

Программный комплекс для исследования продольной динамики
тяжеловесного поезда с целью разработки системы автоматического
управления с распределенной тягой
Software for research of longitudinal dynamics in heavy freight trains with
a view to developing automatic control system with distributed traction

Аннотация. Для создания эффективной системы автоматического управления тяжеловесным длинносоставным поездом с распределённой тягой необходимо представление о динамических процессах, происходящих в нем. Для оценки качества управления скоростью движения грузового поезда используют, помимо традиционных показателей качества, еще и специфические, такие как максимальные величины продольных динамических сил, величина накопленных усталостных напряжений сцепных приборов, коэффициент устойчивости вагона от выжимания, реакция наружного рельса при движении в кривой. С этой целью разработано программное обеспечение для исследования продольной динамики поезда и, учитывающее всю специфику объекта управления.

Ключевые слова. Имитационное моделирование, система автоматического управления, тяжеловесный грузовой поезд, запас устойчивости, распределенная тяга, продольная динамика поезда.

Abstract. For developing effective automatic control system for heavy freight train with distributed traction it is required a clear understanding of dynamic processes in train. It is used for quality assessment of control of heavy freight train speed, not only traditional quality score, but also specific as maximal values of longitudinal dynamic forces, the amount of accumulated tensions, stability factor and reaction of

outside rail in short radius curve. For this purpose, it was developed a special software for research of longitudinal dynamics in heavy freight trains.

Key words. Simulation model, automatic control system, heavy freight train, stability factor, distributed traction, longitudinal dynamics of a train, train dynamic.

Математическая модель поезда

Повышение массы и скорости движения грузовых поездов является одним из важнейших и эффективных направлений развития железнодорожного транспорта. Для вождения поездов повышенной массы и длины применяют как мощные локомотивы, расположенные в головной части поезда, так и несколько локомотивов, распределенных по длине состава. Нарушение технологии управления тяговыми и тормозными средствами способствует возникновению продольных динамических сил недопустимого по условиям прочности автосцепок уровня, кроме этого, неблагоприятный характер протекания переходных процессов в поезде способствует ускорению процесса накопления усталостных повреждений в автосцепках, и как следствие, снижению их прочности [1]. Дополнительным фактором опасности при использовании распределённой тяги, является возможное появление условий, способствующих потере устойчивости вагонов в рельсовой колее (выдёргивание или выжимание) в случае несогласованного управления тяговыми и тормозными средствами. Поэтому актуальным является вопрос выбора рациональных алгоритмов управления такими локомотивами.

Для разработки системы автоматического управления (САУ) скоростью грузовым поездом с распределенной тягой, учитывающей массу и длину состава, скорость его движения, а также расположение на переломах профиля пути, для выработки правильной стратегии управления тягой и обеспечения безопасности движения поезда, необходимо четкое представление о процессах, происходящих в поезде.

При разработке САУ скоростью грузовыми поездами, для учета переходных процессов в объекте управления, целесообразно использовать дискретную, многомассовую модель поезда, представляющую его как систему твердых тел, соединенных нелинейными упруго-диссипативными связями.

Каждая масса дискретной модели совершает движение под действием внешних сил, а также реакций от соседних экипажей через упругие или упруговязкие связи. Представляя поезд в этом идеализированном виде, считаем каждый вагон абсолютно твердым телом, обладающим массой и не имеющим упругости, а каждую междвагонную связь – телом без массы. Замена реальной сплошной системы, воображаемой дискретной, позволяет учесть зазоры в механизмах поглощающих аппаратов и автосцепок, сильно влияющие на распространение возмущений вдоль состава поезда и величину возникающих сил.

Дифференциальные уравнения движения в указанном случае имеют вид [2]

$$\begin{cases} \dot{v}_i = \frac{(S_i - S_{i+1} + F_i)}{m_i}, & i = \overline{1, n}; S_{n+1} = 0 \\ \dot{q}_i = v_{i-1} - v_i, & i = \overline{2, n} \\ \dot{x}_1 = v_1 = -\dot{q}_1 \end{cases}, \quad (1)$$

где v_i – скорость центра масс экипажа;

S_i – сила в i -том междвагонном соединении;

F_i – суммарная внешняя сила, действующая на i -й экипаж;

m_i – масса i -го экипажа;

n – число экипажей в поезде;

q_i – деформация i -го междвагонного соединения;

\dot{q}_i – скорость деформации.

Деформация i -го межвагонного соединения определяется по следующей формуле

$$q_i = x_{i-1} - \frac{l_{i-1} - l_i}{2},$$

где x_i – координата (вдоль траектории) положения центра масс i -го экипажа;

l_i – длина i -го экипажа.

Решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений (1) выполнено на основании метода численного интегрирования Рунге–Кутты. Основная процедура интегрирования состоит в комбинации многошаговых методов прогноза–коррекции. В качестве формулы прогноза выбрана явная четырехточечная формула Адамса–Башфорта

$$y_{n+4} = y_{n+3} + \frac{1}{24} h (55f_{n+3} - 59f_{n+2} + 37f_{n+1} - 9f_n), \quad (2)$$

где $n + 4$ – номер текущего шага интегрирования;

y – искомая функция;

h – шаг интегрирования;

f – правая часть каждого уравнения (1), $f = y$.

Для упрощения формы записи формулы (2) опущены индексы i , указывающие номер экипажа.

Коррекция вычислений производится по неявной трехточечной формуле Адамса–Мультона

$$y_{n+3} = y_{n+2} + \frac{1}{24} h (9f_{n+3} + 19f_{n+2} - 5f_{n+1} + f_n).$$

Локальные погрешности интегрирования данных формул, равные соответственно $251/720 h^{(5)} y^{(5)}$ и $19/720 h^{(5)} y^{(5)}$ имеют одинаковый порядок и противоположные знаки. Поэтому комбинация методов прогноза–коррекции позволяет сделать вычислительный процесс сходящимся, а формулы (1) и (2) – устойчивыми на большом интервале интегрирования. Выбор четвертого порядка метода обусловлен наличием в системе жестких нелинейных уравнений, описывающих характеристики поглощающих аппаратов и зазоров в автосцепках, рассмотренных в этой главе.

Для вычисления продольных реакций, возникающих в составе грузового поезда при его движении по участку, необходимо привести математические модели работы поглощающих аппаратов и автосцепных устройств, преобразовав их в соответствие с решаемой задачей. С этой целью в программе реализована модель пружинно-фрикционного поглощающего аппарата.

Таким образом, для исследования работы САУ скоростью движения в режиме тяги грузового поезда использована дискретная модель – система уравнений (1). Эта комплексная модель дополняется совокупностью математических описаний элементов поезда и пути, а также системой автоматического управления.

Качество процесса управления скоростью [3] поезда характеризуется как традиционными показателями (ошибка управления в установившемся режиме, перерегулирование, длительность переходного процесса, крутизна переднего фронта, колебательность и т.д.) [4], так и специфичными, определяемыми особенностями грузового поезда, как объекта управления [1]:

- максимальные величины продольных динамических сил, действующих в поезде;
- величина накопленных усталостных повреждений сцепных приборов экипажей поезда.

Эти критерии учитывают негативное влияние быстроменяющихся, динамических сил, действующих на поезд, способных вызвать разрыв автосцепок из-за превышения продольными динамическими силами максимально допустимых значений, а также способствующих снижению прочности материала корпусов автосцепок.

Вместе с этим, следует учитывать и медленно меняющиеся силы, т.н. «квазистатические», действующие на вагоны поезда во время его движения. Продольные квазистатические, сжимающие силы, действующие на вагоны поезда, способны вызвать «выдавливание» вагонов из колеи, а растягивающие – «выдавливание» вагонов, если они расположены в кривом участке пути.

Для оценки запаса устойчивости от «выжимания» и «выдергивания» вагонов, используют следующие критерии [5]:

- величина вертикальной реакции наружного рельса на колеса вагона от действия продольных растягивающих сил;
- коэффициент запаса устойчивости вагона от выжимания.

Программное обеспечение

Использование готовых продуктов для моделирования процессов, таких как, например, Matlab/Simulink, значительно сокращает время разработки модели для исследования, но скорость расчетов и «гибкость» тонкой настройки таких приложений гораздо ниже, чем программ, написанной для изучения определенного нестандартного процесса. В связи с этим разработано собственное программное обеспечение на языке C++ для исследования продольной динамики, которое учитывает описанную выше модель и критерии качества управления поездом (рис. 1). Для упрощения построения графического интерфейса программы использован программный продукт Borland C++ Builder.

Приложение позволяет автоматически формировать поезд и путь, считывая значения из файлов с параметрами поезда, плана и профиля пути (рис. 2).

