

УДК 681.31

СЫТНИК Б.Т., к.т.н., профессор  
КУРЦЕВ М.С., ассистент  
МИХАЙЛЕНКО В.С., аспирант (УкрГАЗТ)

## Структурно-параметрическая идентификация в адаптивных системах управления движением поездов

*Представил д.т.н., профессор Моисеенко В.И.*

*Разработана новая модель идентификации структуры и параметров сложного подвижного объекта рельсового транспорта для построения адаптивных систем управления с коррекцией текущих параметров настройки адаптивных регуляторов.*

**Ключевые слова:** идентификация, адаптивная система управления, высокоскоростное движение поездов, энергосбережение.

### Введение

Повышение скорости движения поездов – сложная проблема, которая нуждается в комплексном, гармоническом развитии всех компонентов железнодорожной инфраструктуры, в том числе и систем обеспечения безопасности движения поездов с учетом устройств управления подвижными объектами рельсового транспорта. Государственная программа реформирования железнодорожного транспорта Украины (распоряжение Кабинета министров Украины от 27.12.2006 г., № 651-р), "Концепция Государственной целевой программы внедрения на железнодорожных путях скоростного движения пассажирских поездов на 2005-2015 гг.", одобренная распоряжением Кабинета Министров Украины № 079-р от 31.12.2004 г., основными целями которых является техническое переоснащение и достижение на этой основе высокой экономической эффективности производства, по отдельным направлениям реструктуризации, предполагает, что сокращение эксплуатационных затрат должно достигаться за счёт усовершенствования систем управления перевозками, внедрения автоматизации, новых технических устройств, информационных, ресурсосберегающих технологий, повышения скорости движения подвижного состава (ПС). В настоящее время особую актуальность приобретает необходимость обеспечения траектории оптимального по энергопотреблению пуска (торможения) поезда с минимальным количеством переключений исполнительных механизмов (ИМ) при заданных ограничениях. Например, для ПС железных дорог накладывается ограничение на максимальное ускорение (замедление)  $0.7-0.8 \text{ м/с}^2$ , обеспечивающее оптимальность по энергопотреблению.

Выполнение мероприятий по сокращению затрат топлива и электроэнергии предполагается за счет использования энергосберегающих технологий, применения рекуперативного торможения (возвращение в сеть электроэнергии), внедрения комплексной системы управления системами тяги (торможения), которые обеспечивают рациональный режим движения, оптимизируют расходы топлива и электроэнергии при соблюдении заданного графика движения.

Подвижной состав, как органичная составляющая комплексной системы управления, с развитием новых информационных технологий требует роста качества автоматизации процессов. Однако эффективность применения автоматических устройств и систем зависит не только от степени оснащения ими электропривода ПС, но и в значительной степени определяется качеством алгоритмов идентификации и автоподстройки устройств управления, степенью оптимальности их параметров настройки при изменениях характеристик объекта управления и помех переменной интенсивности, которые существенно снижают качество работы систем управления ПС.

Повышение качества эксплуатационных характеристик систем автоматического управления ПС связано с необходимостью идентификации и адаптации, с обеспечением безопасности и здоровья обслуживающего персонала, высоким быстродействием оборудования и замедленной реакцией операторов, обусловленной ограниченными физическими возможностями человека.

© Б.Т. Сытник, М.С. Курцев, В.С. Михайленко, 2014

**Анализ имеющихся решений**

Подавляющее большинство современных научных исследований и промышленных реализаций адаптивных систем управления (САУ) посвящено созданию робастных, нейрподобных, нечетких, интеллектуальных фильтров и регуляторов [2, 3].

