

# КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ЭКОНОМИИ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ ДЛЯ ТЕПЛОВОЗНОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А. П. Кейзер, Ю. Г. Самодум, В. С. Могила, Е. А. Жидкова

Кафедра информационных технологий, кафедра микропроцессорной техники и информационно-управляющих систем, кафедра тепловозов и тепловых двигателей, кафедра электрического подвижного состава, Белорусский государственный университет транспорта  
Гомель, Республика Беларусь  
E-mail: j\_e\_a@mail.ru

В данной работе рассматриваются математические модели работы транспортных объектов: топливная аппаратура высокого давления, дизель, магистральный локомотив (тепловоз, электровоз), поезд основная цель которых – проведение экспериментов по экономии топлива и электроэнергии. Рассматриваются также математические методы теории оптимального управления (динамическое программирование, принцип максимума Понтрягина, метод блуждающей трубки) для расчета оптимальных по расходу топлива (электроэнергии) режимов вождения поездов и применения данного математического аппарата в системе автоведения и системе автоматизированного анализа потребления топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов.

В настоящее время экономия топливно-энергетических ресурсов является сверхактуальной задачей. Железнодорожный транспорт является одним из основных потребителей топливно-энергетических ресурсов. При конструировании машин, тепловозов, электровозов, их узлов и других технических комплексов в экспериментальных и теоретических исследованиях широко применяется математическое моделирование. При моделировании все эксперименты проводятся на модели, характеристики которой должны соответствовать реальному объекту исследования.

На международной научной конференции в г. Могилеве [6], посвященной проблемам экономии топливно-энергетических ресурсов на транспорте, во время дискуссии было констатировано: чем сложнее транспортный объект, тем проще его математическая модель. Анализ математических моделей: 1) топливной аппаратуры высокого давления, 2) тепловозного двигателя, 3) тепловоза, 4) поезда, разработанных в БИИЖ-Те (ныне БелГУТа) при сотрудничестве кафедр «Тепловозы и тепловые двигатели» и «Информационные технологии», подтвердил справедливость данного положения.

1) Математическая модель работы топливной аппаратуры (насос высокого давления, трубопровод, форсунка) тепловозного дизеля представляет собой систему 7-ми обыкновенных и 15-ти сложных дифференциальных уравнений [1]. Разработанная методика моделирования процесса впрыска методом массового баланса, блок-схемы алгоритма и программное обеспечение позволили получить результаты моделирования, которые совпали с результатами проводимых экспериментов.

2) Математическая модель работы тепловозного дизеля и электрической передачи тепловоза [5] представляют собой системы из 15-ти и 19-ти уравнений соответственно.

3) Математическая модель работы тепловоза. Широкое распространение в тяговых расчетах получила довольно простая модель тепловоза и поезда, в которой внутренние процессы в локомотиве не рассматриваются, а используются экспериментально полученные тяговые  $F_k(v)$ , расходные  $G_M(v)$  (тепловоз) и токовые  $I_C(v)$  (электровоз) характеристики. Модель работы тепловоза и ее программное обеспечение на ПЭВМ – это описание выходных характеристик локомотива в виде уравнений регрессии. В работе [2] установлено, что тяговые характеристики магистрального тепловоза (тепловоз 2ТЭ10М) наилучшим образом (критерии сумма квадратов отклонений, критерий Фишера) описывается следующим уравнением регрессии

$$F_k = A0_{i,j} A1_{i,j}^v e^{A2_{i,j} v}$$

Расходные характеристики тепловоза 2ТЭ10М [2] рекомендуется описывать другим уравнением регрессии

$$G = B0_{i,j} + B1_{i,j} v + B2_{i,j} v^2,$$

где  $F_k$  – сила тяги локомотива;

$G_M$  – минутный расход топлива;

$i$  – индекс, обозначающий номер режима вождения поезда,  $i = 0, 1, \dots, NKmax$ ;

$i = NK = 0$  – режим холостого хода;

$i = 1, 2, \dots$  – номера позиции контроллера машиниста;

$NKmax$  – максимальная позиция контроллера машиниста, которая для тепловоза 2ТЭ10М  $NKmax = 16$ ;

$j$  – индекс, обозначающий режим ослабления поля тяговых электродвигателей тепловоза.  
 $j = Re = 0$  – режим полного поля ПП;  
 $j = Re = 1$  – режим ОП1;  
 $j = Re = 2$  – режим ОП2.

В докладе приводится математическая модель работы магистрального электровоза ВЛ80С, которая имеет некоторое сходство с математической моделью работы тепловоза 2ТЭ10М.

