

На правах рукописи

Жухин

ЖУХИН НИКИТА ОЛЕГОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО
УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ ГРУЗОВОГО ПОЕЗДА**

2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов
и электрификация (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта» РУТ (МИИТ).

Научный
руководитель:

доктор технических наук, доцент
Пудовиков Олег Евгеньевич

Официальные
оппоненты:

Мугинштейн Лев Александрович
доктор технических наук, профессор,
акционерное общество «Научно-исследовательский
институт железнодорожного транспорта», главный
научный сотрудник;

Антипин Дмитрий Яковлевич
кандидат технических наук, доцент,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Брянский государственный технический
университет», Учебно-научный институт транспорта,
директор.

Ведущая
организация:

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Петербургский государственный университет
путей сообщения Императора Александра I»,
г. Санкт-Петербург.

Защита состоится «30» мая 2024 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета 40.2.002.07 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» РУТ (МИИТ) по адресу: 127994, ГСП-4, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ): www.mii.ru.

Автореферат разослан «__» апреля 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Воронин Николай Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Железнодорожный транспорт в России исторически выполняет основной объём грузоперевозок.

Рост объёма грузоперевозок железнодорожным транспортом требует повышения пропускной и (или) провозной способности ряда участков железных дорог. При увеличении числа поездов и приближении пропускной способности к максимально возможной снижается средняя скорость движения, возрастает время доставки грузов, возникают сбои в движении поездов. Строительство дополнительных главных путей с целью повышения пропускной способности связано со значительными экономическими затратами.

В этих условиях целесообразно повышать провозную способность железных дорог путём увеличения массы поезда. Рост массы поездов требует применения более мощных локомотивов, а также системы распределённой тяги с несколькими локомотивами, распределёнными по поезду.

Повышение массы поезда и силы тяги локомотива вызывает рост продольных сил, возникающих при взаимодействии экипажей поезда друг с другом, в том числе динамических сил в переходных режимах движения. На величины этих сил, а значит, и на безопасность движения грузовых поездов значительное влияние оказывает квалификация локомотивных бригад. Так, ошибки при выборе темпа изменения сил тяги или торможения способствуют существенному ухудшению характера протекания переходных процессов в поезде, вызывая увеличение величин продольных динамических сил. Также ошибки и нарушения в технологических процессах формирования поезда, роспуска составов на сортировочных станциях, управления поездом далеко не всегда приводят к аварийным ситуациям, но ускоряют износ механической части и упряжных приборов вагонов, способствуют накоплению усталостных повреждений в них и увеличивают вероятность обрыва автосцепки в дальнейшем, в том числе при действии продольных сил значительно меньших, чем установлено нормами расчёта на прочность вагонов.

Снижению влияния человеческого фактора на процесс управления грузовым поездом, а, следовательно, повышению безопасности движения поездов, способствует применение систем автоматического ведения поездов (САВП), составной частью которых является система автоматического управления (САУ) скоростью движения.

Для повышения качества управления скоростью и безопасности движения поездов САУ скоростью при выборе и формировании управляющих воздействий на тяговый электропривод должна учитывать особенности протекающих в поезде переходных процессов, сопровождающихся продольными колебаниями. Кроме этого, целесообразно учитывать параметры самого поезда (масса, число вагонов) а также параметры его движения (скорость, ускорение, расположение экипажей на элементах профиля пути).

Таким образом, задача совершенствования систем автоматического управления скоростью движения в условиях широкого внедрения поездов повышенной массы является актуальной.

Степень разработанности темы исследования. Разработке систем автоведения поездов и систем автоматического управления скоростью посвящены исследования ряда отечественных организаций: АВП Технологии, ВНИИЖТ, ВНИКТИ, ВЭЛНИИ, ГТСС, РУТ(МИИТ) и других, а также работы многих отечественных учёных: И. А. Асниса, В. М. Бабича, Ю. В. Бушненко, А. Г. Вольвича, Я. М. Головичера, Д. Д. Захарченко, И. П. Исаева, М. Ю. Капустина, П. Е. Ковалья, В. А. Кучумова, В. Н. Лисунова, В. М. Максимова, В. А. Малютина, Я. Е. Марченко, Л. А. Мугинштейна, Н. С. Назарова, Б. М. Наумова, Н. Б. Никифоровой, А. В. Плакса, С. В. Покровского, О. Е. Пудовикова, М. С. Пясика, А. Н. Савоськина, Б. Н. Тихменёва, Л. М. Трахтмана, В. Д. Тулупова, В. П. Феоктистова и других.

Цель и задачи исследования. Целью данной работы является совершенствование структуры и алгоритмов системы автоматического управления скоростью локомотива, позволяющей для повышения качества управления выполнять оценку состояния межвагонных связей поезда, а также учитывать массу поезда и число вагонов в нём.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- разработана структура системы автоматического управления скоростью локомотива грузового поезда, учитывающей при работе параметры поезда;
- разработаны алгоритмы работы функциональных устройств САУ скоростью;
- предложен способ оценки состояния межвагонных связей поезда применительно к САУ скоростью на основании информации о действующих на поезд внешних силах, а также о среднем значении ускорения поезда;
- выбрана методика и решена задача параметрического синтеза САУ скоростью;
- выполнена оценка влияния величин параметров САУ на показатели качества управления;
- уточнена математическая модель пружинно-фрикционного поглощающего аппарата современного типа.

Объектом исследования является система автоматического управления скоростью движения грузового поезда.

Предметом исследования являются технические решения по повышению эффективности систем автоматического управления скоростью движения локомотивов грузовых поездов.

Научная новизна:

- 1 разработана новая структура САУ скоростью с адаптивными алгоритмами управления, использующими информацию о состоянии

межвагонных связей поезда и обеспечивающими необходимое качество управления;

2 предложен метод оценки продольных сил в поезде и состояния межвагонных связей в квазистатическом режиме движения на основе информации о действующих на поезд внешних силах и среднем значении ускорения поезда. Полученные с применением предложенного метода результаты в достаточной мере соответствуют результатам, полученным с применением многомассовой модели поезда;

3 показано влияние изменения параметров закона управления САУ на величины показателей качества;

4 уточнена математическая модель пружинно-фрикционного поглощающего аппарата автосцепки на примере аппарата ПМК-110. Показано, что применение предложенной модели по сравнению с существующими позволяет повысить достоверность переходных процессов, а также оценки величин продольных сил в межвагонных связях, возникающих при переходных режимах движения поезда.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1 разработана САУ скоростью локомотива грузового поезда с новой структурой и усовершенствованными алгоритмами управления;

2 разработанное программное обеспечение позволяет путем математического моделирования исследовать продольные колебания в грузовом поезде при автоматическом управлении скоростью, а также выполнять параметрический синтез САУ скоростью;

3 предложенный способ оценки состояния межвагонных связей, реализованный в САУ, позволяет повысить эффективность управления скоростью движения поезда за счёт оптимизации технологии управления силами тяги и торможения без ухудшения качества протекания переходных процессов в поезде, а также требует меньшего объёма вычислительных ресурсов по сравнению с другим методом оценки величин продольных сил в поезде.

