

УДК 629.4.053: 629.424.14(045)

## Система автоматического управления скоростью маневрового тепловоза в режиме горочной работы

С. Н. Журавлев<sup>1</sup>, О. Е. Пудовиков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), Российская Федерация, 140402, Коломна, ул. Октябрьской революции, 410

<sup>2</sup>Российский университет транспорта РУТ (МИИТ), Российская Федерация, 127994, Москва, ул. Образцова, 9

**Для цитирования:** Журавлев С. Н., Пудовиков О. Е. Система автоматического управления скоростью маневрового тепловоза в режиме горочной работы // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 2. — С. 181–194. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-181-194

### Аннотация

**Цель:** Показана актуальность разработки систем автоматического регулирования скорости маневровых тепловозов в режиме горочной работы. Приведено математическое описание электропередачи маневрового тепловоза типа ТЭМ7А как исполнительного элемента системы автоматического управления и поезда как объекта управления. Синтезирована функциональная схема системы управления, разработан принцип ее работы для удовлетворения основных требований, предъявляемых к маневровым тепловозам при работе на сортировочной горке. Синтезирован ПИ-регулятор скорости, параметры которого обеспечивают минимум интегральной ошибки скорости второго порядка. **Методы:** Оптимальные значения регулятора найдены с помощью метода Монте-Карло. **Результаты:** Приведены результаты имитационного моделирования. **Практическая значимость:** Установлено, что разработанная система управления обеспечивает плавное формирование переходных процессов и поддерживает заданное значение скорости в режимах надвига и роспуска состава в диапазоне скоростей до 15 км/ч, что способствует увеличению пропускной способности сортировочных горок нового поколения, оборудованных системами управления сортировочным процессом.

**Ключевые слова:** Скорость, маневровый тепловоз, система управления, электропередача, оптимизация, интегральная ошибка, моделирование.

### Введение

Маневровая работа тепловозов на станциях, оборудованных горками, сопряжена с низкой энергоэффективностью электропередачи в целом и силовой установки в частности, что связано с частыми сменами позиции контроллера машиниста и значительным временем работы в переходных режимах, причем конкретные характеристики и условия горочной работы имеют случайную природу и зависят от целого ряда факторов — уклоны горочных путей и переломы профиля, масса поступающих на переработку поездов, максимальная скорость движения при надвиге и роспуске и др. [1–3]. В настоящее время в большинстве случаев управление маневровым тепловозом при осуществлении горочной работы происходит в ручном режиме — качество формируемого переходного процесса, продолжительность работы на различных позициях контроллера машиниста, а следовательно,

и эффективность всего тепловоза определяются профессиональными качествами локомотивной бригады или машиниста. Следует отметить, что вопросы поддержания требуемых скоростей надвига и роспуска состава важны не только с точки зрения обеспечения высокой экономичности преобразования энергии в тепловозе, но и с точки зрения технологии расформирования состава, пропускной способности сопряженных железнодорожных путей и т. д.

Анализ научных работ в области автоматизации подвижного состава [4–7] и опыт эксплуатации электроподвижного состава показывают, что для решения задачи поддержания требуемых скоростей тепловоза целесообразно применение систем автоматического управления скоростью маневрового тепловоза. Основными трудностями при их разработке для тепловозов, предназначенных для работы на сортировочной горке, являются низкая скорость движения состава (не более 10–15 км/ч) и высокая точность ее поддержания.

Первый отечественный успешный опыт разработки автоматического регулятора скорости движения маневрового тепловоза принадлежит АО «ВНИКТИ», специалистами которого разработан алгоритм автоматического регулирования скорости и его интеграции в систему адаптивного комбинированного (по возмущению и отклонению регулируемой величины) управления силовой установкой тепловоза ТЭМ7А [8, 9]. Экспериментальные результаты его применения, полученные в парке приема сортировочной станции, показали, что он реализует возложенные на него задачи регулирования скорости в диапазоне 1,8–21,6 км/ч с точностью 0,18 км/ч. Особенностью разработанного регулятора является поисковый характер его работы, что приводит к вынужденным колебаниям переменных в системе управления и скорости движения, снижению плавности хода.

В данной работе авторами решена задача разработки и исследования системы автоматического управления скоростью маневрового тепловоза для горочной работы, обеспечивающей плавное формирование переходных процессов.

### **Математическая модель электропередачи маневрового тепловоза как исполнительного элемента**

Исполнительным элементом системы автоматического управления скоростью является электропередача маневрового тепловоза, упрощенная функциональная схема которой представлена на рис. 1.

Математическое описание дизеля как объекта теории автоматического управления осуществляется на основе второго закона Ньютона [10]:

$$\frac{d\omega_{\text{д}}}{dt} = \frac{M_{\text{и}} - M_{\text{м}} - M_{\text{н}}}{J}, \quad (1)$$