Адаптивные САУ и активные экспертные системы (АЭС) [2, 3, 4] находят применение в качестве систем управления сложными нестационарными и многомерными объектами, поддерживают функционирование систем в стохастическом и хаотическом мирах, что существенно улучшает их характеристики надежности и технико-экономические показатели. Научной основой исследований послужили работы ученых Бесекерского В.А., Загария Г.И., Заде Л.А., Лазаряна В.А., Пospelова Д. А., Тикменева Б.Н., Трахтмана Л.М., Mamdani Е.А., Цыпкина Я.З., Шубладзе А.М. Работы этих и многих других ученых создали методические и теоретические предпосылки развития теории адаптивных транспортных САУ.

**Постановка задачи**

Разработка новой модели идентификации структуры и параметров сложного подвижного объекта рельсового транспорта для построения адаптивных систем управления с коррекцией текущих параметров настройки.

**Основной материал**

В соответствии с работами В.А Лазаряна [1] поезд может быть представлен локомотивом (устройство управления и исполнительный механизм (ИМ)) и последовательностью вагонов различной длины и массы (объектом управления, показанным на рис. 1).

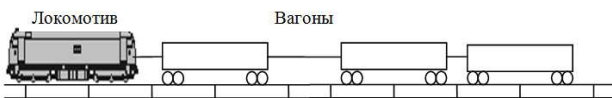


Рис. 1. Схема поезда как объекта управления

Электрической моделью поезда может служить последовательность апериодических звеньев с различными постоянными времени и статическими коэффициентами передачи [1, 2]. Звенья с большими постоянными времени могут заменяться звеньями с меньшими постоянными времени. Число звеньев с меньшей постоянной времени может быть равно наибольшему целому от деления наибольшей постоянной времени модели на наименьшую, соответствующую модели самого легкого вагона.

Общим недостатком известных систем идентификации с использованием модели [2-6]

является неизменность структуры настраиваемой модели, включенной параллельно исследуемому объекту.

Рассматриваются модели динамических объектов, структура которых может аппроксимироваться математической моделью, содержащей (см. рис. 2) блок умножения *Produkt3* с требуемым максимальным значением коэффициента усиления *k0*, большим 0, и *i* апериодических звеньев *m1, m2, m3, m4, m5* с одинаковой постоянной времени *T*, на выходе каждого из которых установлены блоки усилителей *K1, K2, K3, K4, K5*. Каждый блок усилителей *Ki* (см. рис. 3) содержит *j* усилителей *Gain\_j* с коэффициентами усиления *Ki,j* от 0.1 до 1. На первые входы *In1* каждого блока *Kj* подается сигнал *Ymi* с выходов соответствующих апериодических звеньев *mi*, а на вторые входы *In2* – выход модели *YOB* объекта (или выход объекта). На выходах всех усилителей *Kj* формируются модули сигналов ошибки *E(Ki,j)* и минимальный сигнал модуля ошибки *Emin(Ki,j)=abs(Ymi-YOB)*.

В процессе совместной работы объекта и модели происходит автоматическое определение количества звеньев *i* и статического коэффициента усиления *kOB = k0 \* Ki, j* объекта.

Критерием оценки близости структуры и параметров модели и объекта является выбор минимума модуля сигнала ошибки *Emin(Eti,Kij)* из всех локальных минимумов модулей сигнала ошибки *Emin(Eti,Kj)* формируемых на выходах блоков усилителей *K1, K2, K3, K4, K5*, подключенным к селектору минимального сигнала *MinMax*.

Предположим, что дифференциальное уравнение модели данного объекта со статическим коэффициентом усиления *kOB*. в операторном виде имеет вид

$$(s^i + a_1s^{i-1} + \dots + a_i) \cdot x(s) = k_{OB}U(s), \quad (1)$$

где *U(s)* - изображение по Лапласу управляющего воздействия;

*x(s)* - изображение по Лапласу выходного сигнала объекта.

