

656.212.5(043.3)

Б 918

Министерство путей сообщения

ВСЕСОЮЗНЫЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

---

На правах рукописи

**БУРЧЕНКОВ**  
Валерий Васильевич

УДК 656.212.5.073:658.011.561:629.42.053(043.3)

**СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ  
ГОРОЧНЫМ ТЕПЛОВОЗОМ С ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ**

Специальность 05.13.07 — Автоматизация технологических  
процессов и производств (транспорт)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва  
1985

✓



Работа выполнена во Всесоюзном ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательском институте железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ).

Научный руководитель — доктор технических наук, профессор  
**Л. А. Баранов.**

Научный консультант — кандидат технических наук  
**Н. М. Фонарев.**

Официальные оппоненты — доктор технических наук, профессор  
**Е. М. Шафит,**  
кандидат технических наук, стар-  
ший научный сотрудник  
**В. И. Астрахан.**

Ведущее предприятие — Управление Свердловской железной  
дороги.

Защита состоится « . . . » . . . . . 1986 г. в . . . . . часов  
на заседании специализированного совета К 114.01.01 при Всесоюз-  
ном научно-исследовательском институте железнодорожного транс-  
порта по адресу: Москва И-164, 129851, 3-я Мытищинская ул.,  
д. 10, в Малом конференц-зале института.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.  
. . . . . нные пе-



Актуальность проблемы. В соответствии с решениями XXVI съезда КПСС, последующих Пленумов ЦК КПСС, Основными направлениями экономического и социального развития СССР на 1986-1990 годы и на период до 2000 года одной из важнейших задач является дальнейшее совершенствование транспортного обслуживания народного хозяйства, повышение провозной и пропускной способности железных дорог за счет комплексной механизации и автоматизации технологических процессов.

Для решения поставленных задач, наряду с другими мерами предусматривается интенсифицировать разработку и внедрение на сортировочных станциях автоматизированных систем управления, в том числе и системы телемеханического управления горочным тепловозом (ТГЛ).

Учитывая необходимость дальнейшего увеличения перерабатывающей способности сортировочной горки и высокую эффективность внедрения системы ТГЛ, задача повышения ее качественных показателей и расширения функциональных возможностей приобретает особо важное значение.

Особенностью ТГЛ, состоящей из телемеханической аппаратуры и системы автоматического управления горочным тепловозом (САУ ГТ), является повторно-кратковременный характер операций по увеличению и уменьшению скорости распуска с изменением массы состава в процессе расформирования. Необходимость повышения темпа расформирования составов в этих условиях предъявляет к показателям качества функционирования САУ ГТ повышенные требования.

Анализ отечественного и зарубежного опыта разработок систем автоматического регулирования (САР) скорости показал перспективность автоматизации управления дизелем локомотива в сочетании с управлением тяговым генератором.

131238  
1998НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ  
БИБЛИОТЕКА БелНИИЖТа



Недостатками известных САР скорости являются: наличие колебательного процесса в контуре управления дизелем при окончании расформирования состава; значительное время работы системы регулирования в переходных неэкономичных режимах; существенные величины перерегулирования и наличие колебательного процесса регулирования скорости, что может приводить в ряде случаев к повторной сцепке. Указанные недостатки могут быть преодолены путем выбора законов управления САУ ГТ с учетом особенностей процесса надвига и роспуска составов; проведения параметрической оптимизации управляющего устройства. Решение данных вопросов позволит сократить время расформирования составов, уменьшить расход топлива горючим локомотивом, повысить безопасность движения и улучшить условия труда машиниста локомотива за счет освобождения его от многократно повторяющихся операций по управлению тепловозом. Автоматизация технологического процесса расформирования составов позволяет повысить перерабатывающую способность горки, что в свою очередь, является необходимым условием повышения провозной способности направления.

Целью исследований является разработка методов построения и создание автоматической системы управления технологическим процессом расформирования составов, обеспечивающей повышение показателей качества регулирования скорости надвига и роспуска составов на горках.

Методика исследований. В работе использованы аппарат теории автоматического управления, методы оптимизации и моделирования системы управления на ЭВМ ЕС.

Разработаны математические модели объекта, выбраны за-



коны управления. Адекватность модели объекта проверена в статическом и динамическом режимах путем сравнения расчетных и экспериментально полученных зависимостей. Параметрическая оптимизация устройства управления выполнена методом Бокса-Уилсона. Экспериментальные исследования системы управления выполнены в эксплуатационных условиях на экспериментальном кольце ВНИИЖТа, Свердловской и Белорусской железных дорогах.

Научная новизна. Разработана методика и проведен анализ условий функционирования систем управления надвигом и распуском, на основании которого сформулированы требования к показателям качества системы управления горочным локомотивом.

Составлена математическая модель энергетической цепи тепловоза (ЭЦТ), адекватно описывающая статику и динамику горочного локомотива в процессе расформирования составов, позволившая исследовать переходные и установившиеся режимы в системе управления.

Предложен алгоритм функционирования САУ ГТ, обеспечивающий требуемое качество управления.