Методология и методы исследования. При выполнении работы использовались следующие методы:

– метод анализа – при обзоре ранее выполненных работ в области систем автоматического управления скоростью движения;

– метод моделирования и методы теории автоматического управления – при разработке математической модели грузового поезда и САУ скоростью его локомотива;

– метод модельного эксперимента – при выполнении исследований на математической модели грузового поезда и модели САУ скоростью;

– методы оптимизации – при решении задачи параметрического синтеза САУ скоростью грузового поезда;

– метод синтеза – при оценке полученных результатов.

Положения, выносимые на защиту:

- способ управления силой тяги (торможения) локомотива грузового поезда с учётом результатов оценки состояния его межвагонных связей;
- метод оценки величин квазистатических продольных сил, возникающих в грузовом поезде;
- структура системы автоматического управления скоростью локомотива грузового поезда с усовершенствованными алгоритмами управления и результаты моделирования работы данной САУ;
- зависимости величин показателей качества управления САУ от параметров закона управления;
- усовершенствованная модель пружинно-фрикционного поглощающего аппарата современной конструкции.

Степень достоверности выполненного исследования подтверждена корректным использованием математического аппарата, а также удовлетворительным совпадением полученных в работе экспериментальных данных с аналогичными данными, полученными другими исследователями в данной области.

Апробация результатов. Основные положения данной работы и результаты проведённых исследований представлены, доложены и обсуждены на:

- Всероссийской научно-практической конференции «Неделя науки-2020», 2020, г. Москва, РУТ (МИИТ);
- VII Международной научно-технической конференции «Локомотивы. Электрический транспорт. XXI век», 2020, г. Санкт-Петербург, ПГУПС;
- Четвертой международной научно-практической конференции «Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта», 2020, г. Омск, ОмГУПС;
- научно-практической конференции «Неделя науки-2021», 2021, г. Москва, РУТ (МИИТ);
- Международной научно-практической конференции «Интеллектуальные транспортные системы», 2022, г. Москва, РУТ (МИИТ);
- V всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте», 2022, г. Омск, ОмГУПС.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх разделов, заключения, списка использованных источников, приложения. Работа изложена на 178 страницах, в том числе: 138 страниц основного текста, 43 рисунка, 12 таблиц. Список литературы содержит 133 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении выполнено обоснование актуальности темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту; степень достоверности полученных результатов, а также данные об апробации результатов работы.

В первом разделе обоснована необходимость автоматизации управления грузовыми поездами. Произведен обзор работ в области автоматического управления скоростью движения грузовых поездов, в том числе для управления грузовыми поездами с несколькими локомотивами, распределёнными по составу. Рассмотрены математические модели для исследования продольных колебаний, возникающих в поездах при переходных режимах движения. Обоснована актуальность темы исследования, поставлена цель и сформулированы задачи диссертации.

Во втором разделе разработана модель САУ скоростью локомотива грузового поезда.

Функциональная схема разработанной САУ приведена на рисунке 1. Она содержит вышестоящую систему автоведения АВ и задатчик скорости контроллера машиниста З_v, из которых в САУ поступают значения заданной скорости v_3^1 и v_3^2 ; элемент ИЛИ-*min*1, который выбирает наименьшее значение заданной скорости v_3 и передаёт его в промежуточное устройство ПУ1; задатчик параметров поезда ЗПП и электронную карту ЭК, из которых параметры грузового поезда (масса, число вагонов), а также параметры плана и профиля участка пути, по которому движется поезд, поступают в модуль адаптации А и промежуточное устройство ПУ4. Модуль адаптации А на основе параметров поезда и параметров пути и профиля определяет величины параметров САУ, которые поступают в промежуточные устройства ПУ2 и ПУ3, а также, при наличии нескольких локомотивов, через устройство связи, использующее, например, технологии радиоканала, поступают на другие локомотивы. На основе параметров пути и поезда, значений заданной силы тяги (торможения) локомотивов F''_{31} (B''_{31}) и F''_{32} (B''_{32}) и фактической измеренной скорости $v_{\phi 1}^*$ промежуточное устройство ПУ4 определяет величины возникающих в поезде продольных сил.

Для определения этих сил использован метод, использующий сведения об ускорении поезда, величинах сил тяги или торможения, массах локомотивов и вагонов, расчётных значениях сил основного и дополнительного сопротивления движению (1). Поезд состоит из двух локомотивов с номерами 0 и k и n экипажей с номерами от 0 до $n - 1$. Поезд имеет $n - 1$ межвагонных связей с номерами от 1 до $n - 1$.