Известно [2], что для случая, когда уравнение (1) имеет вещественные и одну пару комплексных корней, справедливо неравенство

$$k_{OB} \cdot [1 + V(t)] \geq h(t) \geq k_{OB} [1 - V(t)],$$

где *h(t)* - переходная функция;

$[1+V(t)]$  - функция, ограничивающая  $h(t)$  сверху;

$$V(t) = e^{-\mu t} \sum_{i=0}^{m-1} \frac{\eta^i t^i}{i!},$$

$[1-V(t)]$  - функция, ограничивающая  $h(t)$  снизу, причем,

$\eta$  - среднearифметический корень уравнения (1).

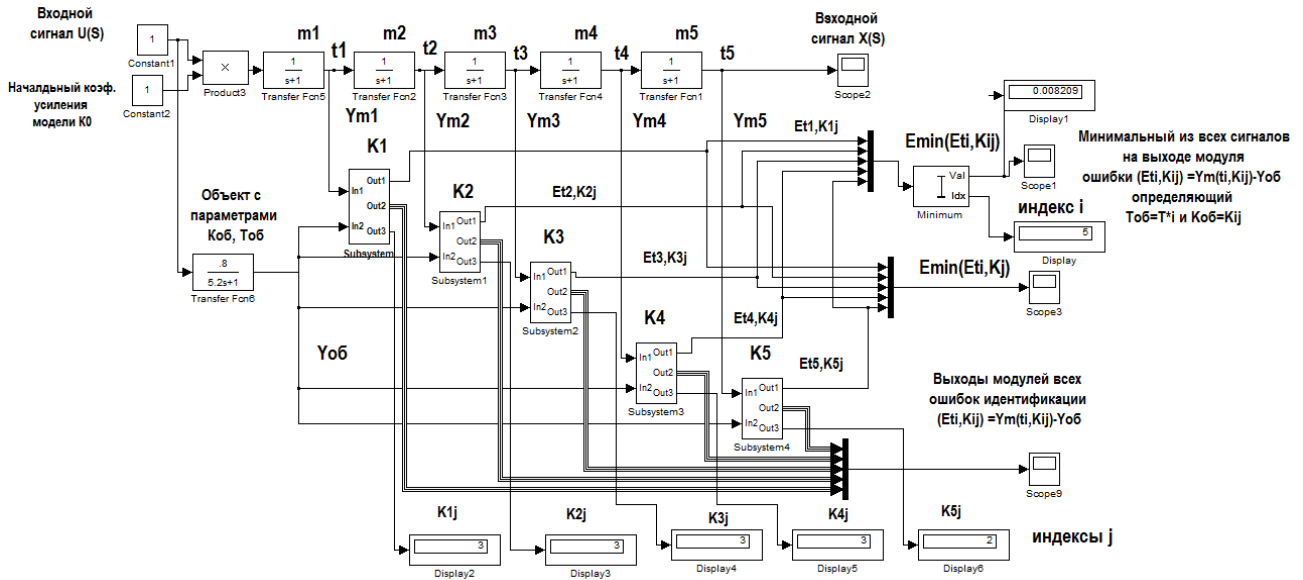


Рис. 2. Структурная схема модели поезда из пяти вагонов

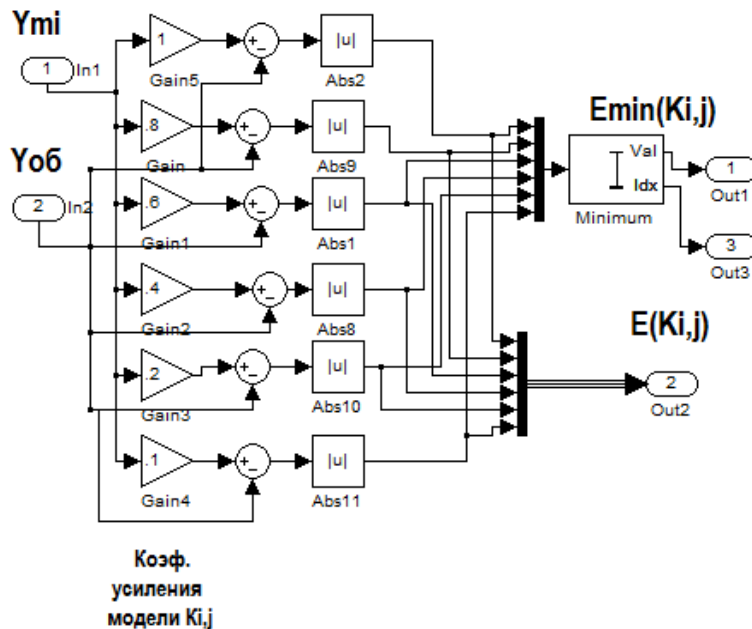


Рис. 3. Структурная схема блока усилителей  $K_j$

Если уравнение (1) нормализовано относительно  $a_i$  так, что  $a_i = 1$ , то в разомкнутой системе (без регулятора) коэффициент  $\frac{a_{i-1}}{i \cdot a_i} = T$  определяет среднеарифметическую постоянную времени объекта, а коэффициент  $\frac{a_{i-1}}{a_i} = iT$  - суммарную постоянную времени, характеризующую общую инерционность объекта. Значение среднеарифметического корня  $\eta_{с.а.} = \frac{1}{iT}$  определяет постоянную составляющую скорости протекания переходного процесса в разомкнутой системе, т.к.  $\eta_{с.а.}$  ближе всего расположен по отношению к мнимой оси комплексной плоскости корней, т.е. является правой границей всех корней.

Предположим, что в замкнутой системе управления модель объекта описывается передаточной функцией

$$W_m(s) = \frac{k_{OB}}{(T_{OB}s + 1)^i}, \quad (2)$$

а управляющие воздействия формируются в виде следующего соотношения, соответствующего ПИД-закону регулирования

$$U(t) = k_{II}e(t) + k_{II} \int_0^t e(t)dt + k_{D} \frac{de(t)}{dt}, \quad (3)$$

где  $e = x_0 - x(t)$  -ошибка регулирования,  $x_0$  -сигнал задания регулятора,  $x(t)$  -выходной сигнал объекта.

