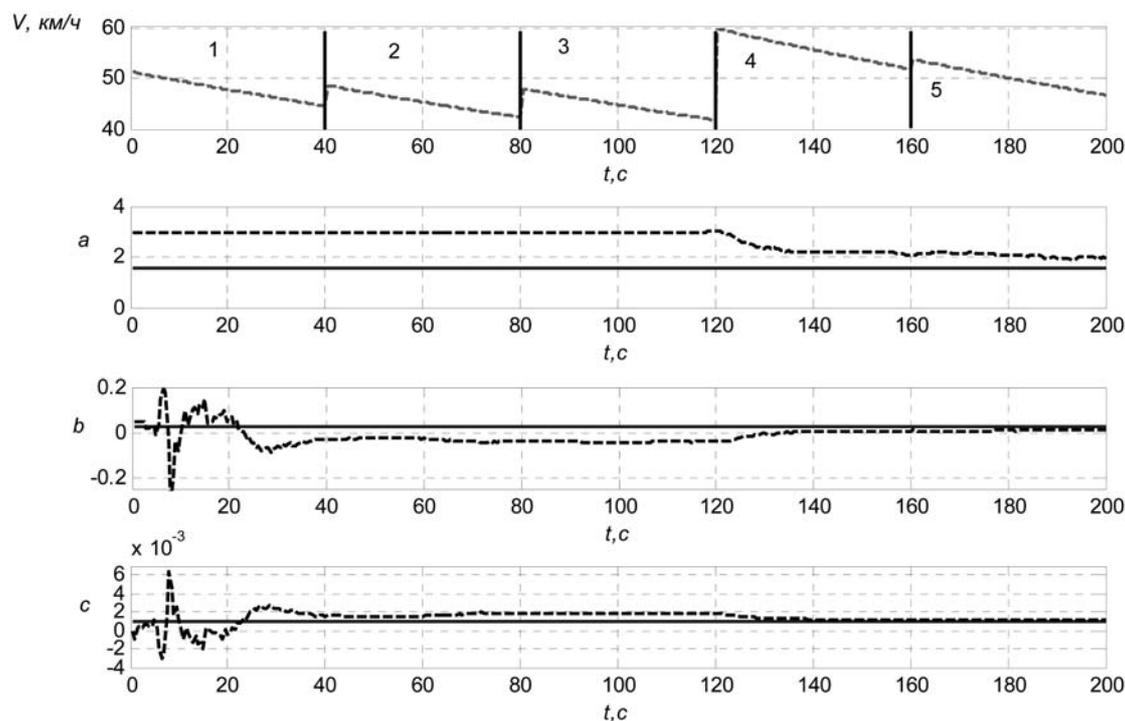


Рис. 2. Процесс моделирования движения поезда на выбеге и оценки коэффициентов при пяти проездах по одному участку с различными начальными скоростями: сплошная линия — истинные заданные значения, штриховая — результат работы фильтра

рования алгоритма при нулевом профиле, начальной скорости 60 км/ч, времени выбега 200 с и по мере измерения скорости  $\sigma_v = 0,1$  км/ч.

Погрешность расчета основного сопротивления по полученным оценкам составляет менее 1 %, что практически не сказывается на точности тягового расчета. При прочих начальных условиях были также получены приемлемые результаты. Время оценки в приведенном примере не сопоставимо со временем движения поезда в режиме выбега на перегонах метрополитена. Если подобная ситуация возникнет при работе с реальными данными, то эту проблему можно разрешить при многократном проезде поезда по выбранному участку пути и соответствующей настройке фильтра. Как показано в [9], при появлении некачественных данных или наступлении периода работы, когда данные отсутствуют, фильтр может приостановить работу до момента прихода необходимой информации. Предположим, что поезд движется при тех же условиях на выбеге в течение 40 с, и его скорость опускается до 52 км/ч. На основании численного эксперимента установлено, что хотя погрешность оценок коэффициентов будет составлять 90,2 %, 186,92 %, 37,5 % соответственно для  $a$ ,  $b$  и  $c$ , погрешность расчета основного сопротивления на том же интер-

вале скорости не будет превышать 0,7 %. При расчете силы сопротивления на всем возможном диапазоне скоростей максимальная относительная погрешность составит 90 %. Поэтому важным моментом является работа фильтра на как можно большем диапазоне скоростей. При пятикратном проезде с различными начальными скоростями точность оценок увеличивается в 6 раз, если охватываемый диапазон скоростей опускается до 40 км/ч, как это показано на рис. 2. Точность оценок будет составлять 18,1, 33,6 и 5 %. Таким образом, в ситуации, когда полученные оценки оказываются неприемлемыми в связи с небольшим диапазоном скорости выбега или неустановившимся процессом уточнения оценок, работу фильтра можно продолжить при повторном проезде того же участка перегона с той же загрузкой до выполнения заданных требований.