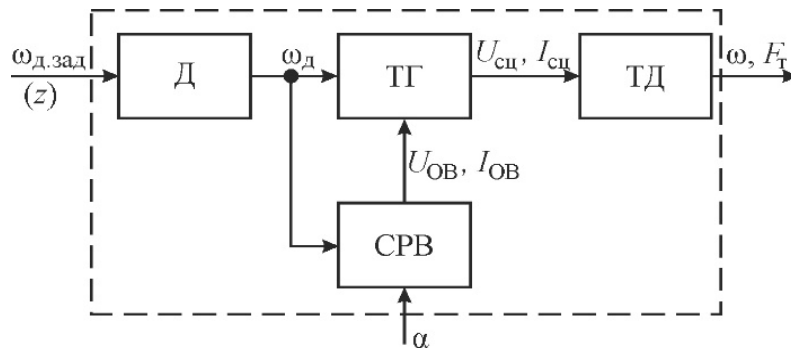


Рис. 1. Функциональная схема электропередачи маневрового тепловоза: Д — дизель; ТГ — тяговый генератор; ТД — тяговый двигатель; СРВ — система регулирования возбуждения ТГ;  $\omega_{д.зад}$ ,  $\omega_{д}$  — заданная частота вращения вала Д и фактическая частота вращения вала Д;  $z$  — выход штока силового сервомотора регулятора частоты вращения;  $U_{сц}$ ,  $I_{сц}$  — напряжение и ток обмотки якоря ТГ;  $U_{ОВ}$ ,  $I_{ОВ}$  — напряжение и ток обмотки возбуждения ТГ;  $\alpha$  — угол открытия тиристорov управляемого выпрямителя;  $\omega$  — частота вращения вала ТД;  $F_T$  — сила тяги

где  $M_{и}$  — индикаторный момент, вычисляемый по формуле:

$$\frac{dM_{и}}{dt} = \left( \frac{5}{\omega_{д}Z / 100} + 1 \right) \cdot \left( k_{и} \frac{Z}{2} - M_{и} \right); \tag{2}$$

$M_{м}$  — момент механических потерь:

$$M_{м} = k_{м} \omega_{д}^2; \tag{3}$$

$M_{н}$  — момент нагрузки:

$$M_{н} = \frac{U_{ТГ} I_{ТГ}}{\omega_{д}}, \tag{4}$$

здесь  $k_{м}$ ,  $k_{и}$  — эмпирические коэффициенты;

$U_{ТГ}$  — напряжение тягового генератора;

$I_{ТГ}$  — ток тягового генератора.

Система регулирования напряжения СРВ ТГ состоит из синхронного возбудителя, представляющего собой обращенную однофазную синхронную машину в режиме генератора, в обмотку ротора которой включен управляемый выпрямитель. Уравнение СРВ записывается на основании законов Фарадея, Кирхгофа и Ома:

$$U_{ОВ} = C_{в} \omega_{в} I_{вв} - I_{св} R_{св} - L_{св} \frac{dI_{св}}{dt}, \tag{5}$$

где  $C_{в}$  — электромагнитная постоянная возбудителя;

$\omega_{в}$  — частота вращения ротора возбудителя;

$I_{CB}$  — ток обмотки ротора возбудителя;

$I_{BB}$  — ток обмотки возбуждения возбудителя, который определяется по формуле:

$$L_{BB} \frac{dI_{BB}}{dt} = U_{BB} - I_{BB} R_{BB}, \quad (6)$$

где  $R_{CB}, L_{CB}, L_{BB}, R_{BB}$  — параметры эквивалентной схемы замещения синхронного возбудителя.

Ток обмотки возбуждения тягового синхронного генератора находим из выражения:

$$L_{OB} \frac{dI_{OB}}{dt} = \alpha k_{\alpha} U_{OB} - I_{OB} R_{OB}, \quad (7)$$

где  $k_{\alpha}$  — коэффициент преобразования управляемого преобразователя.

Выпрямленное напряжение обмотки якоря генератора аппроксимировано на основании реальной характеристики генератора, применяемого на тепловозе ТЭМ7А:

$$U_{cц} = \omega_{д} \begin{pmatrix} 0,209 I_{OB} - 1,021 \cdot 10^{-7} I_{cц} - 1,709 \cdot 10^{-3} I_{OB}^2 + 7,341 \cdot 10^{-7} I_{cц} I_{OB} - \\ -2,794 \cdot 10^{-7} I_{cц}^2 - 2,359 \cdot 10^{-8} I_{cц} I_{OB}^2 - 3,692 \cdot 10^{-11} I_{OB} I_{cц}^2 + \\ +4,969 \cdot 10^{-6} I_{OB}^3 + 2,888 \cdot 10^{-8} I_{cц}^3 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Ток силовой цепи ТД, состоящей из последовательно включенных обмоток якоря и возбуждения, определяется из уравнения:

$$(L_{OB,ТД} + L_{OЯ,ТД}) \frac{dI_{cц}}{dt} = U_{cц} - C_{ТД} \omega I_{cц} - I_{cц} (R_{OB,ТД} + R_{OЯ,ТД}), \quad (9)$$

Момент ТД:

$$M_{ТД} = 0,0029 I_{cц}^2 + 4,465 I_{cц} - 19,519. \quad (10)$$

Частота вращения вала ТД:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_{ТД} - M_c}{J_{\Sigma}}. \quad (11)$$

Сила тяги:

$$F_T = \frac{2M_{ТД}\mu_{ред}\eta_{ред}}{D_{кп}}, \quad (12)$$

где  $\mu_{ред}$ ,  $\eta_{ред}$  — передаточное отношение и КПД тягового редуктора;  
 $D_{кп}$  — диаметр колес колесной пары.

