

E15  
МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ СССР

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ИНСТИТУТ  
ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ИМЕНИ М.И.КАЛИНИНА

На правах рукописи

ЕВДОМАХА ГРИГОРИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ

УДК 629.4.016.12

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЯГОВЫХ РАСЧЕТОВ, УЧИТЫВАЮЩИХ  
ДИНАМИЧЕСКУЮ НАГРУЖЕННОСТЬ ПОЕЗДА

(05.22.07 - Подвижной состав и тяга поездов)

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Днепропетровск-1967

НТБ  
ДНУЖТ

Работа выполнена в Днепропетровском ордена Трудового Красного Знамени институте инженеров железнодорожного транспорта имени М.И.Калинина.

Научный руководитель - заслуженный работник высшей школы УССР, доктор технических наук, профессор Е.П.БЛОХИН

Официальные оппоненты:

кандидат технических наук, лауреат Государственной премии СССР

А.Л.ЛИСИЦЫН,

доктор технических наук, профессор Л.А.МАНАШКИН.

Ведущее предприятие - Приднепровская железная дорога.

Защита диссертации состоится " 4 " июля 1987 года.  
в 12 ч. 00 мин. на заседании Специализированного Совета  
К ИА.07.01 в Днепропетровском ордена Трудового Красного Знамени  
институте инженеров железнодорожного транспорта по адресу:  
320700 ГСП, г.Днепропетровск, 10, ул. Академика Лазаряна, 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан " 3 " июня 1987 года.

Поверніть книгу не пізніше зазначеного терміну.


Днепропетровский  
инженерно-транспортный  
институт имени  
М.И.Калинина  
ТЕКА

Л.В.ПЕТРОВИЧ

НТБ  
ДНУЖТ

В диссертации выполнены теоретические и экспериментальные исследования оптимальных режимов вождения длинносоставных поездов по критерию минимума времени хода и минимума расхода электроэнергии на тягу с учетом ограничения на уровень продольных динамических усилий.

Поставленная задача решена с помощью математического моделирования, методов оптимизации и быстродействующих ЭВМ. При решении задачи использован метод дискретного динамического программирования Р.Беллмана, с учетом внесенных в него изменений, соответствующих специфике рассматриваемой задачи. В результате выполненных исследований предложена методика тяговых расчетов на ЭВМ с учетом динамической нагруженности поезда. Для оптимизации (по критерию минимума энергетических затрат на тягу) времен хода пригородных поездов и метро предложен алгоритм, который позволяет эффективнее (по затратам машинного времени) получать оптимальное распределение времен хода.

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ. В "Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1986-1990 годы и на период до 2000 года" подчеркивается, что увеличение провозной и пропускной способностей дорог следует считать основным направлением развития железнодорожного транспорта страны. Поэтому повышение массы и длины грузовых поездов является одним из важных и эффективных направлений технической политики на транспорте. Увеличение провозной способности железных дорог может быть достигнуто путем организации регулярного движения длинносоставных поездов. При движении таких поездов, по переломам продольного профиля пути, продольные динамические усилия могут достигать опасных (с позиции прочности и устойчивости экипажей в колее) значений.

Поэтому режим ведения поезда следует выбирать с учетом динамической нагруженности подвижного состава на каждом конкретном участке.

Наряду с увеличением пропускной и провозной способностей железных дорог в XII пятилетке поставлена задача экономного расходования топливно-энергетических ресурсов. Железнодорожный транспорт только на тягу поездов и эксплуатационные нужды за год расходует более 58 млрд. кВт.ч. электроэнергии. Одним из эффективных путей в этом направлении является использование наиболее экономичных

5089a

14

режимов управления локомотивами при вождении поездов.