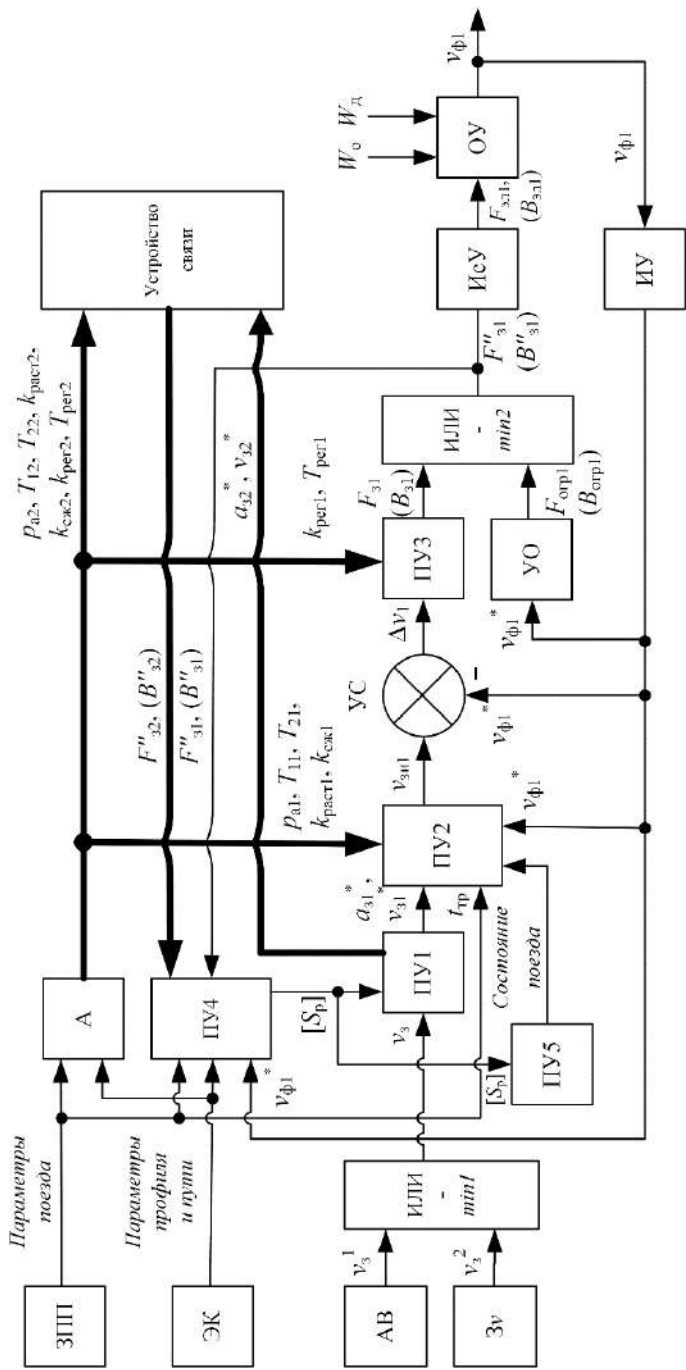


Рисунок 1 – Функциональная схема САУ скоростью локомотива грузового поезда

$$\left\{ \begin{array}{l} S_1 = F_{k1} - W_0 - m_0 \frac{dv}{dt}; \\ S_2 = S_1 - W_1 - m_1 \frac{dv}{dt}; \\ \dots \\ S_{k+1} = F_{k2} + S_k - W_k - m_k \frac{dv}{dt}; \\ \dots \\ S_{n-1} = S_{n-2} - W_{n-2} - m_{n-2} \frac{dv}{dt}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где S_1, S_2, \dots, S_{n-1} – продольные силы в межвагонных соединениях поезда, Н;
 F_{k1}, F_{k2} – силы тяги первого и второго локомотивов поезда, Н;
 $W_0, W_1, W_2, \dots, W_{n-1}$ – сумма расчётных значений сил основного и дополнительного сопротивления движению экипажей, Н;
 $m_0, m_1, m_2, \dots, m_{n-1}$ – массы экипажей поезда, кг;
 S_k, S_{k+1} – продольные силы в межвагонных соединениях до и после второго локомотива, Н.

В режиме электрического торможения величины продольных сил определяют из аналогичной системы уравнений, путём подстановки в неё значений сил торможения локомотивов поезда вместо значений сил тяги.

Отклонение величин продольных сил, полученных данным методом и величин продольных сил, полученных с использованием многомассовой модели поезда, в квазиустановившемся режиме движения, не превышает 1 – 3 %.

Информация о рассчитанных значениях продольных сил в межвагонных связях поезда $[S_p]$ из устройства ПУ4 передаётся в промежуточные устройства ПУ1 и ПУ5. В устройстве ПУ5 на основе этой информации выполняется определение параметра C , характеризующего преобладающее состояние межвагонных связей поезда – «сжатое» ($C = -1$), при котором в поезде преобладают межвагонные связи с величиной силы в них $S_{pi} < 0$, «промежуточное» ($C = 0$) с величиной силы $S_{pi} = 0$ и «растянутое» ($C = 1$) с величиной силы $S_{pi} > 0$. Определение величины C осуществляется с использованием элемента, обладающего характеристикой трёхпозиционного реле с зоной нечувствительности (рисунок 2)

$$C = \begin{cases} 1, & \text{если } n_{\text{раст}} \geq k_{\text{раст}}; 0,5 < k_{\text{раст}} < 1; \\ -1, & \text{если } n_{\text{сж}} \geq k_{\text{сж}}; 0,5 < k_{\text{сж}} < 1; \\ 0, & \text{если } n_{\text{раст}} < k_{\text{раст}} \wedge n_{\text{сж}} < k_{\text{сж}}, \end{cases} \quad (2)$$

где $n_{\text{раст}}, n_{\text{сж}}$ – доли от общего числа связей в поезде с $S_{pi} > 0$ и $S_{pi} < 0$ соответственно;

$k_{\text{раст}}, k_{\text{сж}}$ – пороговые значения долей связей с $S_{pi} > 0$ и $S_{pi} < 0$ соответственно.

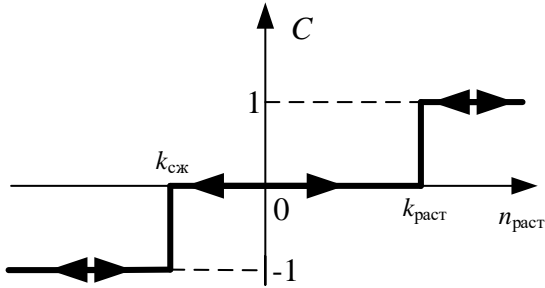


Рисунок 2 – Характеристика устройства ПУ5 оценки состояния межвагонных связей поезда

Информация о состоянии поезда C также поступает в промежуточное устройство ПУ2. Данное устройство сглаживает скачкообразные изменения величины заданной скорости и реализовано на базе аperiodического звена второго порядка. Работа устройства ПУ2 описывается следующей системой уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{11}(t) = x_1 a_3^* \left[1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) + \frac{T_2}{T_1 - T_2} \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) \right]; \\ f_{12}(t) = (1 - x_1) a_3^* \left[1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} \exp\left(-\frac{t - t_{\text{тр}}}{T_1}\right) + \frac{T_2}{T_1 - T_2} \exp\left(-\frac{t - t_{\text{тр}}}{T_2}\right) \right] \\ f(t) = f_{11}(t), \text{ если } (t < t_{\text{тр}}) \wedge (C < 1); \\ f(t) = f_{11}(t) + f_{12}(t), \text{ если } (t \geq t_{\text{тр}}) \vee (C = 1); \\ v_{\text{зи1}} = \int_0^t f(t) dt, \end{array} \right. \quad (3)$$

где t – текущее время;

T_1, T_2 – постоянные времени задатчика интенсивности;

$t_1, t_{1д}$ – переменные – счётчики времени;

$t_{\text{тр}}$ – время трогания поезда, вычисляемое как время выбора зазоров в межвагонных связях сжатого поезда;

x_1 – доля ускорения (замедления), реализуемого во время первого этапа изменения силы тяги (торможения) от заданного ускорения (замедления) локомотива;

a_3^* – заданное ускорение (замедление) локомотива. Вычисляется с использованием величин массы поезда, силы тяги локомотива при трогании и суммы сил сопротивления движению при трогании поезда.

Согласно данной системе уравнений, в зависимости от состояния поезда C устройство ПУ2 реализует изменение своего выходного сигнала $v_{\text{зи1}}$, а, следовательно, изменение силы тяги (торможения) локомотива в один или два этапа. Если выбран режим разгона поезда и состояние поезда C не оценивается как «промежуточное» или «сжатое», ПУ2 осуществляет изменение своего

выходного сигнала в два этапа: на первом этапе – с использованием передаточной функции $f_{11}(t)$, на втором – с использованием передаточных функций $f_{11}(t)$ и $f_{12}(t)$. Переход от первого этапа ко второму происходит при переходе поезда в растянутое состояние либо по истечении времени растяжения поезда $t_{\text{ТР}}$.

Если же состояние поезда C перед началом разгона поезда оценивается как растянутое, ПУ2 осуществляет изменение выходного сигнала в один этап, сразу переходя ко второму этапу изменения силы тяги. Аналогичный алгоритм реализуется устройством ПУ2 и в режиме торможения. Схема общего алгоритма работы устройств ПУ5 и ПУ2 данной САУ показана на рисунке 3.