### Математическая модель поезда как объекта управления

Математическая модель поезда должна отражать преобразование силы тяги  $F_k$  или торможения  $B$  в перемещение поезда со скоростью  $V$ . Основное уравнение движения:

$$(P + Q) \frac{dv}{dt} = F_k - (W_0 + W_d) - B, \quad (13)$$

где  $P$  — масса тепловоза;

$Q$  — масса вагонов;

$W_0$  — сила основного сопротивления движению;

$W_d$  — сила дополнительного сопротивления движению.

Основное сопротивление движению определяется как сумма сопротивления движению вагонов (масса вагонов пересчитывается на каждом шаге для случаев отцепы) и тепловоза:

$$W_0 = \frac{w' \cdot P + w'' \cdot Q}{P + Q}, \quad (14)$$

где  $w'$ ,  $w''$  — основные удельные сопротивления движению тепловоза и вагонов, определяемые в функции скорости поезда и числа осей вагонов.

Сила дополнительного сопротивления движению учитывает сопротивление поезда от уклона с учетом положения на продольном профиле центра масс каждого вагона и тепловоза и сопротивление поезда от кривой с учетом положения центра тепловоза или вагона в кривой.

### Синтез структурной схемы системы управления

В результате анализа условий горочной работы основными требованиями, предъявляемыми к системе автоматического управления скоростью маневрового тепловоза, являются:

- осуществление процессов разгона/торможения с заданными показателями качества переходного процесса;
  - поддержание заданной скорости движения при изменении профиля пути, массы поезда и т. д.;
  - обеспечение ограничений в тяговом электроприводе и дизель-генераторной установке;
  - реализация взаимодействия между электрическим и электропневматическими тормозами;
  - возможность интеграции системы автоматического управления скоростью в топологию существующих информационных систем тепловоза, автоматических локомотивных сигнализаций, систем автоматизации сортировочных станций и т. д.
- Выполнение первых двух требований достигается выбранной структурой системы управления и структурой регулятора скорости и значениями его параметров, в то время как выполнение остальных требований обеспечивается структурой и алгоритмом работы только системы управления. Функциональная схема системы автоматического управления скоростью, разработанная с учетом приведенных требований, показана на рис. 2.

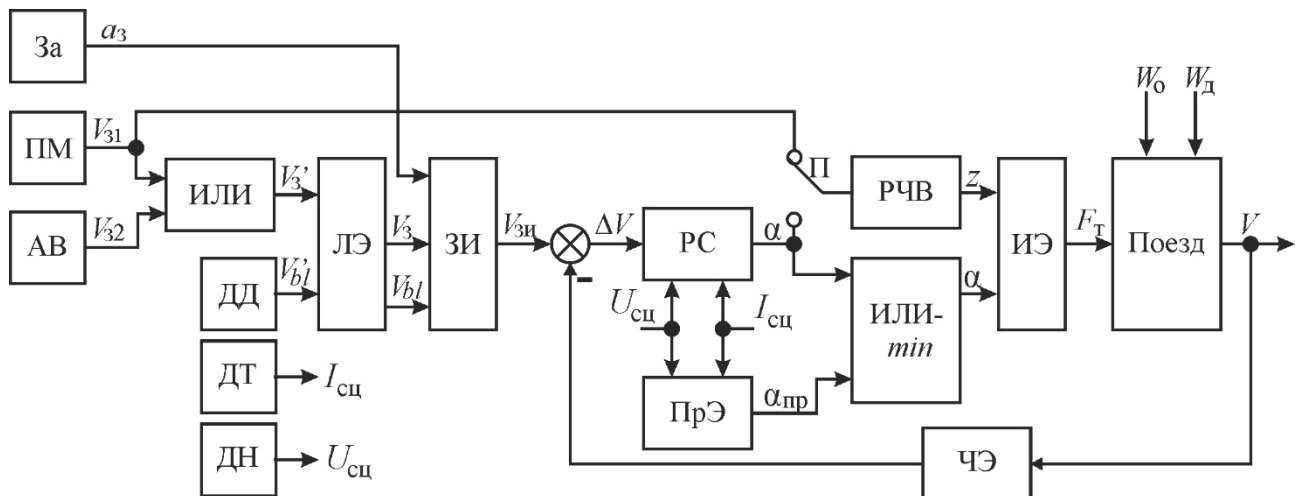


Рис. 2. Функциональная схема системы автоматического управления скоростью: ПМ — пульт машиниста;  $N_{км}$  — позиция контроллера машиниста; АВ — система автоведения;  $V_{31}$ ,  $V_{32}$ ,  $V_{3и}$ ,  $V_3'$ ,  $V_3$  — заданные значения скорости;  $V$  — фактическая скорость поезда; ИЛИ, ИЛИ-min — логические элементы; ЛЭ — логический элемент;  $V_{bl}'$  — сигнал от датчика давления в тормозных цилиндрах; ЗИ — задатчик интенсивности;  $Z_a$  — задатчик ускорения пульта машиниста;  $\Delta V$  — рассогласование между значениями  $V_{3и}$  и  $V$ ; ЧЭ — чувствительный элемент (датчик скорости); ИЭ — исполнительный элемент; ПрЭ — программный элемент; ДН, ДТ — датчики напряжения и тока; РС — регулятор скорости поезда; ДД — дискретный датчик блокировки режима тяги