Задача выбора рациональных режимов вождения длинносоставных поездов приобретает еще большую актуальность в связи с разработками систем автоматического (САУ) и радиоуправления (СМЕТ-Р) вспомогательными локомотивами.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ. Целью работы является:

- анализ существующих моделей тяговых расчетов, переходных режимов движения поездов и методов оптимизации, применяемых для определения их рациональных режимов вождения;
- разработка гибридной математической модели (гибкая нерастяжимая нить с переменной погонной массой и система масс, соединенных нелинейными деформируемыми элементами, учитывающими наличие зазоров в упруги) движения поезда;
- разработка алгоритма решения задачи выбора режима ведения длинносоставного поезда с использованием динамического программирования Р.Беллмана в дискретной форме;
- составление программ для ЭВМ ЕС-1050 производства обобщенного тягового расчета по критериям минимума времени хода по участку и минимума энергетических затрат на тягу поездов;
- разработка алгоритма и программы для ЭВМ ЕС-1050 оптимизации перегонных времени хода пригородных поездов по критерию энергетических затрат на тягу;
- сравнение с существующими моделями тяговых расчетов и результатами экспериментальных поездок.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ. Для решения поставленной задачи были применены современные методы математического моделирования, использующие теорию дифференциальных уравнений, теорию построения разностных схем для получения численных решений уравнений; методы оптимизации и быстродействующие ЭВМ.

Результаты теоретических исследований сопоставлялись с результатами экспериментальных поездок.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА. Разработана гибридная математическая модель движения поезда, в которой в одних случаях движения поезд рассматривается как гибкая нерастяжимая нить с переменной погонной массой, в других, как система масс, соединенных нелинейными деформируемыми элементами, учитывающими наличие зазоров в упруги. Такая модель позволяет существенно сократить время решения задачи.

Поставлена и решена задача выбора оптимального режима ведения поезда с учетом продольных динамических усилий с использова-

НТБ  
ДНУЖТ

нием метода динамического программирования в дискретной форме.

Разработана программа на алгоритмическом языке ФОРТРАН-IV для ЭВМ ЕС-1050, реализующая методику выбора режима ведения поезда с учетом динамической нагруженности поезда.

Разработан алгоритм и программа оптимизации перегонных времен хода как пригородных поездов и метро, так и грузовых поездов по критерию минимума энергетических затрат на тягу с использованием метода динамического программирования.

**ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ.** Разработанная методика выбора режима ведения длинносоставных поездов с учетом продольных динамических усилий позволяет составлять режимную карту вождения таких поездов на каждом конкретном участке железной дороги. Использование оптимальных режимов вождения обеспечивает экономию электроэнергии на тягу поездов до 10% в зависимости от типа профиля. В пригородном движении учет оптимальных перегонных времен хода позволяет экономить до 4% электроэнергии на тягу.

**РЕАЛИЗАЦИЯ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ.** Основные результаты исследований использованы для разработки режимных карт вождения длинносоставных, в том числе соединенных, поездов массой 8400-10000 т на электрифицированных участках Приднепровской и Одесской железных дорог.

**АПРОБАЦИИ РАБОТЫ.** Основные результаты работы докладывались на Всесоюзной конференции "Проблемы механики железнодорожного транспорта" /1984 г., Днепропетровск/; на Всесоюзной отраслевой конференции молодых ученых железнодорожного транспорта /1984 г., Москва/; на научно-техническом совете локомотивной службы Приднепровской железной дороги; на совещании локомотивных бригад депо Знаменка Одесской железной дороги; на заседании кафедры "Строительная механика".

**ПУБЛИКАЦИИ.** По материалам диссертации опубликовано 6 работ.

**ОБЪЕМ РАБОТЫ.** Диссертационная работа с таблицами и рисунками изложена на 140 страницах и состоит из введения, пяти глав, заключения и четырех приложений. Библиография содержит 122 наименований литературных источников.

**ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.**

В первой главе рассмотрено современное состояние вопроса, сформулирована цель исследования, приведена разработанная математическая модель и постановка задачи выбора оптимального режима ведения поезда.

Разработкой теории тяговых расчетов занимались такие видные ученые и инженеры как Б.Д.Воскресенский, В.Н.Щегловитов, И.И.Васильев, А.М.Бабичков, Е.Ф.Егорченко, В.Е.Розенфельд, Б.М.Максимович, А.П.Новиков, П.А.Гурский, О.Н.Исаакян, П.Г.Гребенюк, П.Н.Астахов и другие авторы.

Применению современного математического аппарата, методов оптимизации и ЭВМ к определению рациональных режимов вождения поездов при электрической тяге посвящены работы В.М.Сидельникова, Э.С.Почаевца, Е.В.Ерофеева, Н.Я.Пузанова, А.А.Босова, К.С.Айзинбуда, Г.Г.Марквердта, Р.И.Мирошниченко. Задачей оптимизации режимов вождения тепловозов занимались А.П.Новиков, Е.Я.Гаккаль, Д.П.Петров, А.Д.Попов, А.М.Костромин и другие авторы.

