

## ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ, БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ

УДК 629.4.053.3

DOI 10.46973/0201-727X\_2025\_1\_190

*В. И. Легкая, О. Е. Пудовиков***СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ  
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ ЭЛЕКТРОПОЕЗДА**

**Аннотация.** Рассмотрена структура системы автоматического управления скоростью электропоезда. Использован пропорционально-интегральный с прогнозом рассогласования закон управления системы, обеспечивающий требуемое качество управления в установившемся и переходных режимах движения. Определены критерии качества управления скоростью. Путем имитационного моделирования в программной среде Embarcadero C++ Builder проведен сравнительный анализ эффективности работы системы автоматического управления при различной структуре ее закона управления: постоянной (пропорционально-интегральный с прогнозом рассогласования закон используется во всех режимах движения) и переменной (при разгоне или торможении используется пропорциональный, а в режиме стабилизации скорости – пропорционально-интегральный с прогнозом рассогласования). Для этого решена задача параметрического синтеза системы с использованием метода Нелдера – Мида, в результате чего найдены рациональные значения коэффициентов закона управления при каждой из исследуемых его структур. Установлено, что адаптация закона управления системы к изменению режима движения за счет использования переменной его структуры обеспечивает повышение качества управления скоростью электропоезда.

**Ключевые слова:** система автоматического управления, закон управления, имитационное моделирование, качество управления, параметрический синтез.

**Для цитирования:** Легкая, В. И. Совершенствование структуры системы автоматического управления скоростью электропоезда / В. И. Легкая, О. Е. Пудовиков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1. – С. 190–200. – DOI 10.46973/0201-727X\_2025\_1\_190.

**Введение**

В настоящее время актуальным направлением научных исследований является разработка и совершенствование интеллектуальных транспортных систем (ИТС) контроля и управления движением скоростного и высокоскоростного подвижного состава [1]. На Московском центральном кольце (МЦК) проходит испытания система автоматического управления пригородных поездов на уровне автоматизации УА3 и готовится к внедрению система автоматического управления на уровне автоматизации УА4 [2]. Одной из управляющих подсистем ИТС, обеспечивающей безопасность движения и реализующей энергооптимальные режимы ведения поезда, является вышестоящая система автоведения (САВП). Достижение заданного САВП уровня скорости и поддержание ее в установленных согласно требованиям безопасности пределах обеспечивается исполнительным контуром САВП – системой автоматического управления (САУ) скоростью.

Поставленная в данной работе задача разработки САУ скоростью электропоезда заключается в выборе такой структуры системы и значений параметров ее закона управления, при которых обеспечивалось бы удовлетворительное качество регулирования скорости во всем диапазоне допустимых скоростей движения электропоезда.

**Модель системы автоматического управления скоростью**

Структура разработанной модели системы автоматического управления скоростью приведена на рис. 1 [3]. Данная модель реализована в программной среде Embarcadero C++ Builder.

Объектом управления ОУ модели САУ является электропоезд, математическое описание которого соответствует многомассовой модели. Представление поезда в виде цепочки твердых тел, соотносящихся с массами вагонов электропоезда-прототипа и соединенных между собой упруго-диссипативными связями, обосновано возможностью задавать параметры отдельно для каждого экипажа и учитывать расположение экипажей на различных элементах профиля пути.