Система содержит пульт машиниста, с помощью которого возможно дискретное задание скорости  $V_{31}$ , соответствующее позиции контроллера машиниста  $N_{км}$ ; вышестоящую систему автоведения АВ, которая вводит заданное значение скорости  $V_{32}$ ; элемент ИЛИ, на выходе которого величина скорости  $V_3'$  соответствует одному из двух значений  $V_{31}$  или  $V_{32}$ . Логический элемент ЛЭ необходим для блокирования режимов тяги и торможения в случае включения пневматического тормоза в обход системы автоматического управления скоростью, что сигнализируется сигналом  $V_{bl}'$ . В систему введен задатчик интенсивности ЗИ, обеспечивающий плавное изменение задания на скорость  $V_{зи}$  до уровня  $V_3$  с ускорением  $a_3$ , задаваемым задатчиком ускорения  $Z_a$  пульта машиниста, и выполнение ограничения по плавности хода в переходных режимах движения поезда. Элемент сравнения вычисляет рассогласование  $\Delta V$  между значением скорости  $V_{зи}$  и фактической скоростью поезда  $V$ , измеренной чувствительным элементом ЧЭ (датчиком скорости). Для регулирования частоты вращения вала дизеля применен регулятор РЧВ, выход которого  $z$  является управляющим входом для дизеля Д (рис. 1), входящего в состав исполнительного элемента ИЭ. Переключатель П осуществляет подключение РЧВ к пульта машиниста или выходу регулятора скорости в зависимости от используемого режима работы тепловоза. Регулятор скорости поезда РС рассчитывает второй управляющий сигнал, подаваемый на ИЭ, — угол открытия тиристоров  $\alpha$  управляемого выпрямителя системы регулирования возбуждения ТГ (рис. 1). Программный элемент ПрЭ учитывает информацию об ограничениях тягового генератора по напряжению  $U_{сц}$  и току  $I_{сц}$ , для чего в систему введены соответствующие датчики ДН и ДТ. Элемент ИЛИ- $\min$  выбирает из двух сигналов  $\alpha$  и  $\alpha_{пр}$  наименьший и подает его ИЭ.

### **Синтез регулятора скорости и алгоритма работы системы автоматического управления скоростью**

К основным показателям качества, применяемым при оценке переходного процесса на транспорте, относят ошибку в установившемся режиме, т. е. после завершения переходного процесса, колебательность переходного процесса, перерегулирование и др. Зачастую вид и параметры регулятора или алгоритма управления, обеспечивающие оптимальные значения одного из показателей качества, приводят к неудовлетворительным значениям другого (например, система управления, синтезированная в работе [8], обеспечивает требуемую ошибку в установившемся режиме, но вызывает колебательный характер переходного процесса), т. к. достижение желаемых величин различных показателей качества — задача противоречивая. Дополнительную трудность составляет нелинейность объекта управления и исполнительного элемента, из-за чего применение стандартных настроек подчиненных или модальных контуров регулирования автоматического

управления не обеспечит требуемых показателей качества и устойчивости во всем диапазоне изменения задающих и возмущающих воздействий.

Для решения возникших противоречий выберем в качестве целевой функции интегральную оценку второго порядка:

$$I_2 = \int_0^{\infty} (V(\infty) - V(t))^2 dt, \quad (15)$$

где  $V(\infty)$  и  $V(t)$  — это скорости тепловоза при времени  $t \rightarrow \infty$  и в текущий момент времени  $t$ .

Выражение (1) запишем в дискретном виде:

$$I_2 = \sum_0^{t_{\text{пп}}} (V(t_{\text{пп}}) - V_i)^2, \quad (16)$$

где  $V(t_{\text{пп}})$  — скорость тепловоза при завершении переходного процесса;  
 $V_i$  — скорость тепловоза в  $i$ -й момент времени.

В качестве регулятора скорости применим пропорционально-интегральный регулятор (ПИ-регулятор), передаточная функция которого имеет вид:

$$W_{\text{pc}}(p) = k_{\text{pc}} + \frac{1}{\tau_{\text{pc}} p}, \quad (17)$$

где  $k_{\text{pc}}$ ,  $\tau_{\text{pc}}$  — коэффициент усиления и постоянная времени регулятора соответственно.

Варьируемыми параметрами будут являться параметры регулятора  $k_{\text{pc}}$  и  $\tau_{\text{pc}}$ .

Очевидно, что варьируемые параметры регулятора необходимо менять таким образом, чтобы интегральная оценка  $I_2 \rightarrow \min$ .

В настоящее время существует большое количество методов оптимизации, позволяющих с высокой точностью определить точки того или иного оптимума. В данной работе для нахождения экстремума интегральной ошибки применим метод Монте-Карло, который является статистическим методом решения глобальной оптимизации. Для определения минимума интегральной оценки задаем значения параметров регулятора скорости  $k_{\text{pc}}$  и  $\tau_{\text{pc}}$  случайным образом, проводим итерационные расчеты и находим величину  $I_2$ . При достаточно большом количестве расчетов метод Монте-Карло гарантирует нахождение глобального минимума с высокой вероятностью. Для повышения качества управления целесообразно подобные расчеты провести для различных масс поездов и профилей пути, что, учитывая специфику работы на сортировочных горках, не потребует значительных затрат времени и ресурсов. Это позволит адаптировать систему управления к изменениям возмущающих воздействий в широком диапазоне.