Исследованию динамических усилий, действующих на вагоны при переходных режимах движения поездов, посвящены работы Н.Е.Жуковского, В.А.Лазаряна, А.Н.Годицкий-Цвирко, Е.П.Блохина, Ф.В.Флоринского, С.В.Вершинского, Л.Н.Никольского, Л.А.Манашкина, Н.А.Панькина.

Существующие модели тяговых расчетов при постановке задачи оптимального управления движением поезда не учитывают продольные динамические усилия в сцепных приборах. Такая модель правомерна, когда продольные усилия небольшие. С увеличением массы и длины поезда продольные усилия возрастают и могут достигать опасных (с позиции прочности подвижного состава и устойчивости его в колее) значений, что приводит к необходимости их учета в задачах выбора режима ведения длинносоставных поездов. Поэтому в настоящее время актуальной является разработка такой модели тягового расчета (обобщенного тягового расчета), которая позволила бы с единых позиций рассматривать энергетические затраты на перемещение поезда, вопросы продольной динамики и устойчивости экипажей в колее.

В диссертации движение поезда описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{v}_j(t) = [S_j(t) - S_{j+1}(t) + F_j(t, v_j, x, u(x), U_c)] / m_j(1 + \gamma) & (j = 1 + n, S_1 = S_{n+1} = 0); \\ \dot{q}_1(t) = \dot{x}_1(t) = v_1(t); \\ \dot{q}_j(t) = v_{j-1}(t) - v_j(t) & (j = 2 + n); \\ \text{н.у. } v_1(0) = v_{j0}; \quad q_j(0) = q_{j0}; \quad \text{д.у. } S_j(0) = S_{j0}, \end{cases} \quad (I)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d(\sigma)}{dx} &= \frac{2\xi}{(P+Q)(1+\Gamma)} [F_k(v, u(x), U_c) - W(v, x, u(x)) - b_r(v, \kappa'(t), u(x))], \\ \frac{dT}{dx} &= \frac{\tau_{\infty}(I_A(v, u(x), U_c)) - T(x)}{v(x)T(I_A(v, u(x), U_c))}, \end{aligned} \right. \quad (2)$$

$$\text{и.ч. } \alpha(t=0) = \alpha_0; \quad v(0) = v_0; \quad T(0) = T_0,$$

где  $v_j$  - скорость  $j$ -го экипажа;  $S_j, S_{j+1}$  - усилия в его автосцепках;  $Q_j = x_{j-1} - x_j$  - абсолютная деформация  $j$ -й связи;  $\dot{Q}_j$  - скорость этой деформации;  $m_j$  - масса  $j$ -го экипажа;  $n$  - число экипажей;  $x_j$  - абсолютное перемещение центра масс  $j$ -го экипажа;  $F_j$  - сумма проекций внешних сил на касательную траектории движения;  $v$  - скорость центра масс поезда;  $x$  - абсолютное перемещение центра масс поезда;  $\gamma$  - коэффициент инерции вращающихся масс;  $P, Q$  - масса локомотива и поезда;  $\xi$  - некоторая постоянная;  $F_k$  - сила тяги локомотива;  $W = W_0'(v, u(x)) + W_0''(v) + W_i(x) + W_r(x)$  - естественное сопротивление поступательному движению поезда;  $b_r$  - тормозная сила, действующая на поезд (электрическое и пневматическое торможение);  $\kappa'$  - суммарная сила нажатия тормозных колодок поезда;  $T$  - температура перегрева тяговых двигателей;  $\tau_{\infty}, \Gamma$  - тепловые характеристики электродвигателя;  $I_A$  - ток тягового двигателя (ТЭД);  $U_c$  - напряжение на токоприемнике электроподвижного состава (ЭПС) ( $U_c = U_c(x)$ );  $u(x)$  - управление (номер позиции контроллера). Модель (1) - описывает движение поезда, как системы дискретных масс, соединенных нелинейными деформируемыми элементами, учитывающими наличие зазоров в упряжи. Модель (2) - описывает движение поезда, как гибкой нерастяжимой нити с переменной погонной массой  $P_n(z)$  ( $0 \leq z \leq L_n$ ), где  $L_n$  - длина поезда.