С выхода ПУ2 значение заданной скорости $v_{\text{зи}}$ поступает в устройство сравнения УС, которое вычисляет рассогласование Δv_1 величины $v_{\text{зи}}$ и величины фактической измеренной скорости $v_{\text{ф1}}^*$. Устройство ПУ3 – пропорционально-интегральный регулятор – на основе величины рассогласования, а также параметров закона управления (коэффициентов при пропорциональной $k_{\text{пер1}}$ и интегральной $T_{\text{пер1}}$ частях регулятора скорости) вычисляет величину требуемой для ликвидации рассогласования Δv_1 силы тяги (торможения) $F_{\text{з1}}(B_{\text{з1}})$. На основе информации о фактической скорости движения локомотива устройство ограничений УО определяет максимально допустимую величину силы тяги (торможения) $F_{\text{огр1}}(B_{\text{огр1}})$. Из двух величин силы тяги (торможения), вычисленных устройствами ПУ3 и УО, устройство ИЛИ-*min2* выбирает наименьшую. С выхода ИЛИ-*min2* значение силы тяги (торможения) $F''_{\text{з1}}(B''_{\text{з1}})$ передаётся в исполнительное устройство ИсУ – автоматизированный тяговый электропривод. На выходе ИсУ формируется фактическая величина силы тяги (торможения) $F_{\text{эл1}}(B_{\text{эл1}})$, которая вместе с величинами сил основного и дополнительного сопротивления движению (W_0 и $W_{\text{д}}$) воздействует на объект управления ОУ – грузовой поезд. Фактическая скорость движения локомотива поезда $v_{\text{ф1}}$ измеряется устройствами ИУ – датчиками скорости с частотно-импульсной модуляцией, выходным сигналом которых является значение фактической измеренной скорости $v_{\text{ф1}}^*$.

Для учёта динамических процессов, происходящих при переходных режимах движения, в модели САУ использована многомассовая модель поезда, представляющая поезд в виде цепочки масс экипажей, соединённых упруго-диссипативными межвагонными связями, имеющими зазоры (*Динамика поезда (нестационарные продольные колебания)* / Е. П. Блохин, Л. А. Манашкин. — М. : Транспорт, 1982. — 222 с.). Модель поезда включает в себя модели межвагонных связей.

Для использования в работе выполнено уточнение модели межвагонной связи с поглощающими аппаратами типа ПМК-110. Предложенная модель позволяет учитывать деформации межвагонных связей и кузовов экипажей, рассеивание энергии колебаний, наличие зазоров в автосцепках, особенности конструкции и связанные с ними особенностями силовой характеристики поглощающих аппаратов типа ПМК-110.

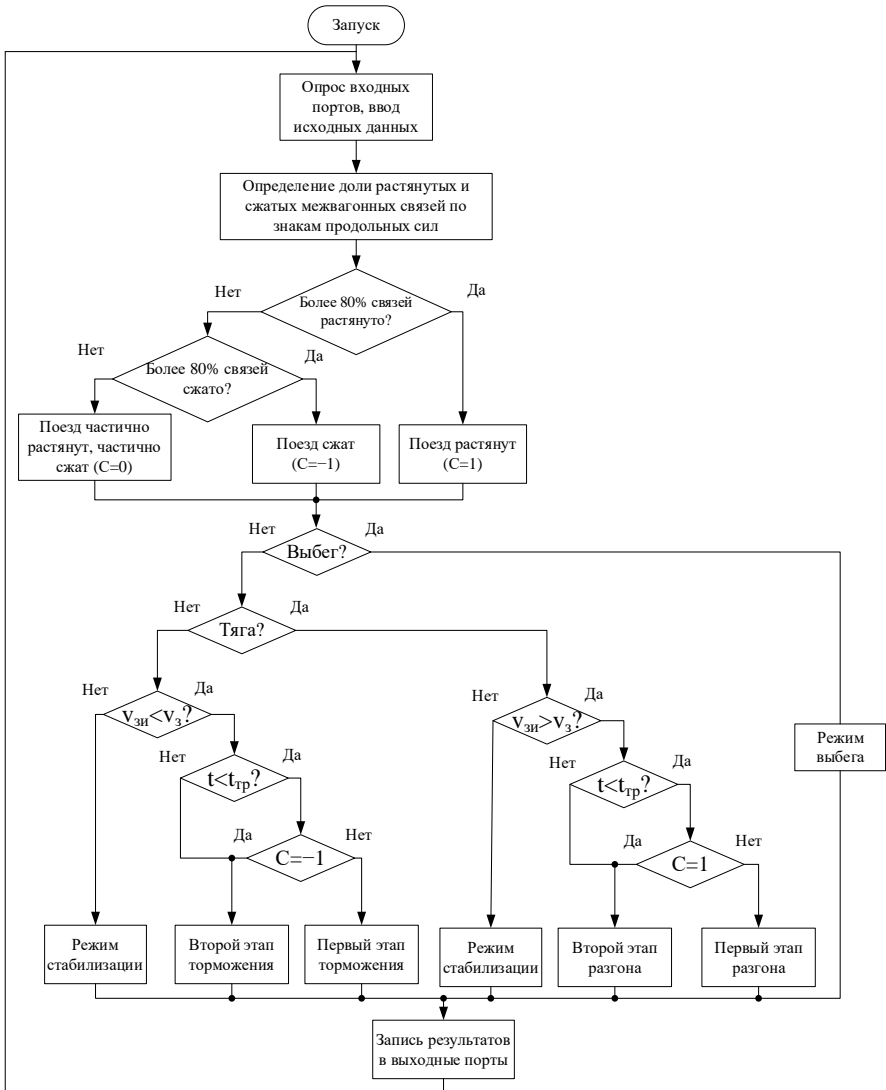


Рисунок 3 – Схема общего алгоритма работы устройств ПУ2 и ПУ5 САУ скоростью

Расчётная силовая характеристика межвагонной связи, оборудованной поглощающими аппаратами ПМК-110, полученная с использованием данной модели, приведена на рисунке 4. Данная характеристика построена без учёта зазоров в связи. При выполнении исследований в работе влияние зазора учитывалось, его величина была принята равной 65 мм.