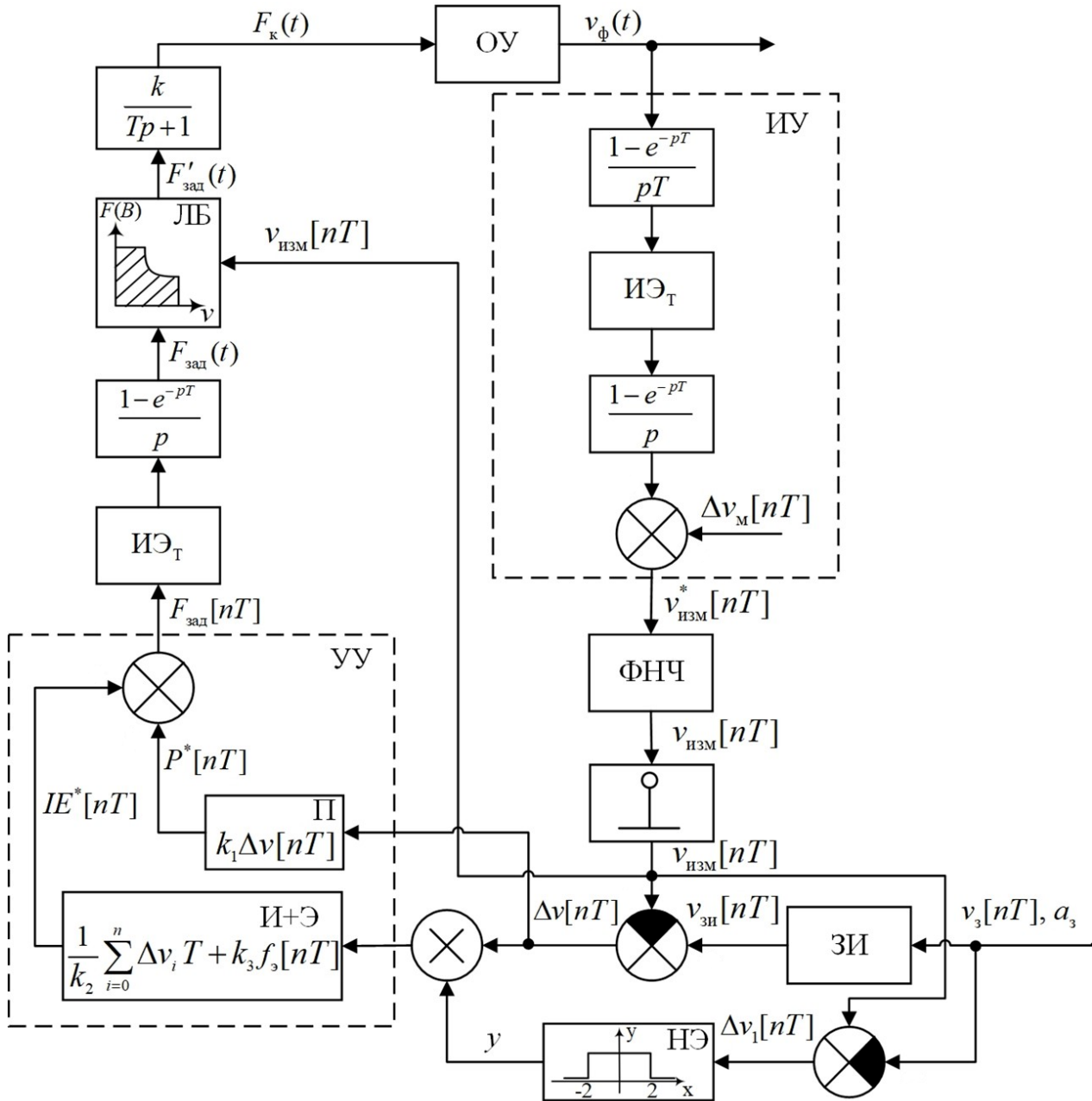


Рис. 1. Структура системы автоматического управления скоростью электропоезда

Используемый электропоезд-прототип представляет собой 5-вагонный электропоезд ЭС1, масса каждого из вагонов которого составляет 53,6 т. Согласно принятой многомассовой модели поезда движение каждого из его вагонов описывается следующей системой дифференциальных уравнений (1) [4]:

$$\begin{cases} \dot{v}_i = \frac{F_i - F_{i+1} + F_{i\bar{z}}}{m_i}, i = \overline{1, n}; F_{n+1} = 0, \\ \dot{q}_i = v_{i-1} - v_i, i = \overline{2, n}, \\ \dot{x}_1 = v_1, \end{cases} \quad (1)$$

где  $n$  – число экипажей в поезде;  
 $q_i$  – деформация  $i$ -го межвагонного соединения, м;  
 $\dot{q}_i$  – скорость деформации, м/с;  
 $m_i$  – масса  $i$ -го экипажа, кг;

$v_i$  – скорость центра масс экипажа, м/с;

$F_i$  – реакция в  $i$ -том межвагонном соединении, Н;

$F_{\Sigma}$  – суммарная внешняя сила, действующая на  $i$ -й экипаж, Н.

В предлагаемой модели САУ измерительное устройство ИУ моделируется в виде датчика скорости с частотно-импульсной модуляцией (ЧИМ). Модель ИУ имитирует работу тракта измерения скорости, при этом преобразование частотно-модулированного сигнала с выхода датчика в цифровой эквивалент скорости выполняется в соответствии с принципом циклического частотомера [5]. При моделировании ИУ учитываются операции усреднения скорости, квантования по уровню и временной дискретизации. Усреднение скорости обеспечивается звеном с передаточной функцией  $\frac{1 - e^{-pT}}{pT}$ ; импульсный элемент ИЭ<sub>T</sub> выполняет операцию временной дискретизации с шагом  $T$ . В структуре ИУ (рис. 1) присутствует сумматор, на первый вход которого поступает сигнал измеренной скорости, восстановленный экстраполятором нулевого порядка с передаточной функцией  $\frac{1 - e^{-pT}}{p}$ , а на второй – сигнал методической погрешности измерения  $\Delta v_m[nT]$ , являющейся случайной величиной. Значение моделируемой погрешности  $\Delta v_m[nT]$  пропорционально погрешности квантования по уровню и характеризуется распределением по закону Симпсона [6], при этом наибольшее значение  $\Delta v_m[nT]$  принимается равным шагу квантования по уровню  $q$  и зависит от радиуса бандажа колесной пары по кругу катания  $R$ , вырабатываемых за один оборот колеса числа импульсов  $z$  и шага временной дискретизации  $T$  [5] (2):

$$q = \frac{2\pi R}{zT} \cdot 3,6 = 2,47 \text{ км/ч}, \quad (2)$$

где  $R = 0,46$  м;  $z = 42$ ;  $T = 0,1$  с.

Вследствие этого сигнал на выходе измерительного устройства  $v_{\text{изм}}^*[nT]$  представлен как (3):

$$v_{\text{изм}}^*[nT] = \frac{1}{T} \int_{(n-1)T}^{nT} v_{\phi}(t) dt + \Delta v_m[nT], \quad (3)$$

где  $t$  – текущее время;

$\Delta v_m[nT]$  – случайная величина методической погрешности квантования,  $n = 0, 1, 2, \dots$ .

Наличие аддитивной помехи в сигнале измеренной скорости, обусловленной методической погрешностью измерительного тракта, негативно сказывается на характере изменения управляющего сигнала силы тяги, поступающего на вход тягового привода. Для уменьшения влияния погрешности измерения скорости на процесс управления реализована фильтрация сигнала  $v_{\text{изм}}^*[nT]$  с использованием фильтра низких частот ФНЧ – фильтра Баттерворта 5-го порядка [7, 8]. В ходе ранее проведенных исследований выявлено, что применение такого фильтра, характеризующегося скоростью убывания его амплитудно-частотной характеристики, равной 100 дБ/дек в переходной полосе, обеспечивает необходимую фильтрацию измеренного сигнала  $v_{\text{изм}}^*[nT]$  и, как следствие, допустимый уровень таких показателей управляющего сигнала силы тяги, как скорость изменения и амплитуда.

