

Л.А. МУГИНШТЕЙН, д-р техн. наук, ВНИИЖТ (Россия)
И.А. ЯБКО, ст. научн. сотр., ВНИИЖТ (Россия)
С.И. ЛИСЕЕВ, инж., ВНИИЖТ (Россия)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОДОЛЬНО-ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГРУЗОВЫХ ПОЕЗДАХ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ТЯГОЙ

Розглянуто результати чисельної реалізації моделювання управління локомотивами у вантажних поїздах з розподіленою тягою та аналіз виникаючих поздовжньо-динамічних сил.

Рассмотрены результаты численной реализации моделирования управлением локомотивами в грузовых поездах с распределенной тягой и анализ возникающих продольно-динамических сил.

A mathematical model is developed to estimate longitudinal forces in freight cars in various control regimes. The corresponding software is created. Now more than 30 railway sheds use it.

Введение

Для обеспечения безопасности движения на сложных участках профиля при управлении поездами большой массы и длины с распределенной тягой крайне важно наличие инструмента для оценки продольно-динамических сил (ПДС), чтобы не допустить превышения их нормируемых значений, определяемых прочностью узлов подвижного состава и его устойчивостью в рельсовой колее. Такая оценка необходима и важна также для обучения локомотивных бригад приемам безопасного управления движением поезда, при разработке режимных карт, а также при анализе случаев сходов подвижного состава с рельсовой колеей и повреждений сцепных устройств. С этой целью во ВНИИЖТе разработана математическая модель движения поезда по участку с учетом плана и профиля пути, заданного времени хода, скоростных ограничений. Эта модель учитывает нелинейность характеристик поглощающих аппаратов сцепных устройств каждого вагона и предусматривает возможность моделирования управления тягой локомотивов и тормозами поезда.

Применительно к поездам с одним локомотивом численная реализация этой модели была реализована во ВНИИЖТе в виде промышленной программы для ПЭВМ [1], которая в настоящее время используется в более чем 30 депо сети железных дорог Российской Федерации. В данной работе учитывается специфика соединенных поездов в части возникающих в них ПДС и нормативных документов, регламентирующих их эксплуатацию.

Математическая модель

Математическая модель включает рассмотрение переносного движения поезда, рассматриваемого как гибкая нерастяжимая неоднородная по длине нить, и относительного движения каждой подвижной единицы состава.

Переносное движение поезда определяет скоростную траекторию и описывается дифференциальным уравнением с учетом массы и длины каждого вагона, профиля пути, ограничений скорости, тяговых характеристик локомотивов. Относительное движение определяет ПДС в поезде и описывается системой дифференциальных уравнений, число которых равно числу подвижных единиц в поезде. Принятая зависимость внутренней силы в j -ом автосцепном устройстве R_j от относительного перемещения δ_j соседних подвижных единиц представлена на рис. 1.

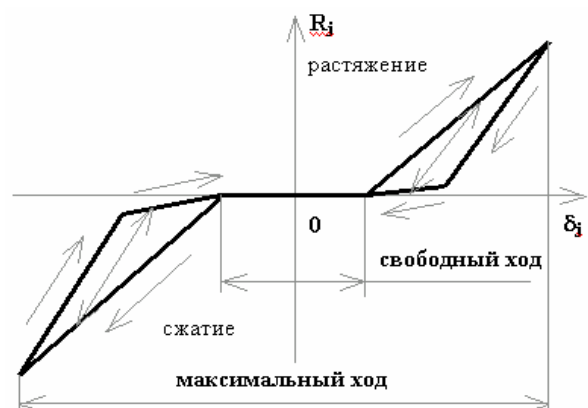


Рис. 1. Характеристика поглощающего аппарата автосцепки: j — номер автосцепки (считая от головы поезда); R_j — внутреннее усилие; δ_j — деформация

В части моделирования пневматического торможения принято, что скорость распространения тормозной волны по составу постоянна и не зависит как от глубины разрядки тормозной магистрали, так и от принятой интенсивности тормозного режима. Согласно принятой модели давление в тормозном цилиндре каждого вагона начинает увеличиваться только после достижения тормозной волной этого вагона. При этом, в модели учтено замедление нарастания тормозных сил в вагонах поезда по мере удаления их от начала состава, обусловленное снижением давления в тормозной магистрали вдоль состава из-за утечек воздуха. Для реализации конкретных временных зависимостей наполнения тормозных цилиндров были использованы данные работы [2].