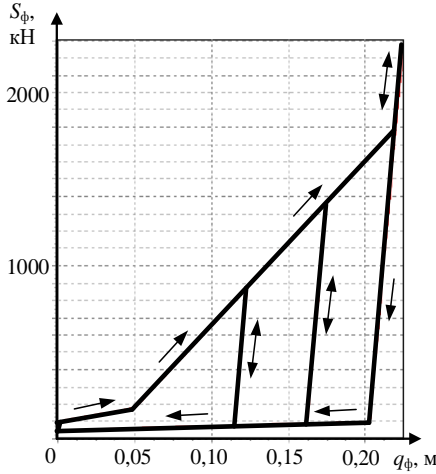


Рисунок 4 – Расчётная силовая характеристика усовершенствованной модели двух последовательно включённых поглощающих аппаратов типа ПМК-110

Величина продольной силы в поглощающих аппаратах $S_{\phi i}$ определяется из выражений:

$$S_{\phi j} = \begin{cases} \min\{S_{Hj}; S_{Kj}\}, & \text{если } (q_{\phi j} < \Delta_j) \wedge (q_{\phi j}(t) \geq q_{\phi j}(t-h)); \\ \max\{S_{Pj}; S_{Kj}\}, & \text{если } (q_{\phi j} < \Delta_j) \wedge (q_{\phi j}(t) < q_{\phi j}(t-h)); \\ S_{Kj}, & \text{если } (q_{\phi j} \geq \Delta_j); \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} S_{Hj} = S_{01j} + k_{H1j} q_{\phi j}, & \text{если } (q_{\phi j} < \Delta_{1j}); \\ S_{Hj} = S_{01j} + k_{H1j} \Delta_{1j} + k_{H2j} q_{\phi j} (q_{\phi j} - \Delta_{1j}), & \text{если } (q_{\phi j} \geq \Delta_{1j}) \wedge (q_{\phi j} < \Delta_{2j}); \\ S_{Pj} = S_{02j} + k_{P1j} q_{\phi j}, & \text{если } (q_{\phi j} < \Delta_{2j}); \\ S_{Pj} = S_{02j} + k_{P1j} \Delta_{2j} + k_{P2j} q_{\phi j} (q_{\phi j} - \Delta_{2j}), & \text{если } (q_{\phi j} \geq \Delta_{2j}) \wedge (q_{\phi j} < \Delta_{3j}); \\ S_{Kj} = S_j + k_{Kj} (q_{\phi j}(t) - q_{\phi j}(t-h)) + \beta_j \dot{q}_j \text{sign } q_j; \\ S_j = S_{Hj}(t-h) \vee S_{Pj}(t-h), & \text{если } S_{\phi j}(t-h) = S_{Hj}(t-h) \vee S_{Pj}(t-h); \\ \text{иначе } S_i = S_{\phi i}(t-h) - \beta_i \dot{q}_i(t-h) \text{sign } q_i(t-h); \end{cases} \quad (5)$$

где Δ_{1j} – величина деформации поглощающих аппаратов, при которой жёсткость аппаратов изменяется на этапе нагружения;

Δ_{2j} – величина деформации поглощающих аппаратов, при которой жёсткость аппаратов изменяется на этапе разгрузки;

k_{H1j} и k_{H2j} – жёсткости поглощающих аппаратов при нагружении (k_{H1j} – до изменения жёсткости; k_{H2j} – после изменения);

k_{P1j} и k_{P2j} – жёсткости поглощающих аппаратов при разгрузении;

S_{01j} и S_{02j} – величины начальной затяжки поглощающих аппаратов при

нагрузении и разгрузении соответственно.

Моделирование движения поезда выполнялось с учётом нелинейного характера изменения сил основного сопротивления движению поезда. Помимо основного сопротивления движению, также учитывалось и дополнительное сопротивление движению от кривых участков пути и уклонов. В последнем случае принималось во внимание сопряжение участков пути с различными уклонами кривыми большого радиуса в соответствии с «Рекомендациями по проектированию железных дорог колеи 1520 мм».

В качестве модели тягового электропривода локомотива принят элемент с передаточной функцией апериодического звена первого порядка. Ограничения на тяговые и тормозные характеристики локомотива приняты в соответствии с аналогичными ограничениями двухсекционного электровоза переменного тока 2ЭС5К «Ермак», оборудованного плавным регулированием напряжения на коллекторных тяговых двигателях.

Для исследования работы предложенной САУ, а также для решения задачи по отысканию рациональных с точки зрения обеспечения качества управления параметров системы автоматического управления было разработано специализированное программное обеспечение в программной среде *Borland C++ Builder*.

Для проверки корректности предложенных технических и технологических решений по управлению скоростью движения грузового поезда были выполнены пробные расчёты в следующих режимах работы:

режим I – трогание поезда с места, разгон до скорости 40 км/ч с переходом к стабилизации скорости и последующим разгоном до скорости 80 км/ч также с переходом к стабилизации скорости. Движение осуществляется по площадке;

режим II – аналогичен режиму I, но в режиме стабилизации скорости на уровне 40 км/ч движение осуществляется по спуску;

режим III – движение поезда в режиме выбега по площадке с последующим переходом на спуск и торможением поезда на спуске до заданной скорости, выполняемым в один этап;

режим IV – движение поезда в режиме выбега по площадке и подъёму с последующим переходом на площадку и торможением поезда до заданной скорости на площадке, выполняемым в два этапа.

Все расчёты выполнялись для поезда массой 6582 т, состоящего из электровоза массой 192 т и 71 гружёного вагона массой 90 т каждый.

Оценка качества управления САУ в этих режимах выполнена с применением следующих показателей качества: время переходного процесса t_p , сумма накопленных усталостных повреждений автосцепок поезда за время переходного процесса a , максимальная величина продольной динамической силы $S_{дmax}$ за время переходного процесса. Были исследованы два варианта алгоритма управления: первый (I), при котором изменение силы тяги или торможения осуществляется всегда в два этапа вне зависимости от состояния поезда, и второй (II), с адаптацией способа управления силами тяги или

торможения к оценочному состоянию межвагонных связей. В таблице 1 приведены величины показателей качества, полученные в выбранных режимах движения для обоих вариантов алгоритма работы системы автоматического управления.

По результатам выполненных расчётов к дальнейшему исследованию принят вариант, предусматривающий адаптацию управления силами тяги или торможения к оценочному состоянию межвагонных связей. В этом случае сокращается время переходного процесса без значительного ухудшения остальных показателей качества – величины максимальной продольной динамической силы и суммы усталостных повреждений, накопленных автосцепками поезда.

Таблица 1 – Величины показателей качества в выбранных режимах движения для различных вариантов алгоритма работы системы автоматического управления

Показатели качества САУ	Вариант алгоритма САУ	
	I	II
Режим I		
t_p , с	691	636
a	$3,64 \cdot 10^{-7}$	$3,64 \cdot 10^{-7}$
S_{dmax} , кН	109,3	109,3
Режим II		
t_p , с	691	657
a	$11,0 \cdot 10^{-7}$	$11,1 \cdot 10^{-7}$
S_{dmax} , кН	143,2	143,2
Режим III		
t_p , с	160	133
a	$0,42 \cdot 10^{-7}$	$0,50 \cdot 10^{-7}$
S_{dmax} , кН	104,6	103,9
Режим IV		
t_p , с	165	152
a	$4,53 \cdot 10^{-7}$	$4,35 \cdot 10^{-7}$
S_{dmax} , кН	143,3	143,3

Третий раздел работы посвящен оценке влияния вариации величин параметров САУ на значения показателей качества управления.