Сформулирована и решена задача параметрической оптимизации системы управления, в результате чего сокращено количество переключений позиций регулятора дизеля в 2,5–3,5 раза и уменьшен расход топлива на 1,8–2,2 % по сравнению с ручным управлением.

Практическая ценность. На основании проведенных исследований разработана аппаратура САУ ГТ, реализующая выбранные законы управления и обеспечивающая регулирование скорости со следующими показателями качества: переходные



процессы проходят с перерегулированием 9–10 %; погрешность регулирования скорости не превышает 5 %; среднее число переключений позиций регулятора дизеля на роспуск одного состава составляет 6,17; системой управления реализуются ускорения 0,06–0,08 м/с<sup>2</sup>.

Использование системы САУ ГТ повышает перерабатывающую способность сортировочной горки на 290 вагонов в сутки. Экономический эффект от внедрения результатов диссертационной работы составил 13,5 тыс. рублей в год на один локомотив, что подтверждено актом внедрения Свердловской ж.д.

Реализация работы. Результаты исследований использованы при составлении технического задания на разработку системы автоматического управления горочным тепловозом.

Макетный образец аппаратуры САУ ГТ успешно прошел испытания и находится в опытной эксплуатации в течение двух лет на ст. Свердловск-сортировочный Свердловской ж.д.

Материалы диссертации использованы при разработке технического проекта, осуществленной ПКБ ВНИИЖТа МПС и изготовлении опытного образца аппаратуры САУ ГТ на Опытном заводе ВНИИЖТа МПС. Внедрение в серию, согласно указания МПС №2355 от 31.10.83 года, запланировано на 1987 год.

Апробация работы. Материалы диссертации доложены и одобрены на заседаниях научно-технического совета отделения Связи и СЦБ ВНИИЖТа (Москва, 1982, 1983, 1984, 1985 г.г.), на научно-технических конференциях кафедр БелНИИЖТа, ДорНТО Белорусской ж.д. и Белорусского республиканского совета НТО (Гомель, 1979, 1980, 1983 г.г.), на научно-технических совещаниях комиссий автоматики, связи и вычислительной техники Министерства путей сообщения (Москва, 1982, 1984 г.г.).



Публикации. По теме диссертации автором опубликовано десять печатных работ и получено два авторских свидетельства на изобретения.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и трех приложений, содержит 150 страниц машинописного текста, 69 иллюстраций, 11 таблиц. Список использованной литературы содержит 117 наименований.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

В первой главе "Системы управления надвигом и роспуском составов на сортировочных горках" определено место системы ТГЛ в иерархической структуре АСУ сортировочными станциями и сформулирована цель управления для САУ ГТ, проведен анализ известных систем автоматического регулирования скорости горочных тепловозов и особенностей работы локомотивов на сортировочных горках, поставлена задача исследования.

В комплексных системах автоматизации сортировочного процесса (автоматизированная система управления роспуском составов на горках – АСУ РСГ, комплексная механизация и автоматизация сортировочных станций – КМАСС, комплекс горочный микропроцессорный – КГМ РИИЖТ) телеуправление горочным локомотивом является подсистемой нижней ступени иерархической структуры. Основное назначение указанных комплексных АСУ заключается в повышении перерабатывающей способности сортировочных станций, одним из путей которого является эффективная реализация переменной скорости надвига и роспуска составов. Исходя из этого и особенностей тепловозов с электрической передачей цель управления для САУ ГТ заключается в исполнении заданной программы надвига и роспуска составов с установленной точностью и определенными ускорениями при



соблюдении ограничений по мощности дизель-генераторной установки тепловоза, силе тяги локомотива и сцеплению, току и напряжению тяговых электродвигателей (ТЭД). Управление горочным тепловозом должно быть также рациональным по критериям расхода топлива на тягу и числу срабатываний коммутационной аппаратуры силовой электропередачи тепловоза. САУ ГТ должна осуществлять функции контроля за параметрами движения и превосходить уровень надежности силовой части тепловоза, что является необходимым требованием к системам автоматического управления подвижным составом.

При выборе законов управления силовой установкой тепловоза учтены особенности работы локомотивов на сортировочных горках. Операции по увеличению и уменьшению скорости движения являются многократно повторяющимися элементами технологического процесса, вследствие чего на продолжительность роспуска оказывают существенное влияние тяговые и тормозные характеристики горочных локомотивов, интенсивность изменения тягового и тормозного усилий. Уменьшение массы состава в процессе роспуска ведет к изменению параметров  $T_c$  и  $K_c$ , называемых в литературе, соответственно, постоянной времени и коэффициентом усиления объекта управления. Изменение величины  $T_c$  практически пропорционально изменению массы состава, а зависимость величины  $K_c$  от массы состава имеет гиперболический характер. Использование переменных скоростей роспуска приводит к увеличению продолжительности работы силовой установки тепловоза в переходных неэкономичных режимах, а реализация требуемых ускорений движения обуславливает установку "разогнанных" позиций контроллера машиниста.