Отвечающая принятой модели система дифференциальных уравнений может быть замкнута лишь при задании конкретного режима управления каждым локомотивом в составе поезда. Такое замыкание выполнено на основании двух сценариев:

- расчет энергооптимальной траектории поезда с учетом плана и профиля пути, времени хода, ограничений скорости, составности; при этом, поезд рассматривается как гибкая нерастяжимая неоднородная по длине нить;

- моделирование управления локомотивами в составе поезда с использованием для каждого из них на основе предоставляемого пользовательского интерфейса либо отдельной ПЭВМ, либо отдельного окна управления; обмен данными синхронно осуществляется либо по локальной вычислительной сети, либо как разделяемые данные для различных экземпляров приложения.

Полученный скоростной режим рассматривается как переносное движение при дальнейшем расчете соответствующих ПДС в поезде. Результатом такого расчета, выполненного по первому сценарию, является энергооптимальная и безопасная по продольной динамике траектория движения поезда. При этом используется разработанная во ВНИИЖТе и внедренная в более чем 150 депо сети железных дорог Российской Федерации программа для расчета режимных карт [3]; кроме того, используется алгоритм корректировки режимов на опасных участках. Результаты расчета ПДС согласно второму сценарию используются при моделировании конкретных дорожных ситуаций, разработке режимных карт, а также для обучения машинистов приемам безопасного по продольной динамике и энергооптимального управле-

ния поездом с распределенной тягой. Для вышеуказанных сценариев вопрос о допустимости рассчитанных ПДС решается путем их сравнения с соответствующими нормативными значениями, определяемыми типом и загрузкой каждого вагона, радиуса кривой под ним.

Численная реализация

Принятая система дифференциальных уравнений является нелинейной. Эта нелинейность обусловлена, в частности, принятой характеристикой поглощающего аппарата автосцепки. Однако при сохранении взаимного перемещения узлов поглощающих аппаратов в направлении вдоль одной из ветвей характеристики (рис. 1) систему уравнений на этом отрезке времени можно рассматривать как линейную. Это позволило применить специально разработанный алгоритм, являющийся модификацией известного метода Рунге-Кутты и максимально учитывающий специфику задачи. Согласно этому алгоритму на каждом шаге решается линейная задача, а при изменении направления взаимных перемещений узлов поглощающих аппаратов хотя бы в одном сечении поезда рассматривается новая линейная задача, соответствующая изменившимся условиям.

Математически на каждом шаге решается система линейных дифференциальных уравнений

$$d^2\mathbf{X}/dt^2 = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{F}, \quad \mathbf{X}(t_k) = \mathbf{X}_k,$$

где \mathbf{X} – вектор неизвестных относительных смещений в автосцепке; t – время, $t_k \leq t \leq (t_k + h_k)$; \mathbf{F} – вектор правых частей; \mathbf{A} – матрица жесткости системы; h_k – шаг интегрирования.

Следует отметить, что по структуре матрица \mathbf{A} является симметричной трехдиагональной. В дальнейшем это позволяет достичь максимальной эффективности программы. Так, в частности, на каждом шаге интегрирования определяется сингулярная норма матрицы \mathbf{A} без существенных затрат ресурсов ЭВМ. Это, в свою очередь, позволяет определить максимальный допустимый предел по численной устойчивости для шага интегрирования. Выбор шага интегрирования h_k в вычислительной процедуре для сокращения времени счета принимается максимальным в установившихся режимах и уменьшается до значения, необходимого для сохранения устойчивости решения системы дифференциальных уравнений при существенных изменениях режима движения. С этой целью разработана специальная процедура и соответствующий пакет программ, обеспечиваю-

щий решение комплекса специфических задач линейной алгебры. В частности, точное решение системы, являющейся экспонентой от матрицы, раскладывается в ряд с сохранением первых четырех матричных членов. Расчеты с использованием этого решения основываются на указанном выше пакете. В результате достигается существенное сокращение времени счета с сохранением необходимых параметров точности и устойчивости расчета.

Помимо этого, разработан специальный алгоритм эффективного переформирования матрицы жесткости A , использующий то обстоятельство, что, как правило, одновременно переход на другую ветвь характеристики происходит лишь в одном сечении поезда. В методе численной реализации данной модели предусмотрена возможность эффективного учета активных внешних сил, приложенных к каждому из вагонов. В целях повышения эффективности и ускорения расчетов временные характеристики в принятой модели поезда аппроксимированы кусочно-линейными зависимостями. Указанный подход позволил обеспечить требуемый уровень структурирования программы и возможность единообразно учитывать внешние силы как при тяге, так и при торможении.