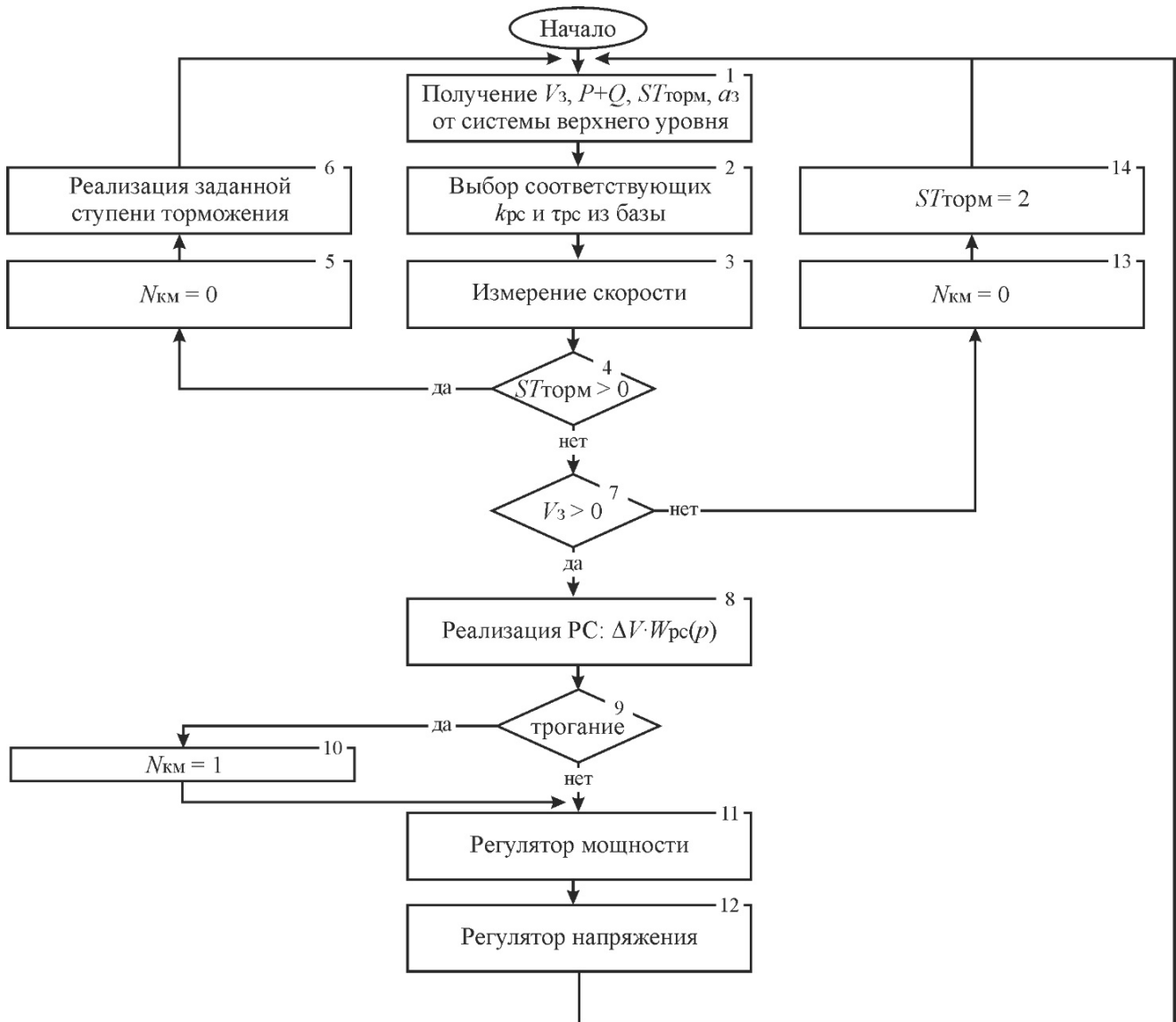


Рис. 3. Схема алгоритма управления тепловозом в режиме поддержания скорости

Алгоритм работы системы показан на рис. 3. В блоке 1 система автоматического управления скоростью получает от систем верхнего уровня заданную скорость, массу поезда, степень торможения  $ST_{\text{торм}}$ , а также интенсивность разгона. В блоке 2 в зависимости от массы поезда выбираются соответствующие параметры регулятора  $k_{pc}$  и  $\tau_{pc}$ , определенные заранее. В блоке 3 производится измерение скорости движения локомотива. В блоке 4 анализируется заданная степень торможения от системы верхнего уровня. При заданной степени более 0 в блоках 5 и 6 осуществляется сброс тяговой позиции и реализация заданных ступеней торможения. В блоке 7 анализируется заданная скорость движения локомотива и при нулевом значении в блоке 14 осуществляется реализация