В реферируемой работе рассмотрены регулятор скорости



движения тепловоза с позиционным управлением и регулятор скорости системы ТГЛ-ЦНИИ (СССР), регулятор скорости горючего тепловоза (США) и регулятор скорости тепловоза ЧМЭЗМ (ЧССР). Анализ регулирующих устройств показывает, что они не в полной мере обеспечивают необходимое качество регулирования, так как не содержат корректирующих звеньев, учитывающих изменение  $T_c$  и  $K_c$  в процессе роспуска.

Введение в закон управления производной от сигнала рассогласования в общем случае положительно сказывается на качестве переходных процессов. Однако измерение и использование информации о производной в алгоритмах для систем автоматического регулирования скорости горючих локомотивов затруднено вследствие сложности точного измерения этой величины в условиях движения с малыми скоростями (0,28–2,78 м/с) и малыми величинами абсолютных значений ускорений в процессе роспуска (0,03–0,09 м/с<sup>2</sup>).

В предлагаемой работе поставлена задача выбора законов управления САУ скорости горючего локомотива в режиме роспуска, разработки принципов построения управляющего устройства в системе управления технологическим процессом расформирования. Показателями качества выбраны: величина перерегулирования, погрешность отслеживания программной скорости роспуска, быстродействие, число переключений коммутационной аппаратуры и расход топлива.

Во второй главе "Анализ условий функционирования системы автоматического управления скоростью горючего локомотива" путем моделирования на ЭВМ исследованы условия работы САУ ГТ в процессе надвига и роспуска, а также скатывания отцепов с горки; определены факторы, влияющие на эффективность реали-



зации переменной скорости роспуска, с помощью которых сформулированы эксплуатационно-технические требования к системам автоматического управления горочными тепловозами.

Для количественной оценки влияния быстродействия САУ ГТ на основной показатель процесса расформирования состава – время роспуска – определены ускорения, развиваемые горочными локомотивами разного типа, величины изменения скорости роспуска для смежных отцепов, временные интервалы изменения скорости роспуска. Результаты моделирования показывают, что для повышения средней скорости роспуска составов на сортировочных горках следует использовать диапазон ускорений  $0,05-0,08 \text{ м/с}^2$ , который обеспечивает эффективную реализацию заданной программы роспуска по скорости. Для надежного исключения повторной сцепки состава с отделившимся отцепом величина ускорения состава при реализации заданного перепада скоростей не должна превышать  $0,1 \text{ м/с}^2$ . В работе показано, что для автоматического регулирования скорости состава с указанными ускорениями целесообразно использовать перспективный тепловоз ТЭМ7. Уменьшение времени реакции системы управления роспуском при фиксации момента отрыва отцепа достигается при использовании ускорения  $0,08 \text{ м/с}^2$ .

Исследование управляющих факторов, действующих в процессе роспуска на САУ скорости горочного тепловоза, осуществлено при учете длины смежных отцепов, а также минимальной скорости движения предыдущего отцепа по разделительной стрелке. Установлено, что предельное значение разности задаваемых скоростей составляет  $0,89 \text{ м/с}$ , математическое ожидание этой величины –  $0,43 \text{ м/с}$  и среднее квадратичное отклонение –



0,19 м/с.

Оценка возмущающих воздействий для САУ скорости произведена с учетом влияния сопротивления движению состава при изменении массы состава и скорости распуска. Рассчитано, что увеличение скорости распуска с 1,39 м/с до 2,28 м/с приводит к изменению удельного сопротивления на 1,28 %. Вследствие этого можно считать, что изменение скорости распуска незначительно влияет на сопротивление движению. Сопротивление движению при отрыве одновагонного отцепа изменяется на 1628 Н, двухвагонного – 3326 Н, трехвагонного – 4895 Н, а интенсивность изменения сопротивления движению составляет от 88 Н/с до 294 Н/с, что учтено при моделировании процессов управления распуском.

Результаты исследований позволили сформулировать следующие требования к показателям качества систем управления горочным тепловозом:

- погрешность регулирования скорости не должна превышать 5 % ее установленного значения;
- быстродействие системы САУ ГТ при реакции на ступенчатое управляющее воздействие с изменением уставки на 0,28 м/с должно составлять 3,5–4,5 с;
- число переключений позиций регулятора дизеля должно быть минимальным;
- величина перерегулирования не должна превышать 30 %.

Третья глава "Математическая модель системы управления горочным тепловозом" посвящена разработке математической модели объекта управления и выбору законов управления для САУ ГТ. Исследования проведены применительно к тепловозу ТЭМ7 с электрической передачей переменного–постоянного тока.