Неидеальный импульсный элемент, установленный в структуре САУ после фильтра низких частот, обеспечивает преобразование отфильтрованного сигнала в цифровую форму. Далее цифровой сигнал измеренной скорости  $v_{\text{изм}}[nT]$  поступает на первый вход устройства сравнения (сумматора), реализующего операции вычисления с использованием поступающей на его второй вход информации о заданной в текущий момент времени скорости движения в виде сигнала  $v_{\text{зи}}[nT]$ , вырабатываемого задатчиком интенсивности ЗИ. Устройство ЗИ предназначено для плавного изменения значения заданной скорости  $v_3[nT]$  с темпом, пропорциональным величине заданного ускорения  $a_3 = 0,64$  м/с<sup>2</sup>. Формирование сигнала  $v_{\text{зи}}[nT]$  определяется следующей системой уравнений (4):

$$v_{\text{зи}}[nT] = \begin{cases} \text{если } v_3[nT] > v_3[(n-1)T], \text{ то} \\ v_{\text{зи}}[nT] = \begin{cases} v_3[(n-1)T] + a_3 \varepsilon T, \text{ если } v_3[(n-1)T] + a_3 \varepsilon T < v_3[nT], \\ v_3[nT], \text{ если } v_3[(n-1)T] + a_3 \varepsilon T \geq v_3[nT]; \end{cases} \\ \text{если } v_3[nT] < v_3[(n-1)T], \text{ то} \\ v_{\text{зи}}[nT] = \begin{cases} v_3[(n-1)T] - a_3 \varepsilon T, \text{ если } v_3[(n-1)T] - a_3 \varepsilon T > v_3[nT], \\ v_3[nT], \text{ если } v_3[(n-1)T] - a_3 \varepsilon T \leq v_3[nT]. \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

Устройство сравнения вычисляет рассогласование  $\Delta v[nT]$  между входными сигналами  $v_{\text{зи}}[nT]$  и  $v_{\text{изм}}[nT]$ . В дальнейшем значение  $\Delta v[nT]$  поступает на вход пропорциональной части устройства управления УУ, а также на вход множителя, обеспечивающего совместно с нелинейным элементом НЭ включение в работу интегральной с прогнозом рассогласования части УУ.

Устройство управления реализует пропорционально-интегральный с прогнозом рассогласования закон управления с переменной структурой [3, 9], что обеспечивает высокую точность поддержания скорости в установившемся режиме при использовании разработанной САУ (см. рис. 1), учитывающей методическую погрешность измерения. Выбор используемой в текущий момент времени модификации закона управления – пропорциональной или пропорционально-интегральной с прогнозом рассогласования – определяется режимом движения поезда. В случае переходного режима движения, соответствующего разгону или торможению, реализуется пропорциональный закон управления  $P^*$  (5) (блок П, рис. 1):

$$P^*[nT] = k_1 \Delta v[nT], \quad (5)$$

где  $k_1$  – коэффициент при пропорциональной части закона управления.

В случае, если режим движения электропоезда характеризуется как установившийся вследствие постоянства значения поддерживаемой скорости, УУ реализует пропорционально-интегральный с учетом прогноза рассогласования закон управления  $P^* + IE^*$  (блоки П и И+Э, рис. 1), где  $IE^*$  определяется как (6):

$$IE^*[nT] = \frac{1}{k_2} \sum_{i=0}^n \Delta v_i T + k_3 f_3[nT], \quad (6)$$

где  $k_2, k_3$  – коэффициенты соответственно при интегральной и прогнозной частях закона управления;

$f_3[nT] = \sum_{i=0}^M \Delta v[(n-M+i)T] L_i^{\text{э,кб,л}}$  – прогноз величины рассогласования скорости  $\Delta v[(n+1)T]$  в момент времени  $nT$  для следующего момента времени  $(n+1)T$ ;  $M$  – количество отсчетов, используемых экстраполятором при работе.

Условием, при котором осуществляется изменение структуры регулятора скорости, является выполнение соотношения между заданной и измеренной скоростями движения, причем это соотношение зависит от режима движения поезда – разгон (тяга) или замедление (торможение). При разгоне изменение структуры осуществляется при выполнении неравенства  $v_{\text{изм}} \geq (v_3 - 2)$  км/ч, а при торможении  $v_{\text{изм}} \leq (v_3 + 2)$  км/ч. Принятое в неравенствах значение «трубки» скорости, равное 2 км/ч, выбрано в результате проведения пробных расчетов и обосновано необходимостью заблаговременного накопления интегральной составляющей регулятора ошибки регулирования для наилучшей минимизации отклонения скорости движения поезда от заданной.

С учетом вышесказанного, в переходных режимах движения реализуется  $P^*$  закон управления (блок П, рис. 1), а при стабилизации скорости на заданном значении  $P^* + IE^*$  закон (блоки П и И+Э, рис. 1). В том случае, если в процессе движения в режиме стабилизации осуществляется изменение значения заданной скорости движения  $v_3$ , то выполняется переход от пропорционально-интегрального с прогнозом рассогласования закона управления к пропорциональному, при этом для повышения качества управления приравниваются нулю значения интегральной и прогнозной частей регулятора.