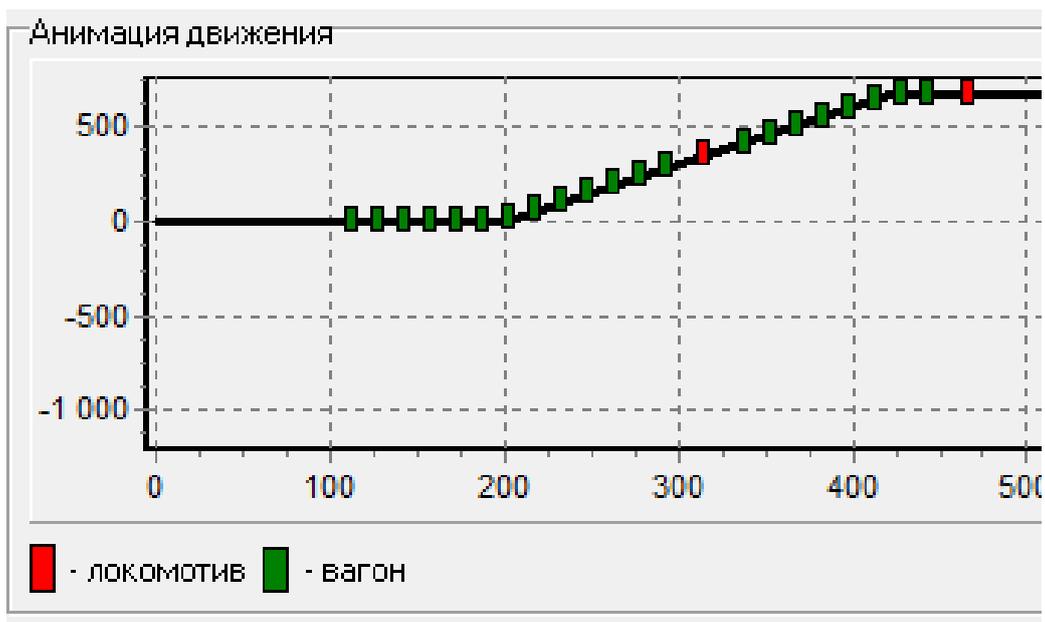


Рис. 3. Анимация движения (2 локомотива и 21 вагон)

Выводы

Описанное выше программное обеспечение значительно сократило время разработки системы управления, так как помимо получения готовых результатов моделирования была возможность отслеживать процессы, происходящие в поезде, в реальном времени, что позволяло, не дожидаясь окончания моделирования, производить быструю корректировку алгоритмов управления локомотивами.

Литература

1. Критерии качества регулирования скорости / О.Е. Пудовиков, Л.А. Баранов, А.Н. Савоськин – М.: «Мир транспорта», 2009 №4.
2. Расчеты и испытания тяжеловесных поездов / Е.П. Блохин, Л.А. Манашкин, Е.Л. Стамблер и др.; Под ред. Е.П. Блохина. – М.: Транспорт, 1986. – 263 с.
3. Система критериев качества для оценки перспективных систем автоматического управления скоростью грузовых поездов с распределенной тягой / М.Д. Киселев, О.Е. Пудовиков – М.: «Электроника и электрооборудование транспорта», 2016 №2. – С.11–14.
4. Автоматизированные системы управления электроподвижным составом: учебник: в 3 ч. / Л.А. Баранов, А.Н. Савоськин, О.Е. Пудовиков и др.; под ред. Л.А. Баранова и А.Н. Савоськина. – М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2013.
5. Динамика вагона: Учебник для вузов ж.-д. транспорта. Изд. 2-е, перераб. и доп. / С. В. Вершинский, В. Н. Данилов, И. И. Чесноков – М.: Транспорт, 1978. – 352 с.

Сведения об авторах

Киселев Максим Дмитриевич

Московский Государственный Университет Путей Сообщения Императора
Николая II (МИИТ)

Рабочий адрес: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9

Ученая степень, звание: -

Должность: аспирант

Электронная почта: dr.max.kiselev@yandex.ru

SPIN-код: 2015-8565

Пудовиков Олег Евгеньевич

Московский Государственный Университет Путей Сообщения Императора
Николая II (МИИТ)

Рабочий адрес: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9

Ученая степень, звание: д.т.н., доцент

Должность: заведующий кафедрой «Электропоезда и локомотивы»

Электронная почта: oleger@mail.ru

SPIN-код: 1700-5812

Kiselev Maxim Dmitrievich

Moscow State University of Railway Engineering (MIIT)

Postal address: 127994, Moscow, ul. Obraztsova, d. 9. str. 9

Pudovikov Oleg Evgenievich

Moscow State University of Railway Engineering (MIIT)

Postal address: 127994, Moscow, ul. Obraztsova, d. 9. str. 9