Дискретному аналогу (3) соответствует [3] формула

$$U(nT_k) = \sum_{l=0}^k k_l \cdot e^{l-1}(nT_k).$$

$$\text{При } t \in [nT_k, (n+1)T_k], \quad n = \overline{0, \infty}$$

управляющее воздействие подается одновременно как на объект, так и на модель. Управлению (3) соответствует передаточная функция

$$W(s) = k_{II} + \frac{k_{D}s}{2} + \frac{k_{II}}{s}, \quad (4)$$

где  $k_0 = k_{II}$ ,  $k_1 = k_{II}$ ,  $k_2 = k_{D}$  - оптимальные по критерию максимальной степени устойчивости настройки этого регулятора, описываются простыми алгебраическими соотношениями [3]:

$$k_0 = k_{II} = \frac{27i}{2Tk_{OB}} \cdot \frac{(k-1)(k-2)^{k-2}}{(k+1)^{i-1}}, \quad (5)$$

$$k_1 = k_{II} = \frac{1}{k_{OB}} \cdot \frac{(k-2)^{i-2}}{(k+1)^{i-1}} \cdot (5k-4), \quad (6)$$

$$k_2 = k_{D} = \frac{iT}{2k_{OB}} \cdot \left( \frac{k-2}{k+1} \right). \quad (7)$$

Миноранта переходной функции  $V_s(t)$  в замкнутой системе уравнений совпадает с переходной функцией  $h_s(t)$  в том случае, если  $k+1$  производная характеристического уравнения замкнутой системы, содержащей данный объект, имеет корни  $s_1 = -\frac{l}{T(k+1)}$  кратности  $k+1$ , т.е. выглядит следующим образом:

$$Q^{k-l-1}(s) \cdot \left( s + \frac{k}{iT(k+1)} \right)^{k+1} = 0,$$

где  $Q^{k-l-1}(s) = 0$  - уравнения для определения остальных  $k-l-1$  корней  $l+1$  производной характеристического уравнения замкнутой системы, которые равны  $s_2 = \frac{1}{T}$ . В этом случае  $(k+1)$  - кратный корень  $k+1$  производной характеристического уравнения  $s_1$  замкнутой системы уравнения определяется числом звеньев модели  $i$ , кратностью  $k$  и постоянной времени  $T$ . Если  $i > l$ , то  $s_1 < s_2$ , т.е. корни  $s_1$  расположены ближе к мнимой оси.