Таким образом, каждому состоянию поезда при его движении будет соответствовать изображающая точка в фазовом пространстве  $(x, v, T, U_c, \tilde{S})$ , где координата  $\tilde{S}$  вводится следующим образом

$$\tilde{S}(t) = \max_j S_j(t)$$

и определяется из решения системы уравнений (1).

Область допустимых фазовых траекторий определяется следующими ограничениями:

$$\tilde{G}(x, v, T, \tilde{S}) : \left\{ \begin{aligned} x_n \leq x \leq x_k \\ 0 \leq T \leq T_{\text{доп}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} v^{\min}(x) \leq v \leq v^{\max}(x) \\ S^{\min}(v) \leq \tilde{S} \leq S^{\max}(v) \end{array} \right\} \quad (4)$$

где  $x_n$ ,  $x_k$  - координаты начальной и конечной точек пути;  
 $\tau_{\text{зад}}$  - максимально-допустимая температура перегрева ТЭД;  $v^{\max}(x)$ ,  
 $v^{\min}(x)$  - максимальное и минимальное ограничения по скорости дви-  
 жения;  $S^{\min}(v)$ ,  $S^{\max}(v)$  - максимально-допустимые сжимающие и  
 растягивающие силы в сцепных приборах.

Что касается вектора управления  $u(x) = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ , то в соот-  
 ветствии с правилами технической эксплуатации на все возможные  
 его значения наложены ограничения, которые можно записать следую-  
 щим образом:

$$\tilde{U} : \left\{ \begin{array}{l} J_A(v, u_i, u_j(x)) \leq J_A^{\max} \\ F_k(v, u_i(x), u_c) \leq \psi_k(v) P \\ K'(t, u_i(x)) \psi_k(v) \leq \psi_k(v) q_0 \\ B_k(v, u_j(x)) \leq B_k^{\max}(v) \end{array} \right\}, \quad (5)$$

где  $J_A^{\max}$  - максимально допустимый ток двигателя;  $q_0$  - нагрузка  
 на ось экипажа;  $\psi_k$  - коэффициент сцепления колеса с рельсом;  $K'$  -  
 сила нажатия тормозных колодок колесной пары;  $\psi_k$  - коэффициент  
 трения тормозной колодки о колесо.

В качестве критерия оценки закона управления возьмем функцио-  
 нал

$$J[u] = \int_{x_n}^{x_k} f_0(x, v(x), u(x)) dx. \quad (6)$$

Тогда задачу выбора рационального режима ведения движения состав-  
 ного поезда можно сформулировать следующим образом: найти такой  
 закон управления  $u(x) \in \tilde{U}$ , чтобы соответствующее ему решение систе-  
 мы уравнений (1-2) принадлежало области  $\tilde{G}$ , критерий оптималь-  
 ности (6) принимал минимальное значение, а начальная и конечная  
 точки траектории принадлежали некоторым множествам  $\Omega_0$  и  $\Omega_1$ ,  
 где  $\Omega_0$  - множество начальных значений ( $x_0$ ,  $v_0$ ,  $\tau_0$ ,  $\tilde{S}_0$ );  
 $\Omega_1$  - множество конечных значений ( $x_k$ ,  $v_k$ ,  $\tau_k$ ,  $\tilde{S}_k$ ).

Вторая глава посвящена выбору метода оптимизации, разработке  
 алгоритма решения поставленной задачи, основанного на методе функ-  
 циональных уравнений Беллмана. Приводятся результаты расчетов на  
 ЭВМ и опытных поездах.



Показана целесообразность применения метода динамического программирования к решению рассматриваемой задачи (по сравнению с принципом максимума Л.С.Понтрягина).

Приведено сравнение различных моделей поезда (материальная точка, гибкая нерастяжимая нить с переменной погонной массой, система масс) при заданном законе управления. Установлено, что при выборе режима ведения длинносоставного поезда массой 10000 т наибольшую погрешность допускает модель поезда в виде материальной точки (по скорости максимальное отклонение достигает до 3-4 км/ч, а по сопротивлению от профиля пути до 15-20%). Максимальное отличие по скорости моделей поезда в виде гибкой нерастяжимой нити и системы масс составляет не более 0,3-0,6 км/ч в режиме пневматического торможения, а в остальных режимах, это отличие составляет не более 0,1-0,3 км/ч.