В качестве варьируемых параметров выбраны следующие параметры САУ: доля x_1 ускорения (замедления) во время первого этапа разгона (торможения) от заданного ускорения (замедления) локомотива, а также параметры $k_{рег}$ и $T_{рег}$ ПИ-регулятора скорости (устройства ПУЗ). Было исследовано влияние вариации данных параметров САУ на следующие показатели качества: величина ошибки в установившемся режиме Δ_y , время переходного процесса t_p , величина перерегулирования σ , величина суммы усталостных повреждений a , накопленных автосцепками поезда под действием продольных динамических сил, и максимальная величина продольной динамической силы, возникающей в поезде S_{dmax} . Рассмотрено

движение поезда массой 6582 т, сформированного по варианту, рассмотренному ранее, в режиме трогания с места и разгона до скорости 40 км/ч по прямому горизонтальному участку пути длиной 5 км. Расчёт выполнялся при варьировании одного из параметров САУ и фиксированных величинах остальных параметров.

На рисунках 5 – 7 приведены графики, построенные по результатам выполненных расчётов.

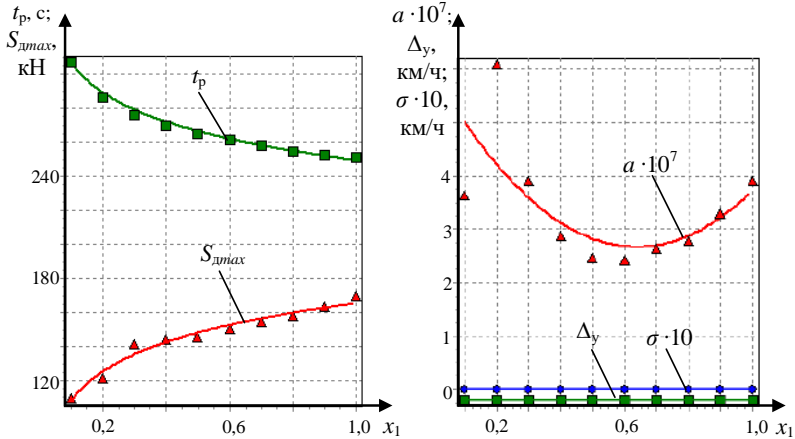


Рисунок 5 – Графики зависимостей величин показателей качества САУ от величины доли ускорения x_1

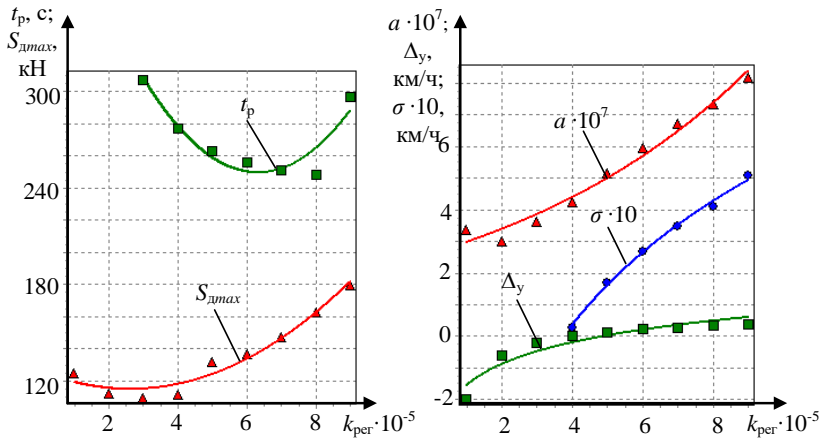


Рисунок 6 – Графики зависимостей величин показателей качества САУ от величины коэффициента k_{per} пропорциональной части ПИ-регулятора скорости

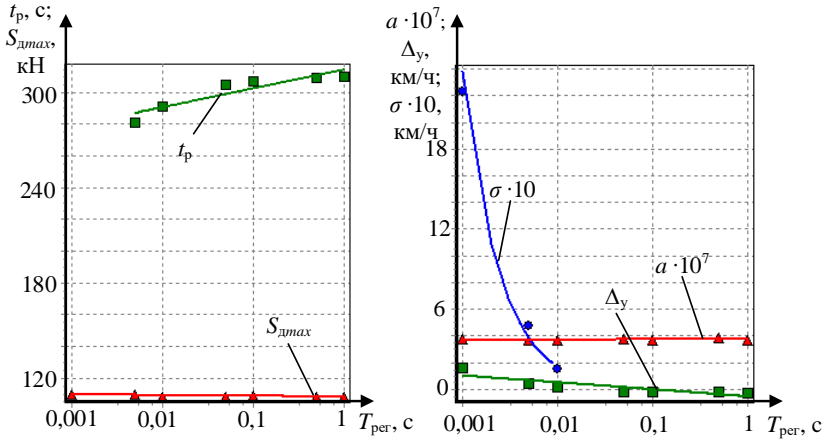


Рисунок 7 – Графики зависимостей величин показателей качества САУ от величины коэффициента T_{per} интегральной части ПИД-регулятора скорости

Из анализа результатов (рисунок 5), следует, что с увеличением доли ускорения x_1 , а значит, и ускорения поезда на этапе его растяжения, время переходного процесса t_p уменьшается в 1,2 раза (с 307,2 с до 251,3 с), а величина максимальной продольной динамической силы S_{dmax} , возникающей в поезде, возрастает в 1,6 раза (со 109,3 кН до 169,7 кН). Величина суммы усталостных повреждений a сначала уменьшается в 2,5 раза (рисунок 5), достигая минимума при $x_1=0,6$ (что объясняется сокращением времени переходного процесса при повышении ускорения поезда); а далее снова возрастает в 1,6 раза из-за повышения величин продольных динамических сил в поезде. Модуль установившейся ошибки Δ_y не изменяется и составляет 0,199...0,200 км/ч. Перерегулирование σ отсутствует, поэтому его величина равна 0. Таким образом, изменение величины x_1 оказывает влияние на t_p , S_{dmax} и a .

Изменение величины $k_{рег}$ в диапазоне от $1 \cdot 10^5$ до $9 \cdot 10^5$ (рисунок 6) оказывает влияние на величины всех выбранных показателей качества. Так, величина S_{dmax} (рисунок 6) сначала уменьшается со 124 кН до 110 кН (что объясняется сокращением времени переходного процесса при повышении ускорения поезда), а затем возрастает до 180 кН из-за повышения силы тяги. Аналогично, величина суммы усталостных повреждений a сначала уменьшается с $3,37 \cdot 10^{-7}$ до $3,02 \cdot 10^{-7}$, а затем возрастает до $8,17 \cdot 10^{-7}$ (рисунок 6). Величина t_p сначала уменьшается со 307 с до 248 с из-за повышения силы тяги, а затем возрастает до 297 с в результате роста перерегулирования (рисунок 6). Также при повышении величины $k_{рег}$ возрастают величины установившейся ошибки Δ_y и перерегулирования σ (рисунок 6).

Увеличение величины коэффициента T_{per} в диапазоне от 0,001 до 1,0 вызывает повышение времени переходного процесса t_p (рисунок 7), а также уменьшение величин установившейся ошибки Δ_y и перерегулирования σ

(рисунок 7). На максимальную величину продольной динамической силы и сумму усталостных повреждений, накопленных автосцепками, изменение коэффициента $T_{\text{пер}}$ не оказывает влияния.

Таким образом, установлен характер влияния вариации параметров предложенной системы автоматического управления на величины показателей качества управления.