При проезде поезда по переменному профилю в алгоритме работы фильтра необходимо учесть дополнительное сопротивление. Для этого перед каждым тактом работы фильтра дополнительное сопротивление прибавляется ко второму элементу вектора состояния. После получения скорректированной оценки необходимо вычесть из второго элемента значение того же дополнительного сопротивления.

## Проверка работы алгоритма на реальных данных

Далее приведены результаты работы алгоритма на реальных данных, полученных с помощью регистратора параметров движения типа "черный ящик". Данные записывались на Серпуховско-Тимирязевской линии Московского метрополитена на вагонах типа 81-717 в ночное время, что соот-

ветствует околонулевой загрузке. Формула расчета основного удельного сопротивления, полученная на основе типовой методики [2], следующая:

$$w_0 = 1,776 + 0,025V + 0,0009V^2. \quad (19)$$

В результате обработки данных для трех перегонов были получены данные, приведенные в табл. 1,

где  $\sigma_1$  — среднеквадратичные отклонения между измеренной скоростью и рассчитанной по формуле (19);  $\sigma_2$  — среднеквадратичные отклонения между измеренной скоростью и рассчитанной по найденным коэффициентам; диапазон  $V$  — диапазон скорости, на котором происходил выбег.

Результат аналогичного расчета для трех других вагонов на одном перегоне показал близость найденных коэффициентов, что говорит о необходимости оценки параметров для каждого перегона и подвижного состава. Пример расчета для перегона Отрадное—Владыкино представлен в табл. 2.

Сравнение реальной траектории и рассчитанной по найденным коэффициентам для данного перегона показано на рис. 3. На рис. 4 показана разница между измеренной скоростью и рассчитанной.

Существенное значение в тяговом расчете имеет адекватность выбранных моделей. Предложенная методика позволяет проводить идентификацию параметров основного сопротивления на основе реальных данных, которая может быть использована в системах автоведения. В результате проведенной работы были получены уточненные оценки, которые использовались для проведения расчетов для линий Московского метрополитена в автоматизированной системе энергооптимальных расчетов [13].

Таблица 1

Перегон	Коэффициенты основного сопротивления			Диапазон $V$ , км/ч	$\sigma_1$ , км/ч	$\sigma_2$ , км/ч
	$a$	$b$	$c$			
АЛТУФЬЕВО—БИБИРЕВО	1,6254	0,022878	0,00081678	65...56	0,50354	0,30655
БИБИРЕВО—ОТРАДНОЕ	1,7232	0,024255	0,00086596	74...58	0,33121	0,3157
ОТРАДНОЕ—ВЛАДЫКИНО	1,415	0,019917	0,00071105	72...35	1,1865	0,19329

Таблица 2

№ вагона	Коэффициенты основного сопротивления			Диапазон $V$ , км/ч
	$a$	$b$	$c$	
290	1,415	0,019917	0,00071105	72...35
286	1,4238	0,02004	0,00071547	75...40
8520	1,3288	0,018703	0,00066773	80...55
8525	1,3687	0,019265	0,00068779	70...48

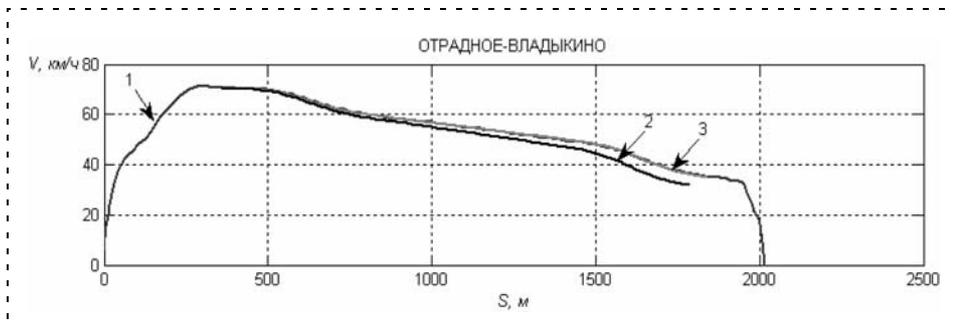


Рис. 3. Зависимость скорости поезда от пройденного пути: 1 — измеренная на всем участке; 2 — рассчитанная на выбеге по стандартным коэффициентам, 3 — рассчитанная на выбеге по полученным коэффициентам