Для решения поставленной задачи разработана гибридная математическая модель поезда (гибкая нерастяжимая нить с переменной погонной массой + система масс), которая позволяет существенно сократить время решения задачи.

С позиций динамического программирования рассматриваемую задачу (1-6) можно отнести к многомерным процессам управления. Однако, благодаря специфике задач тяговых расчетов, эту задачу можно свести к одномерным процессам управления, путем рассмотрения сочетания позиций в пределах каждого режима (в случае синхронного управления вектор управления имеет размерность 1).

Функциональные уравнения Р.Беллмана для данной задачи имеют вид:

$$\begin{cases} f_1(v_i(u)) = \Delta J_1(v_i, v_i) \\ f_2(v_i(u)) = \min_{u \in U} [\Delta J_2(v_j, v_i) + f_1(v_i)] \\ f_3(v_i(u)) = \min_{u \in U} [\Delta J_3(v_j, v_i) + f_2(v_j)] \\ f_n(v_i(u)) = \min_{u \in U} [\Delta J_n(v_j, v_i) + f_{n-1}(v_j)], \end{cases} \quad (7)$$

где  $\Delta J_i = \int_{x_i}^{x_{i+1}} f_i(x, u, u) dx$  - приращение функционала на  $i$ -м шаге;  
 $f_i$  - функция Беллмана на  $i$ -ом шаге.

Вычислительная схема алгоритма базируется на методе функциональных уравнений, с учетом внесенных в него изменений, соответствующих специфике рассматриваемой задачи. Эти дополнения позволяют избежать "тупиковых" ситуаций при выборе режима управления, уп-

ростить алгоритм коррекции управления по продольным усилиям, уменьшить время решения задачи на ЭВМ (рассматриваются задачи с возможным числом управлений  $K_u \approx 50$ ).

В работе рассмотрена оптимизация режима вождения длинносоставных поездов по критериям: а) минимума времени хода по участку

$$J[u] = \int_{x_n}^{x_k} \frac{dx}{v(x,u)};$$

б) минимума энергетических затрат на тягу поездов при заданном времени хода

$$J[u] = \int_{x_n}^{x_k} \frac{Q(v,u) \eta_3(v,u) dx}{v(x,u)}, \quad t_x[u] = t_j,$$

где  $Q(v,u)$  – расход энергии в единицу времени;  $\eta_3(v,u)$  – коэффициент полезного действия локомотива;  $t_x$  – время хода по перегону;  $t_j$  – заданное время хода.

Рассмотренные алгоритмы оптимизации режимов вождения соединенных поездов реализованы в виде программы для ЭВМ ЕС-1050 на алгоритмическом языке ФОРТРАН-IV.

Результаты решения задач оптимизации для реальных участков и последующая их проверка в опытных поездках показали возможность уменьшения уровня продольных динамических усилий в 1,5–2 раза и достижения экономии электроэнергии на тягу до 10%.

Установлено, что несинхронное управление лучше по сравнению с синхронным по уровню продольных динамических усилий на 20–25% и экономии электроэнергии на тягу на 5–6%.

В третьей главе приведено описание программы выбора оптимальных режимов вождения длинносоставных поездов. Программа предназначена для выбора режима вождения длинносоставных поездов с учетом ограничения по уровню продольных динамических усилий и критериям: а) минимума времени хода; б) минимума энергетических затрат на тягу. Алгоритм программы основывается на методе дискретного динамического программирования Р. Беллмана, с учетом внесенных в него изменений, соответствующих специфике рассматриваемой задачи. Программа выполнена на языке "ФОРТРАН-IV" в системе ОС-ЕС.

Программа состоит из основной программы и 59-ти подпрограмм. Структурная блок-схема, которая иллюстрирует структуру программы и связи между отдельными элементами – подпрограммами приведена на рис.1. Пунктиром отмечены подпрограммы относящиеся к модели поез-

НТБ  
ДНУЖТ



да в виде системы масс (1). Подпрограммы, как правило, состоят из двух модулей: основного – выполняющего определенную функцию в процессе счета и вспомогательного – предназначенного для ввода и формирования исходных данных, необходимых для работы соответствующего основного модуля. Передача данных между подпрограммами осуществляется через формальные параметры и общие области. Приведены инструкции по подготовке исходной информации и инструкции по эксплуатации программы. Исходная информация для производства обобщенных тяговых расчетов на ЭВМ подразделяется на шесть информационных групп: а) информация о расчетных участках; б) параметры экипажей и межавгонных соединений; в) сведения о локомотивах; г) данные о подвижном составе; д) информация о системе электроснабжения; е) информация-задание на обобщенный тяговый расчет. Результаты работы программы выдаются на печать в форме таблицы. Затраты машинного времени ЭВМ ЕС-1050 составляет в среднем 180 мин на 100 км пути и зависят от количества управлений, числа масс "укороченной системы", шага интегрирования.