4) Математическая модель движения поезда в тяговых и тормозных оптимизационных расчетах (поезд рассматривается как материальная точка) вместе с математической моделью работы локомотива представляет собой систему 2-х дифференциальных уравнений (дифференцирование по пути  $S$ )

$$\begin{cases} \frac{\delta v}{\delta s} = \frac{1}{v} \frac{g}{Q+P} F = \frac{1}{v} \zeta F, \\ \frac{\delta t}{\delta s} = \frac{1}{v} \end{cases} \quad (1)$$

Решая численными методами первое дифференциальное уравнение системы (1), получаем оптимальную кривую скорости движения поезда  $v$ . Решая второе дифференциальное уравнение системы (1) при оптимальном режиме ведения поезда  $NKO$  получаем кривую времени движения поезда  $t$ .

Равнодействующая сила  $F$

$$F = F_k(v) - w_{\text{л}}(v) - w_{\text{в}}(v) - U(\Delta S), \quad (2)$$

Пояснения к формулам (1), (2):

$Q$  – масса состава (вагонов) поезда;

$P$  – масса локомотива;

$g$  – ускорение свободного падения с учетом вращающихся масс. Скорректированное значение  $g = 120 \text{ км/ч}^2$ ;

$w_{\text{л}}$  – полное сопротивление локомотива;

$w_{\text{в}}$  – полное сопротивление вагонов;

$U$  – уклон профиля пути по элементам  $\Delta S_k$ .

Для решения системы дифференциальных уравнений (1) использован нетрадиционный и малоизвестный в математике метод линейной аппроксимации производной, который применительно к численному решению дифференциальных уравнений движения поезда (1) разработан и исследован в БелИИЖТе канд. техн. наук А. М. Костроминым [5] и А. П. Кейзером [5]. Данный метод по точности решения и быстродействию значительно превосходит метод Эйлера и не уступает методу Рунге-Кутты.

#### ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ТЕОРИИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ЭКОНОМИИ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ.

Для выполнения инженерных расчетов по экономии топлива на заданном железнодорожном участке использовано математическое моделирование движения поездов, в котором задействованы современные математические методы теории оптимального управления и численные

методы решения дифференциальных уравнений движения поезда.

Моделируя работу топливной аппаратуры для некоторых тепловозных дизелей типа Д100 авторами [1], с целью ликвидации дополнительного нежелательного впрыска, модернизировать конструкцию топливной аппаратуры за счет обводного канала и дросселирующего отверстия в нагнетательном клапане. Оптимальные размеры диаметров нагнетательного клапана и обводного канала были предварительно подобраны с помощью математической модели процесса впрыска.

В докладе также рассматриваются эксперименты по экономии топлива при моделировании работы дизеля тепловоза, электровоза, движения поезда.

Рассматривается также математическая модель тепловоза и поезда в тяговых оптимизационных расчетах с использованием математических методов теории оптимального управления, методы динамического программирования, принцип максимума Понтрягина, метод блуждающих трубок [5] и ее использование в системе автоведения [4,5] (реальный масштаб времени) и микропроцессорной системе автоматизированного анализа потребления топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов [3].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гизатуллин, Р. К. Влияние геометрических размеров нагнетательного клапана и параметров пружины на процесс впрыска и его характеристики / Р. К. Гизатуллин и [др.] – Труды БелИИЖТа. – Гомель: БелИИЖТ, 1973. – 88 с.
2. Кейзер, А. П. Совершенствование режимов вождения поездов и повышение эксплуатационной надежности графика движения (в условиях тепловозной тяги): дис. ... канд. техн. наук: 05.22.08 / А. П. Кейзер – Белорус. Гос. ун-т трансп. – Гомель: БелГУТ, 1995. – 227 с.
3. Кейзер, А. П. Автоматизированный анализ потребления топлива и электроэнергии магистральными локомотивами в АСУЖТ / А. П. Кейзер и [др.] – Проблемы безопасности на транспорте: материалы VII Междунар. науч.-практ. конф./М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, М-во образования Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. Гос. ун-т трансп.; под общ. ред. В. И. Сенько. – Гомель: БелГУТ, 2015. – 343 с.
4. Кейзер, А. П. Энергетически эффективный график движения поездов и его реализация в универсальной микропроцессорной системе автоведения с использованием математических методов теории оптимального управления / А. П. Кейзер и [др.] – Проблемы безопасности на транспорте: материалы VII Междунар. науч.-практ. конф./М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, М-во образования Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. Гос. ун-т трансп.; под общ. ред. В. И. Сенько. – Гомель: БелГУТ, 2015. – 343 с.
5. Костромин, А. М. Оптимизация управления локомотивом / А. М. Костромин. – М.: Транспорт, 1977. – 119 с.
6. Создание и применение высокоэффективных наукоемких ресурсосберегающих технологических машин и комплексов: Межд. научн.-техн. конф./Нац. акад. наук Беларуси, Могилев. Гос.техн. ун-т – Могилев: МГТУ, 2001. – 583 с.