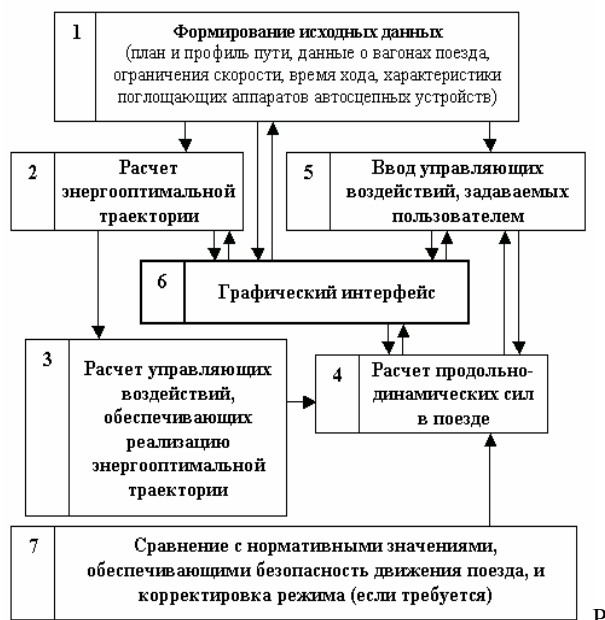
Перечисленные выше алгоритмы в совокупности с качеством их низкоуровневой численной реализации обеспечили высокую производительность при сохранении точности расчета. Так, результаты численных экспериментов показали, что скорость интегрирования уравнений динамики с помощью вышеупомянутого математического обеспечения примерно в 100 раз выше, чем с помощью пакета MATLAB 5.2 (MathWorks, США). Такая производительность в сравнении со всемирно известным профессиональным программным продуктом была обеспечена исключительно за счет учета специфики задачи и тщательного низкоуровневого программирования. Расчет ПДС в поезде из 100 вагонов на участке со сложным профилем пути длиной 200 км требует не более 3 мин (Intel Pentium III, 1100 МГц).

Достигнутая высокая степень производительности является принципиально важной, в частности, для обеспечения возможности вариантного выбора безопасных с точки зрения продольной динамики режимов управления каждым из локомотивов в соединенном поезде.

Структурная схема организации работы программного комплекса

Для широкого практического использования численные алгоритмы моделирования управления поездом реализованы в виде промышленной программы для ПЭВМ стандартной комплектации (ПК). Эта программа обладает развитым пользовательским интерфейсом в стиле стандартных продуктов Microsoft®, позволяющим оперативно использовать специализированную базу данных программы, анализировать результаты расчетов и осуществлять их экспорт в графическом и текстовом видах.

Основными составляющими ПК являются модули, обеспечивающие расчет ПДС в режимах тяги и торможения, модули базы данных и интерфейса пользователя, а также модуль, имитирующий органы управления локомотивами.



ис. 2. Укрупненная блок-схема взаимодействия основных модулей ПК

На рис. 2 представлена укрупненная блок-схема алгоритма и показано взаимодействие основных модулей ПК. После формирования с помощью соответствующих интерфейсов блока исходных данных выполняется расчет энергооптимальной траектории движения поезда. Затем рассчитываются управляющие воздействия, обеспечивающие реализацию полученной энергооптимальной траектории, и соответствующие ПДС в поезде. Результаты расчетов отображаются в графическом виде на дисплее. Далее для каждой автосцепки полученные расчетные значения ПДС сравниваются с максимальными допустимыми значениями сил в зависимости от

радиуса кривой под колесом, типа и загрузки вагона. В случае необходимости, осуществляется корректировка режимов управления каждым из локомотивов.

Ветвь блок-схемы, начинающаяся с блока 5, отвечает либо реализации траекторий движения, зафиксированных в реальной эксплуатации, либо режимам управления локомотивами, задающимся с помощью соответствующего интерфейса (блок 6). Дальнейший ход расчета аналогичен описанному (блоки 4, 6, 7).

На рис. 3. представлен фрагмент экрана во время работы ПК. Этот рисунок дает представление об интерфейсных возможностях ПК.

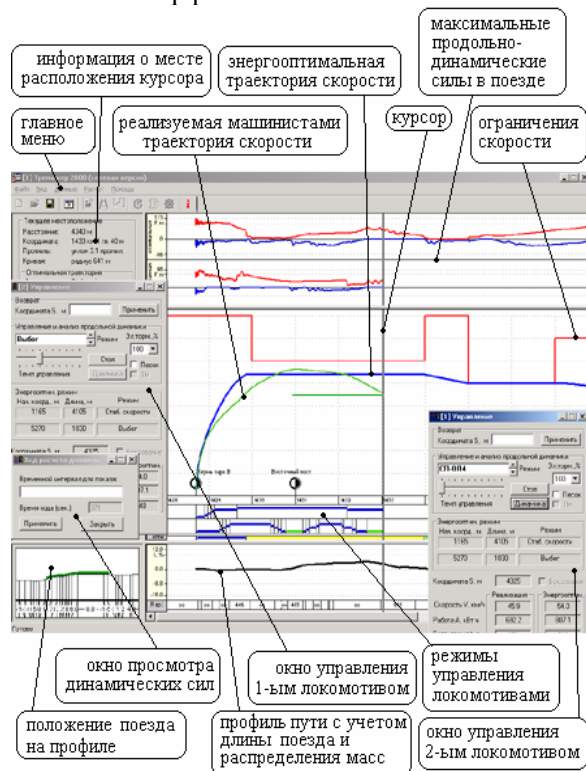


Рис. 3. Общий вид дисплея во время работы ПК

Апробация и практическое использование

Наряду с корректностью и обоснованностью математических и вычислительных процедур, использованных при разработке методов расчета и анализа ПДС в грузовых поездах, принципиально важной является оценка адекватности результатов расчетов продольных сил в поезде.