Четвертая глава посвящена оптимизации перегонных времен хода пригородных поездов и метро. Заданное чистое (без учета продолжительности стоянок) время движения пригородного поезда по участку может быть распределено по перегонам в различных вариантах. Возникает задача определения такого распределения перегонных времен хода, при котором затраты энергии на тягу минимальны:

$$\min \rightarrow L(t_1, t_2, \dots, t_N) = \sum_{i=1}^N g_i(t_i); \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^N t_i = t_3, \quad t_i \leq t_i^* \leq \bar{t}_i, \quad i = 1 \div N, \quad (8)$$

где  $t_3$  – заданное время хода по участку;  $t_i$  – время хода по  $i$ -му перегону;  $N$  – количество перегонов;  $g_i(t_i)$  – зависимость расхода энергии от времени движения по  $i$ -му перегону. Требуется определить вектор  $t^* = [t_1^*, t_2^*, \dots, t_N^*]$ , минимизирующий функционал (7) при ограничениях (8).

При решении задачи (7), (8) с помощью метода функциональных уравнений Р.Беллмана строится в прямом направлении последовательность функций:

$$\begin{cases} f_1(t) = g_1(t) \\ f_2(t) = \min_{t_2} \{g_2(t_2) + f_1(t - t_2)\} \end{cases}$$

$$\begin{cases} f_i(t) = \min_{t_i} \{g_i(t_i) + f_{i-1}(t-t_i)\} \\ f_n(t) = \min_{t_n} \{g_n(t_n) + f_{n-1}(t-t_n)\} \end{cases}$$

а затем в обратном направлении, зная общее время хода  $t_j$ , из последовательности функций выписываем оптимальное распределение перегонных времен хода  $t^*$ . Этот метод является общим методом при решении такого класса задач. Для функций полезности, имеющих почти всюду вторую производную, предлагается алгоритм, который позволяет эффективнее (по затратам машинного времени) получать решение задачи, чем метод функциональных уравнений.

При этих предположениях для данной задачи получено уравнение оптимальной траектории в дифференциальной форме:

$$\frac{dt_i^*}{dt} = \begin{cases} \text{const} & , \text{ если } t_i^* \in \text{границе области } \Omega \\ \frac{f_{i-1}'(t-t_i^*)}{f_{i-1}'(t-t_i^*) + g_i'(t_i^*)} & \text{ если } t_i^* \in \text{int } \Omega \end{cases} \quad (9)$$

с граничным условием  $t_i^*(t_i) = t_i$  (10)

( $\Omega$  - область, в которой ищется решение, приведена на рис.2). С помощью уравнения (9)-(10) удалось получить условие разрывности оптимальной траектории для задачи (7)-(8). На рис.2,3 показаны траектории для выпуклых функций полезности и функций полезности имеющих точки перегиба.

Поскольку уравнение (9) не всегда разрешимо аналитически, то переходим к конечно-разностной форме используя явную разностную схему:

$$t_i(t+\Delta) = G + \Delta \frac{V(t, t_i^*, \Delta)}{V(t, t_i^*, \Delta) + U(t_i^*, \Delta)}, \quad (II)$$

где  $G$  - константа, определяемая из (10).

Предлагаемый метод заключается в том, что решение получаем при помощи метода функциональных уравнений, но при построении функций Беллмана, используя уравнение (II), усовершенствуем метод поиска, заложенный в методе функциональных уравнений, т.е. фактически из области  $\Omega$  выделяем некоторую подобласть  $\Omega'$  и в ней, согласно метода функциональных уравнений, ищем решение.

В работе приведено сравнение методов Гросса, динамического программирования и предлагаемого - на количество опрашиваемых точек.