Обоснование выбора закона управления с переменной структурой будет рассмотрено ниже. Реализация выбора закона управления описана следующей системой уравнений (7):

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta v_1[nT] = |v_{\text{изм}}[nT] - v_3[nT]|; \\ y = \begin{cases} 0, & \text{если } \Delta v_1[nT] > 2, \\ 1, & \text{если } \Delta v_1[nT] \leq 2; \end{cases} \\ P^*[nT] = k_1 \Delta v[nT]; \\ IE^*[nT] = \begin{cases} \frac{1}{k_2} \sum_{i=0}^n \Delta v_i T + k_3 f_3[nT], & \text{если } y = 1, \\ 0, & \text{если } y = 0; \end{cases} \\ F_{\text{зад}}[nT] = P^*[nT] + IE^*[nT]. \end{array} \right. \quad (7)$$

Сигнал, пропорциональный заданному значению силы тяги  $F_{\text{зад}}[nT]$  с выхода УУ, преобразовывается из цифровой формы в аналоговую при помощи последовательно соединенных идеального импульсного элемента ИЭ<sub>T</sub> и экстраполятора нулевого порядка  $\frac{1 - e^{-pT}}{p}$ . Преобразованный сигнал  $F_{\text{зад}}(t)$  поступает на вход логического блока ЛБ, определяющего ограничения, накладываемые на тяговые и тормозные характеристики. С выхода ЛБ сигнал  $F'_{\text{зад}}$  поступает на вход тягового привода, модель которого представлена звеном 1-го порядка с передаточной функцией  $\frac{k}{T_{\text{т.э.п.}} p + 1}$ . Постоянная времени  $T_{\text{т.э.п.}} = 1,28$  с определена в соответствии с требованиями к величине допустимой плавности хода поезда в переходных режимах движения [10].

Для подтверждения эффективности работы во всем диапазоне допустимых скоростей движения пропорционально-интегрального с прогнозом рассогласования закона управления с переменной структурой осуществим сравнительный анализ результатов моделирования работы САУ скоростью с различной структурой закона управления. Используемыми режимами движения электропоезда за общее время моделирования  $t = 250$  с являются последовательный разгон до скоростей 30 км/ч и 140 км/ч с выполнением стабилизации при достижении каждого из заданных значения скорости. Выбор соответствующих значений  $v_3$  обоснован различной величиной реализуемой при разгоне силы тяги в соответствии с тяговой характеристикой электропоезда и накладываемыми на нее ограничениями на максимально возможное тяговое усилие. Отметим, что разгон с последующей стабилизацией для скорости 30 км/ч выполняется за интервал времени 0–50 с, а для 140 км/ч – от 50 до 250 с. Моделирование движения электропоезда осуществляется на площадке с целью оценки качества регулирования скорости в зависимости от структуры закона САУ, исключая при этом возможное влияние переменного профиля пути на процесс регулирования. В начале проводится моделирование работы системы с постоянной вне зависимости от режима движения структурой пропорционально-интегрального с прогнозом рассогласования закона управления, далее моделируется работа системы с законом управления, обладающим переменной структурой и функционирующим согласно (7). Значения параметров используемого закона управления САУ, а также частоты среза фильтра Баттерворта для каждого из вариантов моделирования будут найдены в результате решения задачи параметрической оптимизации системы.

#### **Критерии качества управления**

Использование разработанной структуры системы автоматического управления скоростью обосновано необходимостью соблюдения требований к устойчивости системы, а также выполнения требований показателей, характеризующих качество протекания процесса регулирования скорости в

переходных и установившемся режимах движения. В качестве используемых показателей качества выбраны следующие [11]: вид переходного процесса; время протекания переходного процесса  $t_{\text{пер}}$ , определяемое как время последнего входа регулируемой величины  $v_{\phi}$  в «трубку» скорости, равную  $\pm 1$  км/ч от значения  $v_3$ ; перерегулирование  $\sigma$ , максимальная допустимая величина которого по условиям соблюдения безопасности движения не должна превышать  $[\sigma] = 1$  км/ч; величина квадратичной интегральной ошибки  $I_{2\text{уст}}$ , определяемая в режиме стабилизации скорости (8):

$$I_{2\text{уст}} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \Delta v^2 dt}. \quad (8)$$

### **Задача параметрической оптимизации**

Удовлетворительное качество управления обеспечивается выбором рациональных значений параметров закона управления и фильтра низких частот, при этом показатели качества предъявляют различные требования к САУ, в т. ч. к значениям ее параметров. Для проведения параметрического синтеза системы с учетом соблюдения условия компромисса между показателями качества использована целевая функция свёртки – функция суммарных допустимых потерь (9):

$$\Pi = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left\{ \frac{U_i - U_i^*}{U_i^{**} - U_i^*} \right\}^2}, \quad (9)$$

где  $U_i^*$  – минимальное значение  $i$ -го критерия ( $i = 1, 2, \dots, m$ ), являющееся результатом расчета однокритериальной оптимизации по данному  $i$ -му критерию;

$U_i^{**}$  – максимальное или допустимое значение  $i$ -го критерия.

Минимальное значение целевой функции  $\Pi$  в результате решения задачи параметрической оптимизации САУ соответствует рациональным параметрам  $k_1, k_2, k_3, M, \omega_c$ , при которых совокупность принятых показателей качества принимает удовлетворительные значения. Поиск минимума  $\Pi$  реализован с использованием метода Нелдера – Мида [12].