Элементы энергетической цепи тепловоза, включающей в себя дизель, тяговый синхронный генератор (СГ), возбудитель, блок управления возбуждением, тяговые электродвигатели, а также функциональные и измерительные преобразователи уставок и обратных связей описаны следующей системой уравнений:

$$\frac{dn_A}{dt} = \frac{K_A}{T_A} \eta - \frac{1}{T_A} n_A; \quad \varepsilon = \alpha - K_{uc} n_A;$$

$$\frac{d\varepsilon_\delta}{dt} = K_{uz} \frac{d\eta}{dt} - \frac{1}{T_{uz}} \varepsilon_\delta; \quad \eta = K_{cm} f_1(\varepsilon - \varepsilon_\delta);$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{K_y}{T_y} \gamma_A - \frac{1}{T_y} \alpha; \quad \frac{di_{or}}{dt} = \frac{K_{obr}}{T_{do}} u_{or} - \frac{1}{T_{do}} i_{or};$$

$$\frac{u_{cr}}{n_A} = K_{cr} f_2(i_{oo} + i_{or} - K_{pr} i_{cr}); \quad u_{cb} = u_{co} + K_{cb} n_A;$$

$$u_{er} = \frac{1}{\pi} u_{co} (1 + \cos \alpha); \quad \frac{d\alpha}{dt} = \frac{K_{\beta A}}{T_{\beta A}} f_3(u_y);$$

$$\frac{di_{\partial\partial}}{dt} = \frac{K_{\partial\partial}}{T_{\partial\partial}} f_4(u_{\partial\partial} - e_{\partial\partial}) + \frac{1}{T_{\partial\partial}} i_{\partial\partial}; \quad u_{\partial\partial} = f_5(u_{\partial\partial 0} + K_{\partial\partial 1} i_{\partial\partial}) n_{\partial\partial};$$

$$\varphi_{\partial\partial} = f_6(i_{\partial\partial}; K_n);$$

$$u_i = f_7(u_{i0}; K_i; n_A);$$

$$e_{\partial\partial} = C_\varepsilon \varphi_{\partial\partial} n_{\partial\partial};$$

$$u_u = u_{u0} + K_u n_A;$$

$$m_{\partial\partial} = C_m \varphi_{\partial\partial} i_{\partial\partial};$$

$$u_m = u_{m0} + K_m n_A;$$

$$i_{TT} = \frac{i_{\partial\partial}}{K_{TT}};$$

$$i_{TH} = \frac{u_{\partial\partial}}{K_{TH}};$$

$$u_{o1} = f_8(i_{TT}; i_{TH}; u_{v1});$$

$$u_{s1} = u_{o1} - u_i;$$

$$u_{ou} = f_9(i_{TT}; i_{TH}; u_{v2});$$

$$u_{s2} = u_{ou} - u_u;$$

$$u_{om} = f_{10}(i_{TT}; i_{TH}; u_{v1}; u_{v2}); \quad u_{s3} = u_{om} - u_m;$$

$$u_1 = f_{11}(u_{s1}; u_{s2}; u_{s3}) + u_{ct1}; \quad \frac{du_{ct}}{dt} = \frac{K_{ct}}{T_{ct1} + T_{ct2}} u_{er} + u_{ct1};$$

$$\frac{du_{ct1}}{dt} = \frac{K_{ct2}}{T_{ct1}^2 \cdot T_{ct2}^2} u_{or} - \frac{1}{T_{ct1} \cdot T_{ct2}} - \frac{T_{ct1} + T_{ct2}}{T_{ct1} \cdot T_{ct2}} u_{ct1}.$$



Уравнения движения локомотива с составом:

$$\frac{dv_T}{dt} = \xi \frac{f_T - m_c}{P_T + q_c}; \quad f_T = \sum_{l=1}^8 m_{\partial 0} \cdot K_F;$$

$$m_c = (1,9 + 0,01v_T + 0,0003v_T^2)P_T + \left(0,7 + \frac{8 + 0,1v_T + 0,0025v_T^2}{q_a}\right)q_c + (P_T + q_c)i.$$

В приведенных уравнениях приняты следующие обозначения:  $n_d$ ,  $\eta$  – соответственно частота вращения вала дизеля и координата положения рейки топливного насоса;  $K_d$ ,  $K_{uc}$ ,  $K_{uz}$ ,  $K_{cm}$ ,  $K_y$  – коэффициенты связи дизеля, золотника измерительного преобразователя, поршня изодрома, давлений гидросистемы регулятора и цилиндра сервомотора, сервомотора управления;  $f_i$  – нелинейные статические характеристики;  $\varepsilon$ ,  $\alpha$ ,  $\varepsilon_s$  – перемещение золотника, уставки сервомотора управления и поршня изодрома;  $T_d$ ,  $T_{uz}$ ,  $T_y$  – постоянные времени дизеля, изодрома, сервомотора управления;  $U_{cb}$ ,  $U_{co}$ ,  $U_{cr}$  – напряжение возбуждителя, начальное напряжение и напряжение возбуждения СГ;  $K_{cb}$ ,  $K_{obr}$ ,  $K_{pr}$ ,  $K_{cr}$  – коэффициенты усиления возбуждителя, обмотки возбуждения СГ, коэффициент реакции якоря и коэффициент усиления СГ;  $i_{bo}$ ,  $i_{br}$  – начальный ток и ток возбуждения СГ;  $T_{do}$ ,  $U_{cr}$  – постоянная времени обмотки возбуждения и напряжение СГ;  $K_{ба}$ ,  $T_{ба}$  – коэффициент усиления и постоянная времени магнитного усилителя блока управления возбуждением,  $\alpha$  – угол открытия тиристоров этого блока;  $i_{\partial 0}$ ,  $K_{\partial 0}$ ,  $T_{\partial 0}$ ,  $E_{\partial 0}$ ,  $U_{\partial 0}$ ,  $K_{\partial 1}$ ,  $n_{\partial 0}$ ,  $\Phi_{\partial 0}$ ,  $m_{\partial 0}$  – ток, коэффициент усиления, постоянная времени, э.д.с., напряжение, коэффициент связи, скорость вращения вала, магнитный поток и тяговый момент ТЭД;  $K_n$  – коэффициент аппроксимации нагрузочной характеристики ТЭД;  $C_e$ ,  $C_m$  – конструктивные коэффициенты ТЭД;  $U_{i0}$ ,  $U_{u0}$ ,  $U_{m0}$ ,  $U_i$ ,  $U_u$ ,  $U_m$ ,  $K_i$ ,  $K_u$ ,  $K_m$  – начальные напряжения и напряжения уставок, коэффициенты усиления САР тягового гене-