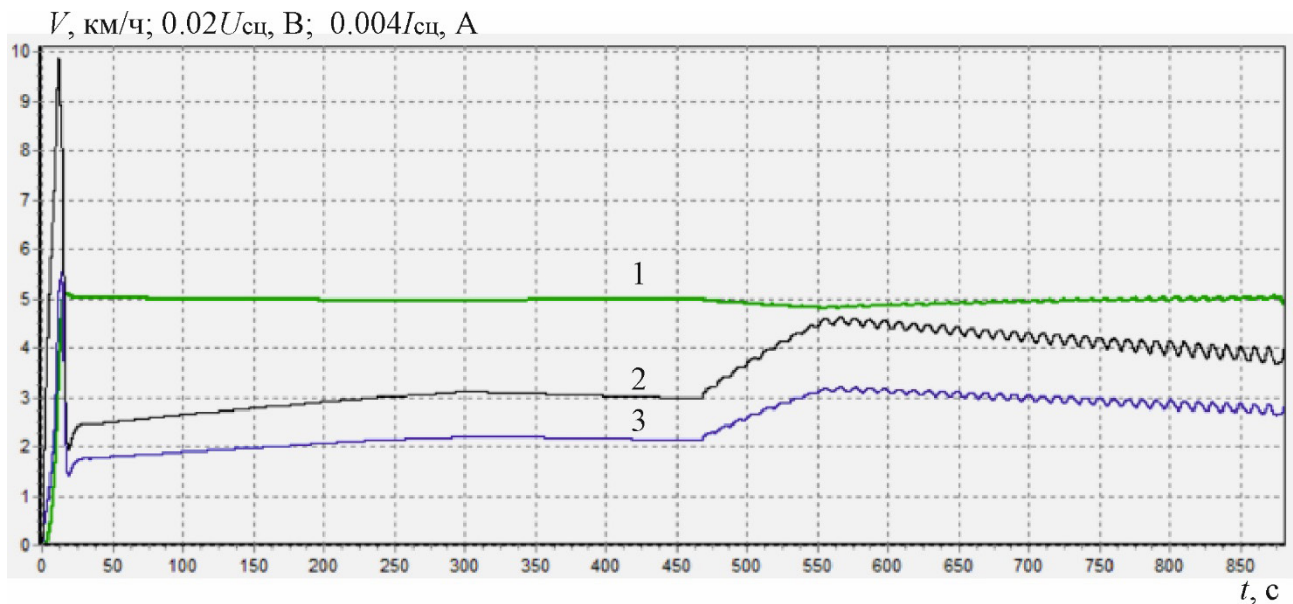
второй ступени торможения для удержания состава на месте. В блоке 8 реализован пропорционально-интегральный закон регулирования для расчета  $U_{\text{зад}}$ . Блок 9 необходим для перевода локомотива в режим «тяга». В блоках 11 и 12 реализуются регулятор мощности и регулятор напряжения ТГ соответственно. Регулятор мощности генератора на основании текущих значений напряжения  $U_{\text{сц}}$  и тока  $I_{\text{сц}}$  осуществляет функции ограничения задания при превышении угла управления тиристорами значения  $\alpha_{\text{пр}}$ . Регулятор напряжения является подчиненным регуляторам скорости и мощности, но формально входит в его состав. На первом шаге в регулятор напряжения осуществляется ввод фактического и заданного значений напряжения тягового генератора, далее определяется величина рассогласования (между заданным и фактическим значением напряжения), по значению осуществляется регулирование напряжения через задание угла открытия тиристорov.

### Результаты моделирования и их обсуждение

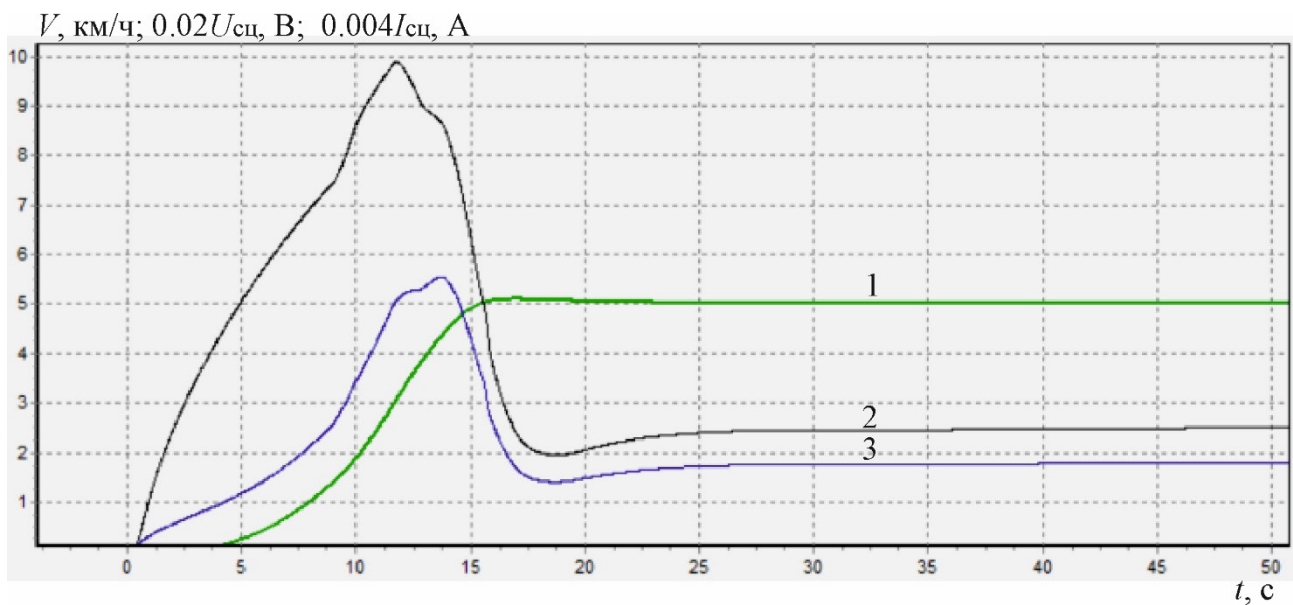
Моделирование разработанной системы было проведено для тепловоза типа ТЭМ7А. Модель электропередачи соответствует уравнениям (1) – (11), модель поезда — (12), (13); структура системы управления соответствует схеме (рис. 2), алгоритмы работы системы управления и регулятора скорости — алгоритму (рис. 3).