По координатам  $i$  и  $j$  узловой точки модели, которым соответствует минимальная ошибка сравнения  $E_{min}(E_{ti}, K_{ij})$  (минимум модуля ошибки идентификации), находим значения  $T_{OB} = iT$  и величину  $k_{OB}$ , необходимые для подстройки текущих

параметров настройки регуляторов (5), (6), (7) в каждом переходном процессе.

Анализ показаний цифровых вольтметров на рис. 2 показывает идентификацию параметров объекта (постоянная времени объекта  $T_{OB}=5.2c$  и статический коэффициент передачи  $k_{OB} = 0.8$ ). Индексы модели  $i=5, j=2$  для  $T=1c$ . соответствуют  $T_m=i*T=5*T=5c$ . и значению ее статического коэффициента передачи  $k_m = K(ij) = K_{52} = 0.8$  за время моделирования 5.5 с. Повысить точность идентификации можно увеличив число апериодических звеньев и уменьшив значения их постоянных времени.

#### Выводы

Число звеньев  $i$  (структура) модели и координата  $j$  значения ее статического коэффициента передачи являются величинами переменными, и их изменение учитывается в адаптивных системах управления путем коррекции текущих параметров настройки регуляторов по формулам (5), (6), (7) в каждом переходном процессе. В цифровых системах управления данный метод динамической адаптации легко реализуется программным способом.

#### Литература

1. Лазарян В.А. Динамика транспортных средств. Избранные труды / В.А. Лазарян. - К.: Наукова думка, 1985. - 528 с.
2. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. Изд. 3-е, доп. – М.: Наука, 1975.
3. Загарий Г.И., Шубладзе А.М. Синтез систем управления на основе критерия максимальной степени устойчивости. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 104 с.
4. Адаптивные системы идентификации / [Кику А.Г., Костюк В.И., Краскевич В.Е., Сильвестров А.Н., Шпит С.В.].-К.:Техніка,1975.- 288 с.
5. Дейч А.М. Методы идентификации динамических объектов / А.М. Дейч. - М.: Энергия.1979.-240с.
6. Растрин Р.А. Введение в идентификацию объектов управления / Р.А. Растрин, Н.Е. Маджаров.- М.: Энергия, 1977.-216 с.
7. Марков С.И. Идентификация параметров колебательных систем автоматического регулирования / Марков С.И., Минаев В.М., Артамонов Б.Н. – Л.: Энергия.1975.- 96 с.

**Ситнік Б.Т., Курцев М.С., Михайленко В.С.**  
**Структурно-параметрична ідентифікація в адаптивних системах управління рухом поїздів.**  
 Розроблено нову модель ідентифікації структури й параметрів складного рухливого об'єкта рейкового транспорту для побудови адаптивних систем керування з корекцією поточних параметрів налаштування адаптивних регуляторів.

**Ключові слова:** ідентифікація, адаптивна система управління, високошвидкісний рух поїздів, енергозбереження.

**Sytnik B.T., Kurtsev M.S., Mikhaylenko V.S.**  
**Structural and parametric identification in adaptive systems of train dispatching.** A new model of structure and parameters identification of a complex rail moving object for the construction of adaptive control systems with the correction of current settings of adaptive regulators has been designed.

**Key words:** identification, adaptive control system, high-speed traffic, energy saving.

Рецензент д.т.н., профессор Листровой С.В. (УкрГАЖТ)

*Поступила 17.03.2014г.*