ратора;  $K_{TT}$ ,  $K_{TH}$ ,  $L_{TT}$ ,  $L_{TH}$  — коэффициенты усиления и токи измерительных трансформаторов;  $U_{oi}$ ,  $U_{ou}$ ,  $U_{om}$  — напряжения обратных связей САР тягового генератора;  $U_{v1}$ ,  $U_{v2}$  — напряжение на диодах  $VD1$ ,  $VD2$  селективного узла;  $U_{s1}$ ,  $U_{s2}$ ,  $U_{s3}$  — напряжения рассогласования контуров регулирования САР тягового генератора;  $U_{ct1}$ ,  $U_{ct}$ ,  $T_{ct1}$ ,  $T_{ct2}$ ,  $K_{ct}$ ,  $K_{ct1}$  — параметры цепи стабилизации;  $v_T$ ,  $f_T$ ,  $P_T$ ,  $m_c$ ,  $Q_c$ ,  $Q_a$  — соответственно скорость, сила тяги и масса тепловоза, момент сопротивления и масса состава, масса грузов одного вагона.

Приведенная математическая модель ЭЦТ предусматривает бесступенчатое и позиционное изменение частоты вращения вала дизеля, что отличает ее от известных. Мерой близости модели и объекта служит факт нахождения координат ЭЦТ, рассчитанных на ЭВМ, в поле допусков паспортных характеристик силовой установки тепловоза. Сходимость паспортных и расчетных характеристик (погрешность не превышает 5 %) свидетельствует об адекватности математической модели и процессов в ЭЦТ.

Для определения взаимодействия скорости движения тепловоза и координат ЭЦТ — тока нагрузки и угловой скорости вала дизеля использована паспортная зависимость тока нагрузки тепловоза ТЭМ7 от скорости. Преобразование этой характеристики в зависимость номера позиции регулятора дизеля от произведения  $i_{cy} v_T$  для постоянных значений токов нагрузки осуществлено графо-аналитическим методом. Незначительная нелинейность кривых семейства полученных характеристик позволила представить их следующим выражением:



$$U_{pd} = K_{py} U_i U_v + K_z U_i + K_d U_v + K_o D_o, \quad (1)$$

где  $U_{pd}$  — аналоговое значение требуемой величины номера позиции регулятора дизеля;

$U_i, U_v$  — величины сигналов измерительных преобразователей тока нагрузки и скорости движения тепловоза;

$K_{py}, K_z, K_d, K_o$  — коэффициенты усиления и аппроксимации.

Для преобразования аналогового значения величины  $U_{pd}$  в номер позиции регулятора дизеля осуществляется квантование этой координаты по уровню. Дискретные значения величины  $U_{pd}$  используются для управления дизелем, а разность между аналоговым и квантованным значением  $U_{pd}$  используется в качестве управляющего воздействия для контура управления тяговым генератором. Передаточная функция регулятора контура управления тяговым генератором имеет вид

$$W_y(s) = \frac{T_c}{K_{овг} K_{сг} K_c T_o} \left( 1 + \frac{1}{T_c s} \right) \quad (2)$$

Коэффициенты передаточной функции регулятора зависят от параметров состава с локомотивом. Непосредственное использование  $T_c$  и  $K_c$  затруднительно ввиду сложности измерения этих величин. При поиске косвенной информации, эквивалентной  $T_c$  и  $K_c$ , выбраны координаты состояния ЭЦТ  $U_i$  и  $1/U_n U_i$ , характер изменения которых приближенно соответствует характеру изменения  $T_c$  и  $K_c$  в процессе роспуска. При использовании выражений  $K_e U_i$  и  $K_{pi}/U_n U_i$  в качестве сигнала коррекции  $U_k$  для контура регулирования СГ, параметры этого контура  $K_5$  и  $T_2$  будут иметь постоянные значения. Введение коррекции

$$U_k = K_e U_i + K_{pi} \frac{1}{U_n U_i} \quad (3)$$



позволило сформировать САР тягового генератора слабо чувствительной к изменению массы состава в процессе роспуска.