Было выполнено имитационное моделирование для различных вариантов профилей сортировочных путей, расстояний до горба горки (от 200 до 770 м), масс состава (от 800 до 6400 т), количества вагонов (от 20 до 80), диапазон заданий скорости принимался от 2 до 10 км/ч. В результате получены зависимости интегральной ошибки от значений параметров РС. Для примера на рис. 4, а приведены временные зависимости скорости  $V$ , тока  $I_{\text{сц}}$  и напряжения  $U_{\text{сц}}$  силовой цепи для поезда массой 2560 т (в составе поезда 32 вагона по 80 т), показывающие отработку синтезированной системы автоматического управления задания скорости  $V_3 = 5$  км/ч при роспуске состава (процесс роспуска начинается в момент времени  $t = 550$  с). Значения параметров РС  $k_{\text{pc}} = 20$ ,  $\tau_{\text{pc}} = 117,6$  с обеспечивают минимум функции  $I_2 = 429,1$  в переходном процессе разгона (рис. 4, б).

Несмотря на колебания тока и напряжения, возникающие при отцепе вагонов, регулятор скорости отрабатывает эти возмущения с максимальной динамической ошибкой менее 0,15 км/ч, установившаяся же ошибка асимптотически стремится к нулю. Время регулирования в достаточно сильной степени определяется прежде всего массой состава и составляет 20–200 с. Применение задатчика интенсивности совместно с ПИ-регулятором скорости позволило сформировать плавные переходные процессы во всем диапазоне изменения задающих и возмущающих воздействий.



*a*



*б*

Рис. 4. Временные зависимости скорости  $V$  (1), тока  $I_{sc}$  (2) и напряжения  $U_{sc}$  (3) силовой цепи тягового электропривода тепловоза ТЭМ7А в процессе разгона и роспуска состава

### Заключение

В результате проведенных исследований разработаны структура и алгоритм работы системы автоматического управления скоростью тепловоза ТЭМ7А в режиме горочной работы. Исполнительным элементом системы является электропередача тепловоза, лимитирующими параметрами — ток и напряжение тягового генератора. В качестве регулятора скорости применен ПИ-регулятор,

обеспечивающий минимум интегральной ошибки скорости второго порядка. Адаптивность регулятора к различным условиям эксплуатации по массе состава, диапазону рабочих скоростей обеспечивается выбором соответствующих значений параметров регулятора, найденных с помощью метода оптимизации Монте-Карло. В результате проведенных имитационных экспериментов установлена работоспособность разработанных решений, синтезированные система управления и регулятор скорости могут быть рекомендованы для применения на маневровых тепловозах, занятых горочной работой.

### Библиографический список

1. Кузнецова И. А. Оценка технико-энергетической эффективности работы маневровых тепловозов путем моделирования рабочих процессов оборудования в режимах эксплуатации: специальность 05.22.07: «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»: дисс. ... канд. техн. наук / И. А. Кузнецова; АО. — М.: Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта, 2018. — 168 с.
2. Щуров Н. И. Анализ режимов работы силовых установок маневровых тепловозов / Н. И. Щуров, Е. Г. Гурова, С. В. Макаров и др. // Современные проблемы науки и образования. — 2014. — № 3. — С. 104.
3. Шелухин В. И. Автоматизация и механизация сортировочных горок / В. И. Шелухин. — М.: Маршрут, 2005. — 240 с.
4. Тун А. З. Система автоматического управления скоростью движения электропоезда городской транспортной системы города Янгон: специальность 05.13.06: «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами»: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / А. З. Тун. — М.: Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ), 2016. — 24 с.
5. Пудовиков О. Е. Система автоматического регулирования движения перспективного электропоезда: специальность 05.09.03: «Электротехнические комплексы и системы, включая их управление и регулирование»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / О. Е. Пудовиков. — М.: Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ), 2000. — 134 с.
6. Пудовиков О. Е. Система автоматического управления скоростью грузового поезда с распределенной тягой / О. Е. Пудовиков, В. Г. Сидоренко и др. // Электротехника. — 2019. — № 9. — С. 47–54.
7. Dong H. Automatic Train Control System Development and Simulation for High-Speed Railways / H. Dong, B. Ning, B. Cai et al. // IEEE circuits and systems magazine. — 2010. — Vol. 10. — Iss. 2.
8. Журавлев С. Н. Система управления силовой установкой маневрового тепловоза с алгоритмом автоматического регулирования скорости / С. Н. Журавлев // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. — 2021. — № 3–4. — С. 31–38.

9. Патент № 2616111 Российская Федерация, МПК В60L 15/20 (2006.01), В60L 11/02 (2006.01). Способ регулирования скорости движения тепловоза с электрической передачей: № 2016103650: заявл. 04.02.2016: опубл. 12.04.2017 / С. И. Ким, С. Н. Журавлев, А. А. Пронин и др.; заявитель ОАО «Российские железные дороги». — 9 с.

10. Марков В. А. Моделирование системы автоматического регулирования частоты вращения дизельного двигателя / В. А. Марков и др. // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2019. — № 7. — С. 35–46.