В четвёртом разделе выполнено решение задачи параметрического синтеза данной САУ скоростью с использованием методов однокритериальной и многокритериальной оптимизации.

Требуемое качество управления достигается рациональным выбором параметров закона управления САУ. Как было показано, различные показатели качества предъявляют различные требования к величинам параметров САУ. Для определения параметров системы, соответствующих компромиссным значениям разнородных показателей качества, применяют методы многокритериальной оптимизации. В данных методах на основании значений нескольких частных критериев определяют значение целевой функции Π , позволяющей найти компромисс между разнородными критериями качества. Значение целевой функции в данной работе вычисляется следующим образом

$$\Pi = \sqrt{\frac{1}{x} \sum_{k=1}^n \left(\frac{U_k - U_k^*}{U_k^{**} - U_k^*} \right)^2}, \quad (6)$$

где x – число выбранных показателей (критериев) качества;

U_k – фактическое значение k -го показателя качества;

U_k^* – минимальное значение k -го показателя качества. Значения U_k^* определяют до решения задачи многокритериальной оптимизации путём решения задачи однокритериальной оптимизации для каждого показателя качества;

U_k^{**} – допустимое (максимальное) значение k -го показателя.

В ходе решения задачи параметрического синтеза выполняется поиск минимума целевой функции Π , которому соответствуют компромиссные значения разнородных показателей качества. Для поиска минимума целевой функции используется метод оптимизации Нелдера-Мида. При решении задачи параметрического синтеза моделировалось движение грузового поезда, состоящего из электровоза массой 192 т, оборудованного данной САУ, и 71 вагона. Движение поезда происходит по площадке в режиме трогания с места, разгона до скорости 40 км/ч с переходом к стабилизации и последующим разгоном до 80 км/ч. Выбраны 5 вариантов формирования поезда с различной массой одного вагона – 90 т, 75 т, 60 т, 45 т и 30 т.

В качестве оптимизируемых параметров САУ выбраны: доля x_1 ускорения (замедления), реализуемого на первом этапе изменения силы тяги (торможения) от максимальной величины заданного ускорения (замедления), параметры $k_{\text{раст}}$ и $k_{\text{сж}}$ устройства ПУ5; постоянные времени T_1 и T_2 задатчика

интенсивности (устройства ПУ2); параметры $k_{рег}$ и $T_{рег}$ регулятора скорости. Для расчёта целевой функции каждый раз выполнялся цикл моделирования движения поезда с определёнными значениями этих параметров, при этом определялись величины выбранных показателей качества САУ – величины перерегулирования σ , величины установившейся ошибки Δ_y , суммы усталостных повреждений a , накопленных автосцепками поезда за время моделирования. На основании значений этих показателей выполнялся расчёт значения целевой функции.

Величины параметров САУ и показателей качества, определённые в результате решения задачи параметрического синтеза для различных вариантов формирования поезда, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Величины параметров САУ и показателей качества управления, определённые в результате решения задачи параметрического синтеза для различных вариантов формирования поезда.

Параметр (показатель)	Масса поезда, т				
	2322 ($m_{ваг}=30$ т)	3387 ($m_{ваг}=45$ т)	4452 ($m_{ваг}=60$ т)	5517 ($m_{ваг}=75$ т)	6582 ($m_{ваг}=90$ т)
Параметры САУ					
T_1 , с	2,278	2,112	1,854	1,782	1,442
T_2 , с	0,976	1,058	0,774	1,335	1,284
x_1	0,498	0,457	0,386	0,436	0,352
$k_{рег}$	149902	248651	371137	385092	601760
$T_{рег}$, с	0,299	0,279	0,243	0,268	0,226
$k_{раст}$	0,749	0,729	0,693	0,718	0,676
$k_{сж}$	0,290	0,277	0,243	0,269	0,224
Показатели качества САУ					
t_p , с	484,9	514,2	550,8	599,9	639,4
a	$2,54 \cdot 10^{-7}$	$2,52 \cdot 10^{-7}$	$2,64 \cdot 10^{-7}$	$2,49 \cdot 10^{-7}$	$2,70 \cdot 10^{-7}$
$S_{дmax}$, кН	149,4	150,6	148,1	148,8	147,4
Δ_y , км/ч	-0,416	0,296	0,287	0,252	0,189
σ , км/ч	0	0,372	0,122	0,172	0,117

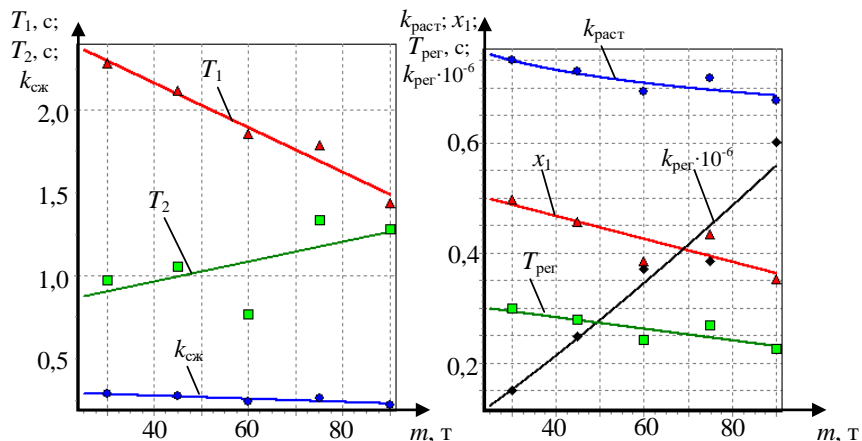
Графики зависимостей полученных величин показателей качества САУ от средней массы вагона поезда приведены на рисунке 8. С целью использования в САУ скоростью эти зависимости целесообразно представлять в виде математических выражений, которые позволят найти рациональные значения параметров САУ для поезда с различной величиной средней массы вагона. Аналитические выражения, полученные в результате аппроксимации зависимостей рациональных величин параметров САУ от массы вагона, представлены в таблице 3.

Использование данных зависимостей в модуле адаптации А САУ скоростью локомотива грузового поезда позволяет рассчитать величины

параметров САУ, обеспечивающие рациональные значения показателей качества, для поезда с любой средней массой вагона (в установленных пределах), что подтверждается результатами пробных расчётов.