Выбор законов управления противоразгрузочным аппаратом (догрузателем) тепловоза, позволяющим увеличить коэффициент использования касательной силы тяги, осуществлен с учетом специфики работы горочного локомотива и особенностей конструкции тепловоза ТЭМ7. Зависимость усилия догрузателя от тока нагрузки получена путем решения уравнений, описывающих элементы контура управления догрузателем

$$f_{\partial} = \begin{cases} \left( \frac{K_{1H} K_{2H} K_{5H} \cdot i_{BY}}{T_H S} - C_1 \right) K_{3H} \frac{K_A}{T_A S + 1} & \text{при } \alpha_1 < U_2 < \alpha_2; \\ K_{3H} C_2 \frac{K_A}{T_A S + 1} & \text{при } \alpha_2 < U_2; \\ 0 & \text{при } 0 < U_2 < \alpha_1, \end{cases} \quad (4)$$

где  $T_A$ ,  $K_A$ ,  $f_{\partial}$  — соответственно постоянная времени, коэффициент усиления и усилие, развиваемое догрузателем;

$K_{1H}$  —  $K_{5H}$  — коэффициенты усиления элементов контура;

$\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $T_H$  — константы и постоянная времени интегрирующего звена.

Расчеты показывают, что использование устройства автоматического управления догрузателем позволяет дополнительно реализовать до 45 кН силы тяги, развиваемой локомотивом.

Характеристики тормозной силы локомотива при реостатном торможении рассчитаны с учетом повторно-кратковременного режима включения. Регулятор контура управления тормозами имеет цепи воздействия на тяговый генератор, тяговые электродвигатели и описывается следующими выражениями:



$$U_{2T} = \begin{cases} C_{2T} - K_{2T} K_{1T} \varepsilon_{vy} & \text{при } \varepsilon_{vy} < C_{1T}; \\ 0 & \text{при } \varepsilon_{vy} > C_{1T}; \end{cases} \quad (5)$$

$$U_{KT} = \begin{cases} C_{3T} & \text{при } U_{2T} < \gamma_1; \\ 0 & \text{при } \gamma_1 < U_{2T} < \gamma_2; \\ C_{4T} & \text{при } U_{2T} > \gamma_2. \end{cases}$$

где  $K_{1T}$ ,  $K_{2T}$  — коэффициенты усиления регулятора;

$\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ ,  $C_{1T}$  —  $C_{4T}$  — константы управляющего устройства;

$U_{2T}$  — напряжение управления СТ;

$U_{KT}$  — напряжение управления тормозными контакторами.

Величины коэффициентов  $K_{1T}$  и  $K_{2T}$ , константы  $C_{1T}$  —  $C_{4T}$ ,

$\gamma_1$  и  $\gamma_2$  определены из условия поддержания тока ТЭД на уровне 850–1350 А.

Четвертая глава "Исследование статических и динамических характеристик системы" посвящена анализу функционирования САУ ГТ, моделированию процесса программного управления горочным тепловозом, выбору на основании полученных результатов параметров управляющего устройства, постановке и решению задачи параметрической оптимизации регулятора, определению количества переключений позиций регулятора дизеля и расхода топлива.

В работе проведено исследование устойчивости линеаризованной модели. Получены выражения для определения области устойчивости в координатах  $T_2$  и  $K_5$  при различных значениях  $T_c$  и  $K_c$ .

Методика анализа качества управления горочным тепловозом основана на моделировании процесса движения локомотива с



составом в режиме надвига и роспуска с программным изменением скорости движения.

Для реализации ускорения  $0,06-0,08 \text{ м/с}^2$ , в регулятор аддитивно введено напряжение  $K_{\varphi} U_{\varphi}$ , пропорциональное требуемому приращению угловой скорости вала дизеля. Результаты моделирования показали, что требуемые ускорения для скоростей роспуска реализуются в диапазоне изменения  $T_c$  от нуля до 120 с.

Для оценки качества управления исследован характер изменения регулируемой величины и степень приближения координаты  $U_{\varphi d}$  к угловой скорости вала дизеля. В процессе исследований, осуществленных с использованием теории планирования эксперимента, определено влияние на  $U_{\varphi d}$  факторов  $K_z$ ,  $K_{\delta}$ ,  $K_{\varphi}$ ,  $K_o$ . В целях получения независимых оценок коэффициентов регрессии и сокращения вычислений была выбрана матрица полного факторного эксперимента с планом первого порядка, обладающая свойствами ортогональности и рототабельности. Моделирование осуществлялось для шестнадцати вариантов системы. При этом на ЭВМ моделировался процесс изменения скорости при ступенчатом управляющем воздействии и фиксированных, в соответствии с матрицей планирования, значениях коэффициентов уравнения (I). Сравнение результатов моделирования и аналитического расчета показало, что предложенная методика хорошо согласуется с результатами эксперимента.