В результате решения задачи параметрического синтеза САУ определены следующие рациональные значения параметров закона управления, а также частоты среза фильтра:

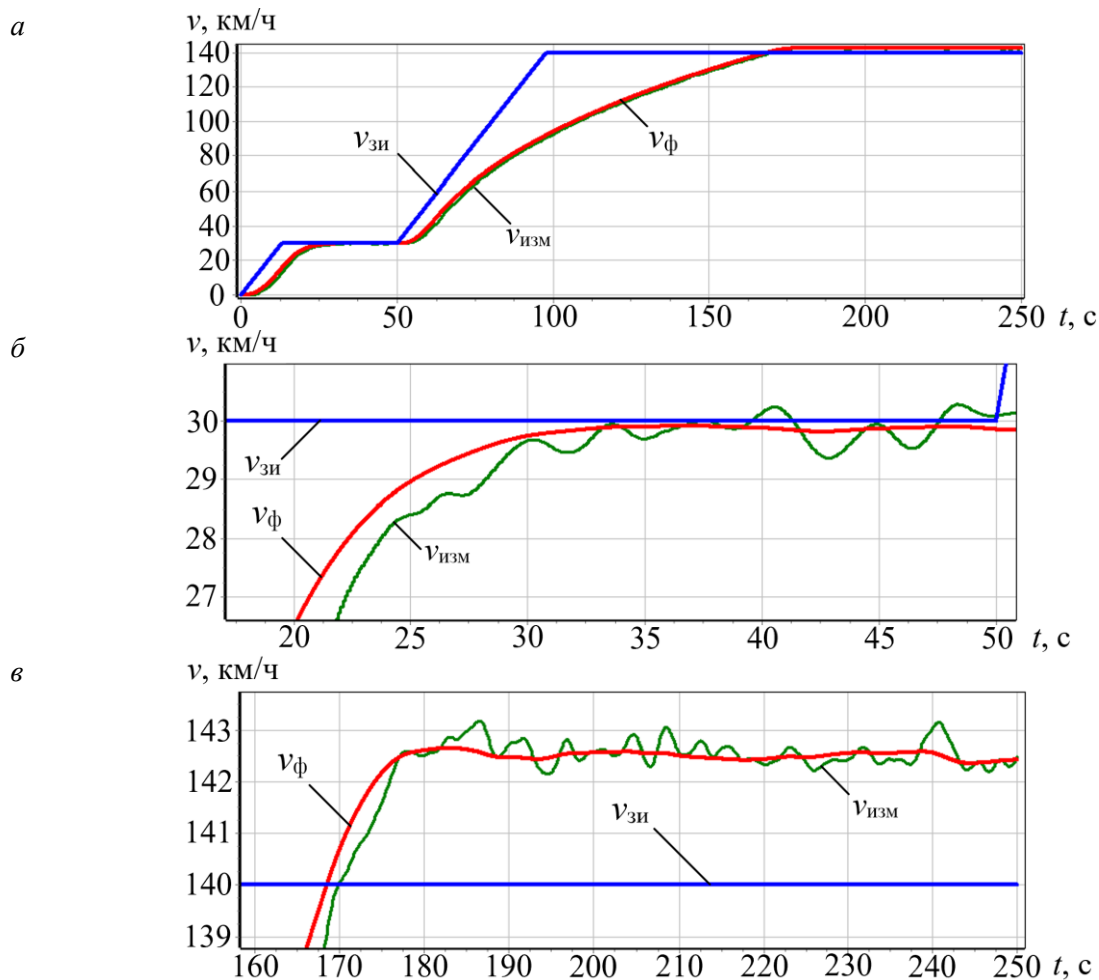
–  $k_1 = 36582$ ,  $k_2 = 0,0168021$ ,  $k_3 = 5739$ ,  $M = 36$ ,  $\omega_c = 6,11042$  Гц для САУ с постоянной структурой закона управления;

–  $k_1 = 58218$ ,  $k_2 = 0,0001004$ ,  $k_3 = 25789$ ,  $M = 24$ ,  $\omega_c = 6,33364$  Гц для САУ с переменной структурой закона управления.

Отметим следующие изменения значений параметров закона управления с переменной структурой по сравнению со значениями параметров при постоянной структуре: значение коэффициента при пропорциональной части  $k_1$  увеличилось в 1,6 раза; значение коэффициента при интегральной части  $k_2$  уменьшилось в 167 раз; коэффициент при прогнозной части  $k_3$  увеличился в 4,5 раза, при этом количество отсчетов  $M$ , используемых экстраполятором при работе уменьшилось в 1,5 раза. Значение частоты среза  $\omega_c$  в обоих случаях составило  $\approx 6$  Гц.

### **Результаты имитационного моделирования**

На рис. 2, а, б, в приведены результаты моделирования работы САУ скоростью с постоянной во всех режимах движения структурой закона управления, а именно: зависимости от времени заданной скорости с задатчика интенсивности  $v_{\text{зи}}(t)$ , измеренной скорости  $v_{\text{изм}}(t)$ , фактической скорости движения  $v_{\phi}(t)$ . Для оценки эффективности применяемой структуры рассмотрим фрагменты процесса моделирования, соответствующие участкам стабилизации скорости (рис. 2, б, в).