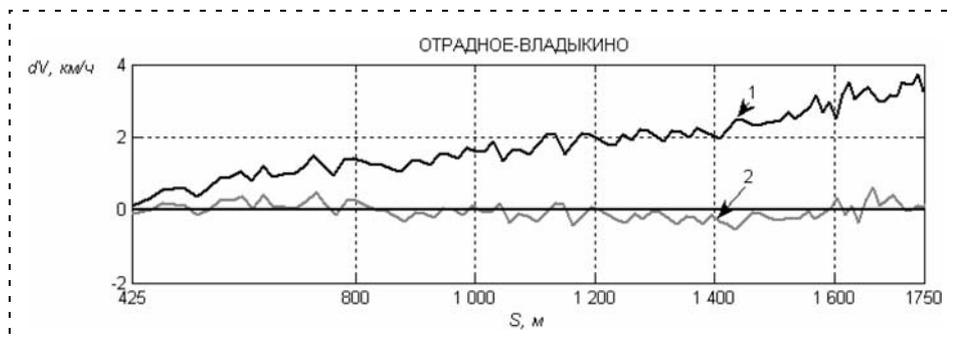


Рис. 4. Разница между измеренной скоростью на выбеге и рассчитанной: 1 — по стандартным коэффициентам; 2 — по полученным коэффициентам

## Список литературы

1. Баранов Л. А., Головичер Я. М., Ерофеев Е. В., Максимов В. М. Микропроцессорные системы автоведения электроподвижного состава. М.: Транспорт, 1990.
2. Радченко В. Д. Сопротивление движению вагонов метрополитена. М.: Трансжелдориздат, 1956. 71 с.
3. Мелёшин И. С. Расчет основного сопротивления движению поезда метрополитена в автоматизированной системе выбора энергооптимальных режимов // Вестник МИИТ. 2008. № 19.
4. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 288 с.
5. Василенко Г. И. Теория восстановления сигналов. М.: Советское радио, 1979. 272 с.
6. Баранов Л. А., Мелёшин И. С. Определение параметров основного сопротивления движению поезда метрополитена // Мир транспорта. 2010. № 2.
7. Жербак Л., Елисеев И., Худорожко М. Метод оценки переменных с минимальной дисперсией // Мир транспорта. 2009. № 1.
8. Howlett P., Pudney P., Vu X. Estimating train parameters with an unscented Kalman filter. 2004. С. 34.13.1—34.13.10. [http://www.apiems.net/archive/apiems2004/topication.php?paper=apiems2004\\_34.13.pdf](http://www.apiems.net/archive/apiems2004/topication.php?paper=apiems2004_34.13.pdf).
9. Mohinder S. Grewal, Angus P. Andrews. Kalman filtering. Theory and practice using MatLab. Second edition. New York: A Wiley interscience publication, 2001.
10. Dan S. Kalman Filtering // Embedded Systems Programming. June, 2001.
11. Julier S. J., Uhlmann J. K. A new extension of the Kalman filter to nonlinear systems. [http://www.cs.unc.edu/~welch/kalman/media/pdf/Julier1997\\_SPIE\\_KF.pdf](http://www.cs.unc.edu/~welch/kalman/media/pdf/Julier1997_SPIE_KF.pdf).
12. Eric A. Wan, Rudolph van der Merwe. The Unscented Kalman Filter for Nonlinear Estimation. <http://www.lara.unb.br/~gaborges/disciplinas/efe/papers/wan2000.pdf>.
13. Баранов Л. А., Васильева М. А., Ершов А. В., Максимов В. М., Мелёшин И. С. Автоматизированная система выбора энергооптимальных режимов управления движением поезда метрополитена // Вестник МИИТ. 2008. № 19.

УДК 519.715

**А. Ю. Новик**, аспирант,  
Саратовский государственный  
технический университет,

**В. А. Иващенко**, д-р техн. наук, ст. науч. сотр.,  
Институт проблем точной механики  
и управления РАН, г. Саратов  
[iptmuran@san.ru](mailto:iptmuran@san.ru)

## Модели и методы прогнозирования показателей качества листового стекла

*Предложены модели и методы прогнозирования показателей качества листового стекла на основе фильтра Брауна, искусственной нейронной сети и системы нечеткого вывода, обеспечивающие повышение эффективности управления стекольным производством.*

**Ключевые слова:** листовое стекло, автоматизированное управление, прогнозирование качества стекла

### Введение

Технологические процессы производства листового стекла характеризуются наличием запаздывания по каналам управления и возмущающих воздействий, которое изменяется в широких пределах: от нескольких минут (для ванны расплава и печи отжига) до нескольких суток (по составу шихты). Поэтому эффективное управление этими процессами невозможно без прогнозирования показателей качества стекла [1].