При заданных структуре и алгоритме управления САУ ГТ, исследование динамики сводится к решению задачи параметрической оптимизации управляющего устройства по критерию перерегулирования. Для нахождения экстремума функции в работе применен градиентный метод Бокса-Уилсона. В качестве исследуемых факторов выбраны параметры регулятора  $T_2$  и  $K_5$  и корректирую-



щих цепей  $K_e$  и  $K_{nc}$ . Реализация матрицы планирования эксперимента также осуществлена для 16 вариантов системы. Исследования показали, что использование метода движения по градиенту обеспечивает повышение качества переходных процессов. Получены расчетные значения перерегулирования, составляющие 9 %, что меньше установленных.

Сравнение характеристик числа переключений регулятора дизеля для различных законов управления показало, что наименьшего числа переключений можно достичь при использовании релейного закона управления дизелем в сочетании с ПИ-законом управления тяговым генератором. Дальнейшее усложнение алгоритма работы управляющего устройства не приводит к сокращению числа переключений, в связи с чем полученные значения этого показателя, составляющие 3,2-7,4 на роспуск состава массой 4000 т, следует считать рациональными для управления дизелем. Количественная оценка расхода топлива при ручном и автоматическом управлении проводилась при моделировании процесса расформирования состава такой же массы. Подсчитано, что на роспуск состава при автоматическом управлении топлива затрачивается на 1,8-2,2 % меньше, чем при ручном управлении.

Пятая глава "Экспериментальные исследования системы автоматического управления горючим локомотивом" посвящена разработке и проведению эксплуатационных испытаний созданной при участии автора САУ ГТ, в которой использованы принципы, предложенные в реферируемой работе. На описанную в данной главе систему получены два авторских свидетельства на изобретения.

В соответствии с указанием МПС на станции Свердловск-сортировочный были проведены эксплуатационные испытания



САУ ГТ, макетным образцом которой оборудован в заводских условиях тепловоз ТЭМ7 №0022. Целью испытаний являлась оценка работоспособности САУ ГТ и определение показателей качества применительно к условиям расформирования составов с переменной скоростью. В процессе испытаний установлено, что переходный процесс по увеличению скорости проходит с перерегулированием 5 %, а по уменьшению скорости - 9-10 %. Погрешность регулирования скорости не превышает 0,04-0,07 м/с или 5 % от величины заданной скорости. Среднее число переключений позиций регулятора дизеля на роспуск одного состава составляет 6,17. Система устойчиво работает при возникновении боксования и способствует его ликвидации. Длительность переходного процесса при реакции системы на ступенчатое управляющее воздействие с изменением уставки на 0,28 м/с составляет 3-4 с для состава массой 973 т и 4-5 с для состава массой 2008 т. Ускорения, реализуемые системой, составляют соответственно 0,08-0,06 м/с<sup>2</sup>. Система рекомендована для использования на сортировочных горках и находится в опытной эксплуатации в течение двух лет.

По указанию МПС на Белорусской железной дороге проведены испытания макетного образца САУ ГТ на тепловозе ЧМЭЗ, которые показали, что разработанная система совместима с электрической передачей этого тепловоза и обладает следующими показателями качества: перерегулирование - 12-18 %, погрешность стабилизации скорости не превышает 5 %, ускорения, реализуемые системой, составляют 0,04-0,06 м/с<sup>2</sup>.

Для сравнительной оценки проведены испытания САУ скорости тепловоза ЧМЭЗМ (разработка конструкторского бюро заводов ЧЖД - Тракце), показавшие, что эта система обеспечивает регу-



лирование скорости с погрешностью, достигающей 15-18 %, с перерегулированием - 17-23 % и реализуемыми ускорениями 0,03-0,06 м/с<sup>2</sup>. Эти показатели качества в большей степени соответствуют маневровым режимам работы локомотивов и в меньшей степени - горочным. Показано, что разработанные в диссертации алгоритмы управления тепловозом могут быть успешно применены в целях модернизации и улучшения показателей качества САУ тепловоза ЧМЭЗМ.

Приведены результаты расчета экономической эффективности. Внедрение САУ ГТ повышает перерабатывающую способность сортировочной горки в среднем на 290 вагонов в сутки, а подтвержденный экономический эффект составил 13,5 тысяч рублей на один локомотив в год.

#### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ.

1. На основании анализа отечественного и зарубежного опыта показана необходимость разработки и перспективность использования системы автоматического управления скоростью горочного тепловоза с учетом технологических условий расформирования составов с переменной скоростью.

2. В результате исследований автоматизируемого технологического процесса надвига и роспуска составов выбраны критерии качества систем автоматического управления горочным локомотивом и сформулированы эксплуатационно-технические требования к этим системам. Установлено, что одним из важнейших факторов, влияющих на эффективность использования переменной скорости роспуска, является ускорение, развиваемое горочным локомотивом.

3. Сформулирована цель управления для САУ ГТ, заключающаяся в исполнении программы надвига и роспуска составов



с установленной скоростью и определенными ускорениями при рациональных режимах управления тепловозом.