Дата поступления: 30.04.2023

Решение о публикации: 20.05.2023

### Контактная информация:

ЖУРАВЛЕВ Сергей Николаевич — заместитель главного инженера; s\_zhuravlev@mail.ru

ПУДОВИКОВ Олег Евгеньевич — д-р техн. наук, доц., зав. кафедрой; olegp@mail.ru

## Automatic Speed Control System of a Hump-Shunting Diesel Locomotive

S. N. Zhuravlev<sup>1</sup>, O. E. Pudovikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock, 410, Oktyabrskoy Revolutsii str., Kolomna, 140402, Russian Federation

<sup>2</sup>Russian University of Transport RUT (MIIT), 9/9, Obraztsova str., Moscow, 127994, Russian Federation

**For citation:** Zhuravlev S. N., Pudovikov O. E. Automatic Speed Control System of a Hump-Shunting Diesel Locomotive. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 2, pp. 181–194. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-181-194

### Summary

**Purpose:** The importance of developing automatic speed control systems for hump-shunting diesel locomotives is demonstrated. Using as an example a shunting diesel locomotive of Type TEM7A a mathematical description is provided of electric power transmission as a final controlling element of the automatic control system and of a train as a control object. A flow-chart of the control system is generated and the system's principle of operation is designed so as to ensure the main requirements to the hump-shunting locomotives are met. The PI speed controller is developed with parameters that provide for a maximum second-order integral accuracy of speed control. **Methods:** Controller's optimum values are found using the Monte Carlo simulation. **Results:** The results of a simulation modeling are presented. **Practical significance:** The designed control system is found to ensure a smooth transient response and to maintain a given value of speed within the range of 15 km/h when pushing over a hump or at breaking up, providing for an increased shunting capacity of new generation hump yards featuring shunting control systems.

**Keywords:** Speed, shunting diesel locomotive, control system, electrical power transmission, optimization, integral inaccuracy, modeling.

## References

1. Kuznetsova I. A. *Otsenka tekhniko-energeticheskoy effektivnosti raboty manevrovyykh teplovozov putyom modelirovaniya rabochikh protsessov oborudovaniya v rezhimakh ekspluatatsii* [Evaluating technical and energy efficiency of shunting diesel locomotives through modeling equipment operating procedures under operating conditions]. Moscow: AO “VNIIZhT” (Rail Research Institute of JSC Russian Railways) Publ., 2018, 168 p. (In Russian)
2. Shchurov N. I., Gurova E. G., Makarov S. V. et al. Analiz rezhimov raboty silovyykh ustanovok manevrovyykh teplovozov [Analysis of operating conditions of shunting diesel locomotive power plants]. *Sovremennyye problem nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education]. 2014, Iss. 3, p. 104. (In Russian)
3. Shelukhin V. I. *Avtomatizatsiya i mekhanizatsiya sortirovochnyykh gorok* [Hump yards automation and mechanization]. Moscow: Marshrut Publ., 2005. 240 p. (In Russian)
4. Tun A. Z. *Sistema avtomaticheskogo upravleniya skorostyu dvizheniya elektropoyezda gorodskoy transportnoy systemy goroda Yangon* [An automatic speed control system of an electric train of the Yangon city transport infrastructure]. Moscow: FGAOU VO RUT (MIIT) (Russian University of Transport) Publ., 2016, 24 p. (In Russian)
5. Pudovikov O. Ye. *Sistema avtomaticheskogo regulirovaniya dvizheniya perspektivnogo elektropoyezda* [An advanced electric train automatic speed control system]. Moscow: FGAOU VO RUT (MIIT) (Russian University of Transport) Publ., 2000, 134 p. (In Russian)
6. Pudovikov O. Ye., Sidorenko V. G., Sidorova N. N. et al. Sistema avtomaticheskogo upravleniya skorostyu gruzovogo poyezda s raspredelennoy tyagoy [An automatic speed control system of a distributed power freight train]. *Elektrotekhnika* [Electrical engineering]. 2019, Iss. 9, pp. 47–54. (In Russian)
7. Dong H., Ning B., Cai B. et al. Automatic Train Control System Development and Simulation for High-Speed Railways. *IEEE circuits and systems magazine*, 2010, vol. 10, Iss. 2.
8. Zhuravlev S. N. Sistema upravleniya silovoy ustanovki teplovoza s avtomaticheskim regulirovaniyem skorosti [A shunting diesel locomotive power plant control system featuring an automatic speed control algorithm]. *Avtomatizatsiya i modelirovaniye v proyektirovanii i upravlenii* [Automation and modeling in design and management]. 2021, Iss. 3–4, pp. 31–38. (In Russian)
9. Kim S. I., Zhuravlev S. N., Pronin A. A. et al. *Sposob regulirovaniya skorosti dvizheniya teplovoza s elektricheskoy peredachey* [A method for controlling the speed of a locomotive with electric transmission]. Patent RF, no. 2616111, 2016. (In Russian)
10. Markov V. A., Pozdnyakov E. F., Furman V. V. et al. Modelirovaniye sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya chastoty vrashcheniya dizelnogo dvigatelya [Modeling automatic rotation frequency control systems of a diesel engine]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering]. 2019, Iss. 7, pp. 35–46. (In Russian)

Received: April 30, 2023

Accepted: May 20, 2023

### Author’s information:

Sergey N. ZHURAVLEV — Deputy Chief Engineer; s\_zhyravlev@mail.ru

Oleg E. PUDOVNIKOV — Dr. Sci. in Engineering, Assistant Professor, Head of the Department; olegp@mail.ru