Показатели качества стекла зависят от состава шихты и от процесса подготовки ее к варке. Для

приготовления шихты в качестве сырьевых материалов используются: песок, карбонат кальция, доломит, полевой шпат, сода, сульфат натрия и уголь. Их качество и количество в составе шихты определяют показатели качества листового стекла.

### Фильтры Брауна

Одним из основных показателей качества стекла является его неоднородность, характеризующаяся свильностью — резко выраженными локальными оптическими неоднородностями стекла, которые представляют собой прозрачные нитевидные или слоистые включения, имеющие показатель преломления, отличный от показателя преломления основной массы стекла. Свили в виде слоев вызывают астигматизм поверхности. Для прогнозирования этого показателя использован фильтр Брауна второго порядка [2].

По Брауну значение функции  $f(t)$ , предсказываемое на интервал времени  $\Delta t$ , может быть выражено рядом Тейлора

$$f_{t+\Delta t} = f_t + \frac{df}{dt} \Delta t + \frac{1}{2!} \frac{d^2f}{dt^2} \Delta t^2 + \dots + \frac{1}{n!} \frac{d^n f}{dt^n} \Delta t^n.$$

Члены данного ряда связаны рекуррентной формулой

$$S_t^n(f) = \alpha S_t^{n-1}(f) + (1 - \alpha) S_{t-1}^n(f),$$

# CONTENTS

**Pshikhopov V. Kh., Medvedev M. Yu.** Block Design of Robust Systems with Bounded Controls . . . . . 2

*In this paper a new method of a robust control design for nonlinear multilinked dynamical systems is developed. The design procedure is based on the direct Lyapunov method. The results of theoretical analysis, solvability conditions of the control design equations, and robust control algorithms are presented. Theoretic results are implemented on experimental robotic mini-airship.*

**Keywords:** nonlinear system, robust control, multilinked systems

**Kim D. P.** Algebraic Method for Linear Continuous Control System Synthesis . . . . . 9

*The algebraic method of synthesis of transfer function of a regulator on set time of regulation and other indicators of quality is discussed. The cases when the synthesized system should possess astaticism of the second and more higher order are considered. It is thus considered that the object of regulation is nonminimal-phase and its transfer function contains the right pole.*

**Keywords:** setting time, astaticism, nonminimum-phase, standardized transfer function, desired transfer function

**Ivanov A. S., Lapkovsky R. Yu., Ukov D. A., Filimonyuk L. Yu.** Cybernetic Approach to Heterogeneous Processes Modeling in Mechatronic Systems. . . . . 16

*This article suggests an application of cause-effect approach, which was developed by mathematic cybernetics, to complicated mechatronic, man-machine, ergatic systems modeling. The main feature of these systems is complicated interaction between heterogeneous processes. Those systems models' developing is important for solving some problems of analysis, synthesis and diagnostics.*

*The authors propose using the method of special states for developing of cause-effect complexes, which implement the interaction between heterogeneous processes, and describe human actions as well as technical system functioning.*

*The authors provide the article with two examples of auto and air transport systems modeling*

**Keywords:** modeling, cybernetic systems, complicated systems, ergatic systems, man-machine systems, cause-effect complex, special states

**Kryzhanovsky G. A., Solodukhin V. A.** Intelligent Transport Systems and Inverse Problems of Optimization . . 21

*The extended formulation of the inverse optimization problem in intelligent control systems for transport processes (ICSTP) is considered. The approach to creating a data base for the most characteristic typical tasks with the expansion of the inverse problem is described. We give direct and inverse problems of optimization of priority service facilities, actual for ICSTP.*

**Keywords:** intelligent control systems, processes of making decision, inverse problem of optimization, motivation of the decision maker

**Petukhov I. V.** To the Question of Maintenance of Reliability Human-Machine System . . . . . 25

*In clause the basic approaches to research and maintenance of reliability human-machine system are considered. The analysis of known methods and techniques of the account of the human factor is lead.*

*The approach to increase of reliability of the person-operator by means of research of its functions at separate stages of camera activity is offered.*