4. Разработанные математические модели энергетической цепи тепловоза и системы управления позволили, на основании имитационного моделирования, выбрать законы управления скоростью и разработать алгоритм функционирования САУ ГТ.

5. Моделирование процесса движения локомотива с составом при программном изменении скорости роспуска дало возможность провести анализ влияния различных способов построения регулятора скорости и получить численные значения показателей качества системы.

6. Поставленная и решенная задача параметрической оптимизации системы управления позволила выбрать коэффициенты закона управления, обеспечивающие требуемые показатели качества САУ ГТ.

7. Эксплуатационные испытания разработанной системы подтвердили правильность выбранных принципов построения технических средств. Система САУ ГТ обладает высокими показателями качества и позволяет повысить перерабатывающую способность сортировочной горки на 290 вагонов в сутки.

8. Годовой экономический эффект от внедрения разработанной системы управления составил 13,5 тысяч рублей на один локомотив, что подтверждено актом внедрения Свердловской ж.д.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Бурченков В.В., Антоненко А.Г. Эксплуатационно-технические требования к системам автоматического регулирования



ния скорости маневровых локомотивов.- В кн. Дальнейшее повышение эффективности работы Белорусской железной дороги.- Тез. докл. XIУ науч.-техн. конф. кафедр БелИИЖТа и ДорНТО Белорусской железной дороги. Гомель, 1979, с.96-97.

2. Бурченков В.В. Идентификация энергетической цепи тепловоза как объекта регулирования в системе телеуправления горочным локомотивом.- В кн. Перспективы развития Белорусской железной дороги.- Тез. докл. XV науч.-техн. конф. кафедр БелИИЖТа и ДорНТО Белорусской ж.д., Гомель, 1980, с.87-88.

3. Бурченков В.В. Исследование регулятора скорости тепловоза ЧМЭЗМ в условиях надвига и роспуска составов.- Вестник ВНИИЖТ, 1982, №6, с.25-28.

4. Бурченков В.В. Автоматизация управления противоразгрузочным аппаратом тепловоза ТЭМ7.- Научно-технический реферативный сборник, сер.: Локомотивы и локомотивное хозяйство, М., ЦНИИ ТЭИ МПС, 1982, вып. I (129), с.27-30.

5. Бурченков В.В. Анализ энергетической цепи и выбор закона управления для регулирования скорости горочного тепловоза.- Рукопись деп. в ЦНИИ ТЭИ МПС, 1982, №1874,- РЖ ВИНТИ "Железнодорожный транспорт", 1982, №8, реф.8В10-82, 10 с.

6. Бурченков В.В. Исследование ускорений, развиваемых горочными локомотивами в процессе роспуска состава.- В кн. Теоретические и экспериментальные исследования систем автоматизации процесса расформирования составов на сортировочных горках /Под ред. В.С.Скабаллановича.-М.: Транспорт, 1983, с.81-91 (Труды ВНИИ ж.-д. трансп., вып.661).

7. Бурченков В.В., Григорьев Н.И. Автоматическое регулирование скорости тепловоза ТЭМ7.- В кн. Теоретические и



экспериментальные исследования систем автоматизации процесса расформирования составов на сортировочных горках./Под ред. В.С.Скабаллановича.- М.:Транспорт, 1983, с.76-80 (Труды ВНИИ ж.-д. трансп., вып.661).

8. Куровский М.В., Жидков А.М., Антоненко А.Г., Бурченков В.В. Исследование системы автоматического регулирования скорости тепловоза ТЭМ7 в эксплуатационных условиях.- В кн. Пути повышения эффективности использования подвижного состава.- Тез. докл. науч.-техн. конф., Гомель: БелИИЖТ, 1983, с.109-110.

9. Бурченков В.В. Анализ особенностей работы локомотивов на сортировочных горках. В кн. Пути повышения эффективности использования подвижного состава.- Тез. докл. науч.-техн. конф., Гомель: БелИИЖТ, 1983, с.49-50.

10. Модин Н.К., Фонарев Н.М., Куровский М.В., Бурченков В.В. и Антоненко А.Г. Автоматическое регулирование скорости горочного тепловоза.- Автоматика, телемеханика и связь, №9, 1983, с.4-6.

11. А.с. 933493 (СССР) Бурченков В.В., Модин Н.К., Куровский М.В. и др. Устройство автоматического управления противоразгрузочным аппаратом маневрового тепловоза.- Оpubл. в Б.И., №21, 1982.

12. А.с. 1009831 (СССР) Баранов Л.А., Фонарев Н.М., Бурченков В.В. и др. Устройство для автоматического регулирования скорости тепловоза с электрической передачей.- Оpubл. в Б.И., №13, 1983.



Подписано к печати 20.12.85 г. А342709.  
Бум. писч. №1. Печ. лист. I. Зак. 4043.  
Тираж 100 экз. Бесплатно.

---

Ротапринт типографии БелИИЖТа,  
246022, г.Гомель, ул. Кирова, 34.