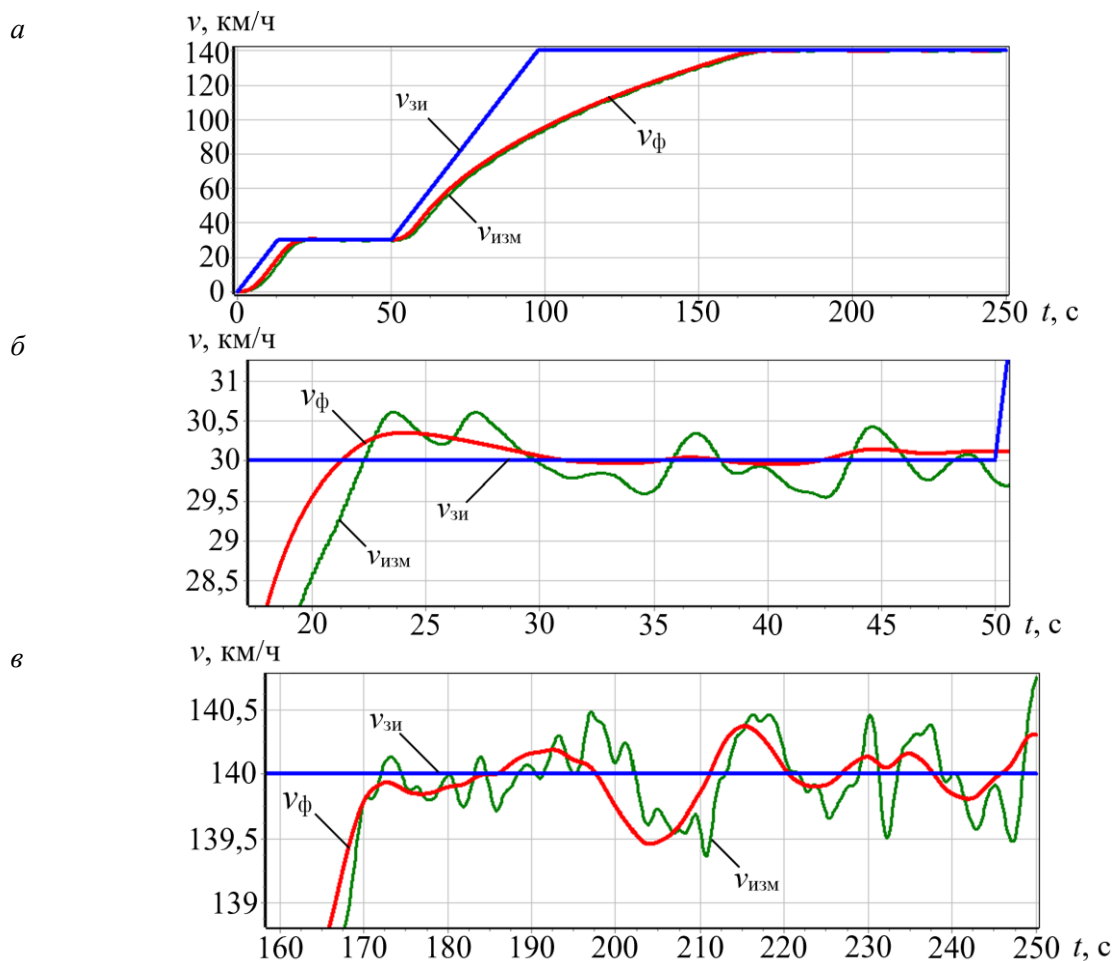
**Рис. 2. Результаты моделирования работы САУ скоростью с постоянной структурой закона управления:**

*a* – на интервале 0–250 с; *б* – на интервале 20–50 с; *в* – на интервале 160–250 с

Как видно на рис. 2, *б*, переходный процесс разгона электропоезда до заданной скорости  $v_3 = 30$  км/ч с дальнейшей стабилизацией на этом значении протекает удовлетворительно: время регулирования составляет  $t_{\text{рег}} = 24,262$  с; вид переходной функции регулируемой величины – монотонный, вследствие чего перерегулирование отсутствует; величина квадратичной интегральной ошибки в установившемся режиме  $I_{2\text{уст}} = 0,296$ .

На рис. 2, *в* приведены результаты расчёта, соответствующие режиму стабилизации скорости при  $v_3 = 140$  км/ч. Как видно, переходная функция является аperiodической. Значения показателей качества составили: величина квадратичной интегральной ошибки  $I_{2\text{уст}} = 2,411$ ; значение перерегулирования  $\sigma = 2,654$  км/ч и превышает допустимое по условиям безопасности  $[\sigma] = 1$  км/ч, причём время, в течение которого происходит ликвидация перерегулирования, превышает время моделирования. Вследствие накопленной интегральной ошибки за время расчёта переходный процесс не завершился ( $v_{\text{ф}}$  находится вне принятой «трубки» скорости), поэтому определение времени регулирования невозможно.

Результаты моделирования работы САУ скоростью при переменной в зависимости от режима движения структуре закона управления приведены на рис. 3, *a*, *б*, *в*.



**Рис. 3. Результаты моделирования работы САУ скоростью с переменной структурой закона управления:**

*а* – на интервале 0–250 с; *б* – на интервале 20–50 с; *в* – на интервале 160–250 с

Аналогично вышеприведенному рассмотрим каждый из этапов стабилизации скорости. Согласно рис. 3, б, вид переходного процесса при разгоне электропоезда до  $v_3 = 30$  км/ч является апериодическим с перерегулированием  $\sigma = 0,349$  км/ч; время регулирования составило  $t_{\text{рег}} = 19$  с, что более чем на 5 секунд меньше аналогичного показателя, полученного в предыдущем случае; величина интегральной ошибки уменьшилась с  $I_{2\text{уст}} = 0,296$  до  $I_{2\text{уст}} = 0,200$ , таким образом, возросла точность поддержания скорости в режиме стабилизации.