**Keywords:** human-machine system, the person-operator, reliability

**Meljoshin I. S.** The Estimating Underground Train Running Resistance Parameters with Kalman Filter . . . . . 31

*In article is presented way of identifying train running resistance parameters using methods of Kalman filtering. The results can be used in train traction calculating work and in automatic train operation system.*

**Keywords:** subway, train model, train running resistance, non-linear filtration, Kalman Filter, Unscented Kalman Filter

**Novik A. Yu., Ivaschenko V. A.** Models and Methods for Predicting Quality Sheet Glass . . . . . 37

*The models and methods for predicting performance of flat glass on the basis of the filter Brown, artificial neural networks and fuzzy inference system to ensure better management of glass manufacture.*

**Keywords:** sheet glass, automated management, forecasting the quality of glass

**Fradkov A. L., Andrievskii B. R., Boykov K. B., Andrievskii A. B.** Multipendulum Mechatronic Setup . . . . . 41

*The Multipendulum Mechatronic Setup designed in the IPME RAS is described. The mechanical part of the setup is a set of the interconnected pendulum devices, forming complex oscillatory nonlinear mechanical systems with many degrees of freedom. The special-purpose hardware and software tools was developed for real-time control of the setup, carrying out laboratory experiments, displaying and processing of their results, special hardware and software, including electronic equipment (data exchange interface with a computer), the control computer and electric power devices (power amplifiers, power supplies). The setup is designed for educational and scientific experimental research on nonlinear dynamics, control and synchronization in networks of nonlinear dynamical systems of high order as well as for working out principles for the organization of software and hardware for data collection and management in complex distributed systems.*

*At the present time, five active (equipped with electronic devices) sections and one controlled electric motor are launched. The article presents the results of experimental study of the behavior of the chain of pendulums under harmonic external excitation, confirming the earlier theoretical statements. Based on the experimental research of data exchange between digital measurement/control system and the complex through the communication channel, the ways for optimization of local multipoint mechatronic systems communication channel are outlined.*

**Keywords:** mechatronic setup, chain of pendulums, nonlinear oscillations, data exchange, communication channel

**Soldatkin V. V.** The Construction Concept and Synthesis of Design Factors for a Stationary Multichannel Aerometric Transducer of the Helicopter Air Data System . . . . . 56

*The construction principles, the models of informative signals, the parametric synthesis technique, and the recommendations on rational selection of design factors for a stationary multichannel flow-type transducer of the helicopter air data system are considered.*

**Keywords:** helicopter, altitude-velocity parameters, aerometric data, stationary multichannel flow-type transducer, construction, synthesis of design factors

**Alekseev K. B., Shadyan A. V.** A Method of Determining the Dynamic Parameters of the Spacecraft in Flight . . . 64

*The paper deals with the problem of algebraic synthesis of the controller transfer function for given control time and other performance characteristics. The case are considered in which the system to be synthesized should be second- or higher-order astatic, the plant is nonminimum-phase, and the plant transfer function has a right pole.*

**Keywords:** rigid body, tensor of inertia, the spacecraft, the dynamic asymmetry

**Chelnokov Yu. N., Pankratov I. A.** The Reorientation of Circular Spacecraft's Orbit with Three Points of Switching Control . . . . . 70

*The problem of reorientation of circular spacecraft's orbit with the help of four impulses of thrust is discussed. We constructed a numerical solution of the resulting system of equations under the condition that lengths of two internal parts of spacecraft's active motion are equal. In particular cases, when 1) lengths of second and third parts of spacecraft's active motion are equal to given value; 2) lengths of first and fourth parts of spacecraft's active motion are also equal; we found an analytical solution.*

**Keywords:** spacecraft, quaternion, impulse, orbit

**Basyrov A. G., Lebedev D. M., Mastin A. B.** Planning of Parallel Processing of the Information in High-Efficiency Computing Systems of Onboard Complexes of Management of Space Vehicles . . . . . 74

*The authors propose a method of distribution in the parallel computing system of independent tasks with random execution time. The analysis of the effectiveness of the method and recommendations for its practical application.*

**Keywords:** directive term, independent tasks, the parallel computing system, planning of computing process

---

**Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»**

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала: **(499) 269-5397**, тел./факс: **(499) 269-5510**

Дизайнер *Т. Н. Погорелова.*

Технический редактор *Е. В. Конова.* Корректор *Е. В. Комиссарова.*

---

Сдано в набор 03.11.2010. Подписано в печать 20.12.2010. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 9,8. Уч.-изд. л. 10,58. Заказ 18. Цена договорная.

---

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций  
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Отпечатано в ООО "Подольская Периодика". 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, 15