а)

б)



а – зависимости постоянных времени задатчика интенсивности T_1 и T_2 , коэффициента $k_{сж}$ для оценки сжатого состояния поезда от средней массы вагона поезда; б – зависимости доли ускорения x_1 , параметров регулятора скорости $k_{пер}$ и $T_{пер}$, коэффициента $k_{раст}$ для оценки растянутого состояния поезда от средней массы вагона поезда

Рисунок 8 – Графики зависимостей параметров САУ от средней массы вагона поезда

Таблица 3 – Аналитические выражения, связывающие рациональные величины параметров САУ скоростью со средней массой вагонов поезда

Параметр	Аналитическое выражение
T_1 , с	$y(m) = -0,0134m + 2,695$
T_2 , с	$y(m) = 0,00598m + 0,727$
x_1	$y(m) = -0,00208m + 0,550$
$k_{пер}$	$y(m) = 2686m^{1,186}$
$T_{пер}$, с	$y(m) = -0,00105m + 0,325$
$k_{раст}$	$y(m) = 0,986m^{-0,0808}$
$k_{сж}$	$y(m) = -0,00093m + 0,317$

Таким образом, использование в САУ скоростью настроечных кривых для определения рациональных значений параметров данной системы, найденных путем решения задачи параметрического синтеза САУ, позволяет обеспечить требуемое качество управления грузовым поездом во всём диапазоне изменения средней массы вагона поезда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Разработана адаптивная система автоматического управления скоростью движения грузового поезда. Для обеспечения требуемого качества управления скоростью в эксплуатационном диапазоне изменения масс поездов в САУ осуществляется выбор параметров элементов системы, а также закона управления на основании информации о средней массе вагона поезда, что позволило обеспечить значения показателей качества управления, близкие к рациональным.

2 Предложен способ оценки состояния межвагонных соединений поезда на основании информации о силах тяги или электрического торможения, а также расположении поезда на элементах профиля. Реализация предложенного способа в системе автоматического управления позволяет оптимизировать алгоритмы управления скоростью в переходных режимах движения поезда без ухудшения качества управления в соответствии с принятой системой критериев, результатом чего является сокращение времени протекания переходного процесса при изменении заданной скорости движения и, следовательно, достижения большей технической скорости движения поезда.

3 Определено влияние вариации параметров закона управления САУ на величины показателей качества управления. Показано, что достижение рациональных величин различных показателей качества происходит при различных значениях параметров САУ. Определение величин параметров закона управления, обеспечивающих компромисс между разнородными показателями качества целесообразно осуществлять путём решения задачи параметрического синтеза САУ с использованием методов многокритериальной оптимизации.

4 Выбрана методика решения задачи параметрического синтеза САУ скоростью грузового поезда. Отыскание параметров САУ, обеспечивающих компромисс между разнородными критериями качества, выполнено путём минимизации целевой функции, используемой для преобразования векторного критерия качества к скалярному. В результате решения задачи параметрического синтеза найдены аналитические выражения, устанавливающие связь между параметрами поезда и параметрами устройств САУ скоростью. Данные выражения реализованы в блоке адаптации САУ и позволяют достичь требуемого качества управления во всём диапазоне изменения масс поездов.

5 Разработана уточненная математическая модель межвагонной связи пружинно-фрикционных поглощающих аппаратов современных типов (на примере аппарата ПМК-110). Применение данной модели позволило повысить точность определения величин продольных сил и характера их изменения в переходных режимах движения в моделях поездов, состоящих из вагонов современных моделей, а также улучшить определение величин показателей качества управления при исследовании САУ.

6 Результаты, полученные во время разработки системы

автоматического управления скоростью грузового поезда, рекомендуется использовать при разработке программного обеспечения бортовой системы управления электровозами и тепловозами с непрерывным управлением силами тяги и торможением.

7 Перспективами дальнейшей разработки темы является рассмотрение вопроса совершенствования системы автоматического управления скоростью при реализации вождения поездов с использованием технологии «виртуальная сцепка».

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

а) в рецензируемых научных изданиях:

1 Жухин, Н. О. Новые подходы к разработке систем автоматического управления скоростью длинносоставных поездов / Н. О. Жухин, О. Е. Пудовиков // Известия Транссиба. – 2020. – №4(44). – С. 81–89.

2 Жухин, Н. О. Решение задачи параметрического синтеза для САУ скоростью длинносоставного грузового поезда / Н. О. Жухин, В. И. Легкая // Бюллетень результатов научных исследований. – 2023. – № 1. – С. 170–182.

3 Беспалько С. В. Уточнение математической модели межвагонной связи с пружинно-фрикционными поглощающими аппаратами для исследования продольных колебаний грузового поезда / С. В. Беспалько, Н. О. Жухин, О. Е. Пудовиков // Бюллетень результатов научных исследований. – 2023. – № 2. – С. 54–70.

б) в изданиях, которые входят в международные реферативные базы данных и системы цитирования:

4 Жухин, Н. О. Совершенствование алгоритмов управления скоростью движения длинносоставных грузовых поездов / Н. О. Жухин, О. Е. Пудовиков // Russian Electrical Engineering (Электротехника). – 2021. – № 9. – С. 41–46.

5 Zhukhin, N. O. Automatic Speed Control of Heavy-Haulers Trains / S. K. Sharma, N. O. Zhukhin, O. E. Pudovikov et al // Transportation Energy and Dynamics, Energy, Environment, and Sustainability. Under exclusive license to Springer Nature Singapore Pte Ltd. – 2023. – V. 92, № 9. – P. 23–41.

в) патенты и свидетельства:

6 Патент на изобретение № 2789231, МПК В61L 27/04, В60L 15/20. Способ и устройство для автоматического регулирования скорости движения длинносоставного грузового поезда: опубл. 31.01.2023, б.и. №4 / Н. О. Жухин, О. Е. Пудовиков.

7 Свид. 2023661652 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа для исследований продольных колебаний грузового поезда при автоматическом управлении и параметрического синтеза системы автоматического управления / Н. О. Жухин, О. Е. Пудовиков; заявитель и правообладатель

ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ), РУТ (МИИТ) (RU). – №2023660137; заявл. 19.05.23; опубл. 01.06.23. Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

г) в других изданиях и материалах конференций:

8 Жухин, Н. О. Повышение эффективности систем автоматического управления скоростью длинносоставных поездов / Н. О. Жухин, О. Е. Пудовиков // Локомотивы. Электрический транспорт – XXI век : материалы VII Международной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 10–12 ноября 2020 г. – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2020. – С. 73–76.

9 Жухин, Н. О. Новые принципы разработки САУ скоростью длинносоставных поездов / Н. О. Жухин, О. Е. Пудовиков // Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции «Неделя науки – 2021», Москва, апрель – май 2021 г. – М.: Российский университет транспорта, 2021. – С. 32–33.

10 Жухин, Н. О. Интеллектуальное управление скоростью движения грузового поезда с локомотивами, распределёнными по составу / Н. О. Жухин, В. И. Легкая, О. Е. Пудовиков // Интеллектуальные транспортные системы: материалы Международной научно-практической конференции «Интеллектуальные транспортные системы» (26 мая 2022 г.) – Москва: РУТ (МИИТ), 2022. – М. Издательство Перо, 2022. – С. 159–166.

11 Жухин, Н. О. Выбор параметров интеллектуальной системы автоматического управления скоростью грузового поезда / Н. О. Жухин, В. И. Легкая, О. Е. Пудовиков // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте: Материалы V всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Омск, 27–28 октября 2022 года. – Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2022. – С. 327–337.

ЖУХИН НИКИТА ОЛЕГОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО
УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ ГРУЗОВОГО ПОЕЗДА**

2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация
(технические науки)

Подписано в печать

«__» _____ 2024 г.

Формат 60x90/16

Объем 1.5 усл.п.л.

Тираж 80 экз.

Заказ № _____