Результаты моделирования работы САУ, соответствующие участку стабилизации скорости на значении  $v_3 = 140$  км/ч, приведены на рис. 3, в. Качество регулирования скорости на рассматриваемом участке характеризуется следующими значениями показателей: вид переходной функции – монотонный, при этом дальнейшие колебания фактической скорости в диапазоне  $\pm 0,5$  км/ч обоснованы характером изменения отфильтрованного сигнала  $v_{\text{изм}}$ ; максимальное абсолютное отклонение составило  $\approx 0,5$  км/ч, что в 5,3 раза меньше по сравнению с предыдущим рассмотренным вариантом; т.к. переходной процесс был завершен, определено время регулирования  $t_{\text{рег}} = 116,632$  с; значение показателя величины квадратичной интегральной ошибки в установившемся режиме уменьшилось с  $I_{2\text{уст}} = 2,411$  (рис. 2, в) до  $I_{2\text{уст}} = 0,234$ .

Как видно из представленных результатов, применение закона управления с постоянной структурой недопустимо по причине невыполнения требований безопасности и требований, предъявляемых к показателям качества, при реализации движения электропоезда при высоких значениях заданной скорости.

В свою очередь, применение закона управления с переменной структурой значительно повышает качество управления в переходных и установившемся режимах движения, а именно: при малых скоростях движения значительно сокращается время регулирования (примерно на 22 %) и повышается точность поддержания скорости в установившемся режиме (примерно на 32,5 %); при больших скоростях движения

значительно повышается точность поддержания скорости в установившемся режиме (примерно на 90 %), вследствие чего значение максимального абсолютного отклонения регулируемой величины уменьшилось на 81 %.

### **Заключение**

Проведение сравнительного анализа результатов имитационного моделирования работы системы автоматического управления скоростью с различными модификациями закона управления подтвердило эффективность использования в качестве ее закона управления пропорционально-интегрального с прогнозом рассогласования с переменной структурой, при котором обеспечивается высокая точность регулирования и соблюдение требований безопасности во всем диапазоне допустимых скоростей.

Установлено, что для достижения удовлетворительного качества управления скоростью на протяжении всего движения электропоезда следует использовать в переходных режимах движения (разгон, торможение) пропорциональный закон управления, а в установившемся (при стабилизации скорости) пропорционально-интегральный с прогнозом рассогласования.

Таким образом, разработанная структура САУ скоростью рекомендована к использованию на современном моторвагонном подвижном составе.

### **Список литературы**

- 1 **Охотников, А. Л.** Проекты развития систем автоматического управления движением поездов / А. Л. Охотников, И. А. Волкова // Наука и технологии железных дорог. – 2023. – Т. 7, № 1 (25). – С. 25–31. – ISSN 2587-5752.
- 2 **ГОСТ Р 70059–2022.** Системы управления и контроля железнодорожного транспорта для перевозок пассажиров в пригородном сообщении : принципы построения и основные функциональные требования. – Москва : Российский институт стандартизации, 2022. – 16 с.
- 3 **Baranov, L. A.** Automatic Speed Control System for Commuter Electric Trains / L. A. Baranov, V. I. Legkaya, O. E. Pudovikov // Russian Electrical Engineering. – 2024. – Vol. 95, No. 9. – P. 773–779. – DOI 10.3103/S1068371224700986.
- 4 Расчеты и испытания тяжеловесных поездов : монография / Е. П. Блохин, Л. А. Манашкин, Е. Л. Стамблер [и др.]; под ред. Е. П. Блохина. – Москва : Транспорт, 1986. – 263 с.
- 5 Микропроцессорные системы автоведения электроподвижного состава / Л. А. Баранов, Я. М. Головичер, Е. В. Ерофеев, В. М. Максимов ; под ред. Л. А. Баранова. – Москва : Транспорт, 1990. – 272 с. – ISBN 5-277-00964-7.
- 6 **Баранов, Л. А.** Квантование по уровню и временная дискретизация в цифровых системах управления / Л. А. Баранов. – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 304 с. – ISBN 5-283-01520-3.
- 7 **Вадутов, О. С.** Электроника. Математические основы обработки сигналов : учебник и практикум для вузов / О. С. Вадутов. – Москва : Издательство Юрайт, 2022. – 307 с. – ISBN 978-5-9916-6551-3.
- 8 **Лэм, Г.** Аналоговые и цифровые фильтры: пер. с англ. / Г. Лэм. – Москва : Мир, 1982. – 589 с.

### **References**

- 1 **Okhotnikov, A. L.** Projects for the development of automatic train control systems / A. L. Okhotnikov, I. A. Volkova // Science and Technology of Railways. – 2023. – Vol. 7, No. 1 (25). – P. 25–31. – ISSN 2587-5752.
- 2 **GOST R 70059–2022.** Management and control systems of railway transport for passenger transportation in suburban traffic : principles of construction and basic functional requirements. – Moscow : Russian Institute of Standardization, 2022. – 16 p.
- 3 **Baranov, L. A.** Automatic Speed Control System for Commuter Electric Trains / L. A. Baranov, V. I. Legkaya, O. E. Pudovikov // Russian Electrical Engineering. – 2024. – Vol. 95, No. 9. – P. 773–779. – DOI 10.3103/S1068371224700986.
- 4 Calculations and tests of heavy trains : monograph / E. P. Blokhin, L. A. Manashkin, E. L. Stambler [et al.]; edited by E. P. Blokhin. – Moscow : Transport, 1986. – 263 p.
- 5 **Baranov, L. A.** Microprocessor-based systems for automatic control of electric rolling stock / L. A. Baranov, Y. M. Golovicher, E. V. Erofeev, V. M. Maksimov ; edited by L. A. Baranov. – Moscow : Transport, 1990. – 272 p. – ISBN 5-277-00964-7.
- 6 **Baranov, L. A.** Level quantization and time discretization in digital control systems / L. A. Baranov. – Moscow : Energoatomizdat, 1990. – 304 p. – ISBN 5-283-01520-3.
- 7 **Vadutov, O. S.** Electronics. Mathematical foundations of signal processing : textbook and workshop for universities / O. S. Vadutov. – Moscow : Yurait Publishing House, 2022. – 307 p. – ISBN 978-5-9916-6551-3.
- 8 **Lam, G.** Analog and digital filters: translated from English / G. Lam. – Moscow : Mir, 1982. – 589 p.