В 2003 году были выполнены сопоставления результатов расчетов с прямыми измерениями ПДС в различных сечениях поезда в ходе опытных поездок на участках Рыбное – Орехово, Красноярск – Иркутск. Опытные данные были получены с помощью используемой в ТПЭ ВНИИЖТ системы дистанционного измерения ПДС в различных сечениях грузового

поезда. Так, на участке Рыбное – Орехово в качестве участка сравнения выбран 138 км 9 пк, на котором был зафиксирован динамический удар. Анализ режима управления поездом, характер профиля и плана пути, скорости поезда и силы тока показал, что динамический удар сжатия произошел вследствие перехода с тяги на выбег в сочетании с переломом профиля, обусловившим резкое снижение роста скорости локомотива с набеганием вагоном на голову поезда. Сопоставления опытных и рассчитанных данных показали их совпадение с приемлемой точностью как по характеру зависимостей анализируемых продольно-динамических сил от координаты пути, так и по их абсолютным значениям. В частности, согласно опытным данным наибольшее сжатие в автосцепке № 1 на стадии удара достигало 28,6 тс, а соответствующее расчетное значение равно 27 тс. Аналогичные величины для автосцепки № 23 равны 35,8 тс и 32,4 тс соответственно. Продолжительность динамического удара в пересчете на длину пути для автосцепки № 1 составила 25 м и 19 м для опытных и расчетных данных соответственно; аналогичные величины для автосцепки № 23 равны 20 м и 23 м.

В 2004 году применительно к участкам Свердловск – Шаля, Шаля – Пермь и Пермь – Чепца с помощью ПК были получены режимные карты для соединенных поездов весом 12000 т с двумя локомотивами ВЛ11 в голове и в середине состава. В ходе опытной поездки по рассчитанной с помощью ПК режимной карте на участке Верещагино – Чепца динамические удары не наблюдались; зафиксированные набегания были незначительными и происходили исключительно в режиме выбега.

ПК неоднократно использовался для моделирования аварий и анализа ПДС в поезде. Так, в порядке подготовки технического заключения по вопросам безопасности движения на Северной железной дороге с помощью ПК было выполнено моделирование крушения, произошедшего на перегоне Марков – Амшор соединенного поезда с 458 осями (сход 23 вагонов, начиная с 21-го по счету с головы поезда). На основании представленных данных и численного моделирования движения соединенного поезда были определены ПДС в поезде и рассмотрена возможная последовательность развития событий от момента трогания поезда до схода. Результаты расчетов совпали в части количества и порядка вагонов в сходе.

Таким образом, можно заключить, что разработанная программа:

– в части стабильности работы, производительности и уровня качества пользовательского интерфейса удовлетворяет всем требованиям программы промышленного типа для ЭВМ стандартной комплектации;

– в части адекватности получаемых численных результатов при реализации алгоритмов, отвечающих заложенным физическим моделям, обеспечивает задаваемую априори относительную точность;

– в части адекватности получаемых результатов реальным силовым динамическим процессам в составном поезде обеспечивает приемлемую точность.

Заключение

Разработанная программа является практическим инструментом для подробного и достаточно точного анализа продольно-динамических сил в поездах повышенной массы и длины, позволяя для соединенных поездов:

- моделировать аварийные ситуации и анализировать соответствующие им динамические процессы;

- оперативно составлять безопасные с точки зрения продольной динамики и энергооптимальные режимные карты;
- обучать машинистов навыкам безопасного с точки зрения продольной динамики и энергооптимального управления локомотивами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мугинштейн Л.А., Ябко И.А. Метод анализа продольно-динамических сил в грузовых поездах большой массы и длины. – Железные дороги мира. – 2003. – № 2. – С. 43-48.
2. Блохин Е.П., Иноземцев В.Г., Крылов В.В., Стамблер Е.Л., Урусляк Л.А. Торможение поездов разной длины при воздухораспределителе № 483 // Эксплуатация автотормозов на подвижном составе железных дорог СССР. – М.: Транспорт, 1987. – С. 123-134.
3. Ябко И.А. Численный метод определения энергооптимального управления движением поезда // Железнодорожный транспорт на новом этапе развития. – М.: Интекст, 2003. – С. 129-135.