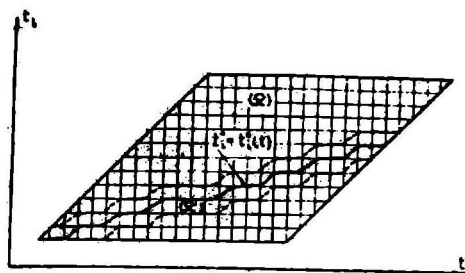


Рис.2. Траектория  $t_i^*(t)$  для выпуклых функций полезности.

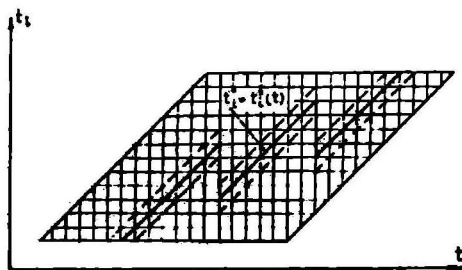


Рис.3. Траектория  $t_i^*(t)$  для функций полезности, имеющих точки перегиба.

Предлагаемый алгоритм проиллюстрирован на примере задачи распределения времени движения электропоезда по перегонам на участке А-Б, по критерию минимума энергетических затрат на тягу ( $\Delta = 0,25$  мин,  $\eta = 29$ ). В результате решения задачи предложено расписание движения электропоезда по перегонам, которое эффективнее (по затратам энергии) фактического расписания на 4,2%.

Приведены программа, написанная на алгоритмическом языке ФОРТРАН-IV для ЭВМ ЕС-1060 и инструкция по подготовке исходной информации.

Таким образом, разработанный алгоритм, позволяет в считанные минуты на ЭВМ ЕС-1060 решать задачу распределения времен хода пригородных поездов и метро по перегонкам по критерию минимума энергетических затрат на тягу.

Пятая глава посвящена экспериментальным исследованиям с длинносоставными поездами массой 8400-10000 т и соединенных массой 10000 т на грузонапряженных участках направления Кривбасс-Донбасс и Кривбасс-Карпаты.

Целью настоящих поездок являлось изучение продольных динамических усилий в длинносоставных и соединенных поездах при движении по участкам сложного профиля большой протяженности.

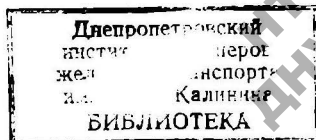
Управление движением ГЛ (головного) и ДЛ (дополнительного) локомотивами осуществлялось в соответствии с расчетными режимными картами, полученными с помощью разработанной методики обобщенного тягового расчета на ЭВМ ЕС-1060.

Экспериментальные исследования позволили провести окончательную корректировку расчетных режимных карт, дать рекомендации по рациональным и безопасным способам управления тяговыми и тормозными средствами локомотивов, которые вошли во "Временную инструкцию".

В реальных условиях исследовалось влияние несогласованных действий машинистов головного и вспомогательного локомотивов на уровень продольных динамических усилий при различных режимах движения поезда.

Анализ действия машинистов по изменению режимов работы показывает, что несоблюдение рекомендаций "Временной инструкции" может привести к значительным продольным динамическим усилиям.

Приведены режимные карты управления движением длинносоставных и соединенных поездов на конкретных участках Приднепровской и Одесской ж.д.



Опытные поездки подтвердили возможность уменьшения уровня продольных динамических усилий в 1,5–2 раза и достижения экономии электроэнергии на тягу до 10% при применении рациональных режимов вождения поездов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

1. Разработана гибридная математическая модель (гибкая нерастяжимая нить с переменной погонной массой и система дискретных масс, соединенных нелинейными деформируемыми элементами, учитывающими наличие зазоров в упругих) движения длинносоставного поезда. Такая модель позволяет существенно сократить время решения задачи. Задача обобщенного тягового расчета сформулирована как задача оптимального управления.

2. Разработаны методика и алгоритм выбора оптимального режима вождения длинносоставных поездов по критериям:

- а) минимума времени хода по участку;
- б) минимума энергетических затрат на тягу поездов при заданном времени хода. В основу вычислительного алгоритма положен метод динамического программирования в дискретной форме.

3. Составлена программа на алгоритмическом языке ФОРТРАН-IV для ЭВМ ЕС-1060 производства тягового расчета с учетом динамической нагруженности поезда.