9 Легкая, В. И. Система автоматического управления скоростью с адаптацией к изменению режима движения электропоезда / В. И. Легкая, О. Е. Пудовиков // Исследования и развитие рельсового и автомобильного транспорта : сборник трудов Международной научно-практической конференции, Екатеринбург, 22–23 мая 2024 года. – Екатеринбург : УрГУПС, 2024. – С. 79–83. – ISBN 9785946145695.

10 Баранов, Л. А. Модели и методы синтеза микропроцессорных систем управления скоростью электроподвижного состава с непрерывным управлением тягой / Л. А. Баранов // Вестник МИИТа. – Вып. 10. – Москва : МИИТ, 2004. – С. 3–16.

11 Баранов, Л. А. Автоматизированные системы управления электроподвижным составом : учебник : в 3 ч. Ч. 1 : Теория автоматического управления / Л. А. Баранов, А. Н. Савоскин, О. Е. Пудовиков // под ред. Л. А. Баранова и А. Н. Савоскина. – Москва : ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2013. – 400 с. – ISBN 978-5-89035-616-1.

12 Химмельблау, Д. Прикладное нелинейное программирование : пер. с англ. / Д. Химмельблау. – Москва : Мир, 1975. – 534 с.

9 Legkaya, V. I. Automatic speed control system with adaptation to changes in the mode of movement of the electric train / V. I. Legkaya, O. E. Pudovikov. Research and development of rail and road transport : Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Yekaterinburg, May 22-23, 2024. – Yekaterinburg : UrGUPS, 2024. – P. 79–83. – ISBN 9785946145695.

10 Baranov, L. A. Models and methods of synthesis of microprocessor-based speed control systems for electric rolling stock with continuous traction control / L. A. Baranov // Bulletin of MIIT. – Issue 10. – 2004. – Vol. 95, No. 9. – P. 3–16.

11 Baranov, L. A. Automated control systems for electric rolling stock : textbook : in 3 parts. Part 1 : Theory of automatic control / L. A. Baranov, A. N. Savoskin, O. E. Pudovikov // Edited by L. A. Baranov and A. N. Savoskin. – Moscow : FSBEI “Educational and methodological Center for education in railway transport”, 2013. – 400 p. – ISBN 978-5-89035-616-1.

12 Himmelblau, D. Applied nonlinear programming : translated from English / D. Himmelblau. – Moscow : Mir, 1975. – 534 p.

*V. I. Legkaya, O. E. Pudovikov*

### IMPROVING THE STRUCTURE OF THE AUTOMATIC SPEED CONTROL SYSTEM OF AN ELECTRIC TRAIN

**Abstract.** The article considers the structure of the automatic speed control system for electric trains. The proportional-integral control law with a mismatch prediction is used, which ensures the required quality of control in steady-state and transient motion modes. The quality criteria for speed control are determined. By means of simulation modeling in the Embarcadero C++ Builder software environment, a comparative analysis of the efficiency of the automatic control system is carried out with different structures of its control law: constant (proportional-integral with a mismatch prediction is used in all motion modes) and variable (the proportional law is used during acceleration or braking, and the proportional-integral law with a mismatch prediction is used in the speed stabilization mode). For this purpose, the problem of parametric synthesis of the system is solved using the Nelder-Mead method, as a result of which rational values of the coefficients of the control law are found for each of its structures under study. It is established that the adaptation of the system control law to a change in the driving mode due to the use of its variable structure ensures an increase in the quality of electric train speed control.

**Keywords:** automatic control system, control law, simulation modeling, control quality, parametric synthesis.

**For citation:** Legkaya, V. I. Improving the structure of the automatic speed control system of an electric train / V. I. Legkaya, O. E. Pudovikov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2025. – No. 1. – P. 190–200. – DOI 10.46973/0201-727X\_2025\_1\_190.

**Сведения об авторах****Легкая Валерия Игоревна**

Российский университет транспорта  
(РУТ (МИИТ)),  
кафедра «Электропоезда и локомотивы»,  
аспирант,  
e-mail: tiger.rut@yandex.ru

**Пудовиков Олег Евгеньевич**

Российский университет транспорта  
(РУТ (МИИТ)),  
кафедра «Электропоезда и локомотивы»,  
доктор технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой,  
e-mail: olegep@mail.ru

**Information about the authors****Legkaya Valeria Igorevna**

Russian University of Transport (RUT (MIIT)),  
Chair «Electric Trains and Locomotives»,  
Postgraduate Student,  
e-mail: tiger.rut@yandex.ru

**Pudovikov Oleg Evgenievich**

Russian University of Transport (RUT (MIIT)),  
Chair «Electric Trains and Locomotives»,  
Doctor of Engineering Sciences,  
Associate Professor, Head of the Chair,  
e-mail: olegep@mail.ru