4. Установлено (в результате сравнения тягового расчета, когда поезд рассматривается в виде материальной точки и обобщенного тягового расчета), что продольные динамические усилия оказывают существенное влияние на режимы вождения длинносоставного поезда на участках с перевалистым профилем пути.

5. Показано, что оптимальные режимные карты на управление движением поездов позволяют уменьшить уровень продольных динамических усилий в 1,5–2 раза.

6. Опытные эксплуатационные поездки подтвердили корректность теоретических предпосылок и методики выбора оптимальных режимов вождения длинносоставных поездов, показали возможность уменьшения уровня продольных динамических усилий в 1,5–2 раза и достижения экономии электроэнергии на тягу до 10% при движении таких поездов по участку с перевалистым профилем пути.

7. Получено необходимое условие разрывности оптимальной траектории в задаче распределения времен хода пригородных поездов.



8. Предложен алгоритм для решения задачи оптимизации перегонных времен хода пригородных поездов и метро, который позволяет эффективнее (по затратам машинного времени), для функций полезности, имеющих вторую производную, получать решение задачи, чем метод функциональных уравнений на 20%.

9. Разработана программа для ЭВМ ЕС-1050 оптимизации перегонных времен хода пригородных поездов и метро по критерию энергетических затрат на тягу поездов.

Результаты работы (режимные карты вождения длинносоставных поездов массой 8400 т одним электровозом и соединенных массой 10000 т с двумя электровозами, расположенными в голове и середине состава) внедрены на Приднепровской и Одесской железных дорогах. Годовой экономический эффект от внедрения соединенных поездов массой 10 тыс. тонн в 1986 году составил 545 тыс. руб. Разработанный пакет прикладных программ для ЕС ЭВМ передан для внедрения в НИИЖТ и используется в научно-исследовательской работе.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Босов А.А., Евдомаха Г.В. Алгоритм решения задачи распределения ресурсов. // ДИИТ.-Днепропетровск, 1982. - 18 с. - Деп. в ЦНИИТЭИ МПС 25 янв. 1982. - №1799-Д82.

2. Босов А.А., Евдомаха Г.В. Об одной модели тяговых расчетов с учетом ограничения на уровень продольных динамических усилий. // Проблемы динамики и прочности подвижного состава. - Днепропетровск, 1982. - С. 40-44.

3. Евдомаха Г.В., Маслеева Л.Г., Малышко И.Б. О применении ЭВМ к выбору режима ведения поезда с учетом его динамической нагруженности. // Тез. докл. на Всес. конф. по пробл. механики ж.-д. тр-та (г. Днепропетровск, 23-25 мая 1984 г.). - Днепропетровск, 1984. - С. 22.

4. Евдомаха Г.В., Малышко И.Б. Обобщенный тяговый расчет для электрифицированных участков железных дорог. // Тез. докл. на Всес. конф. по пробл. механики ж.-д. тр-та (г. Днепропетровск, 23-25 мая 1984 г.). - Днепропетровск, 1984. - С. 21-22.

5. Евдомаха Г.В., Малышко И.Б. Выбор рациональных режимов ведения длинносоставных поездов. // Тез. докл. на Всес. отрасл. науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов ж.-д. тр-та (г. Москва, 23-24 мая 1984 г.). - М., 1984. - С. 39.

6. Блохин Е.П., Евдомаха Г.В., Малышко И.Б. Применение динамического программирования к определению режимов вождения длинносоставных поездов. // Проблемы динамики и прочности подвижного состава. - Днепропетровск, 1984. - С. 12-24.

**Евдокимов Григорий Васильевич**

**Автоматизация тяговых расчетов, учитывающих динамическую  
нагруженность поезда**

**05.22.07 – Подвижной состав и тяга поездов**

**Подписано к печати 22.05.87. БТ 20084 формат 60 x 84 1/16. Бумага для  
множительных аппаратов. Ротапринт. Усл.печ.л. I. Уч.-изд.л. I.  
Тираж 100 экз. Заказ 1069. Бесплатно.**

**Учесток оперативной полиграфии ДНЦГ.**

**320700, ГСП, Днепропетровск, Ю, ул.Акад.В.А.Изварина,2**

Сканировала Камянская Н.А.

НТБ  
ДНУЖТ