

Моделирование поездной работы магистрального локомотива

А. Г. СИЛЮТА, Е. Е. КОССОВ

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»),
Москва, 129626, Россия

Аннотация. Предложен новый подход к моделированию поездной работы грузового магистрального локомотива. Поездная работа магистрального тепловоза представляется ограниченным множеством обобщенных режимов, зависящих, в свою очередь, от ограниченного множества начальных условий — профиля участка пути, веса состава, скорости движения тепловоза и т. д. При этом элементы множества начальных условий являются случайными величинами. Преимуществом предложенного подхода является возможность дать обобщенную оценку изменения показателей поездной работы тепловозов при введении в состав дизель-генераторной установки новых элементов и алгоритмов управления без привязки к конкретному участку пути. Сопоставление времени работы на позициях контроллера машиниста, полученных путем математического моделирования и опытных поездок с тепловозами серии 2ТЭ116У на Октябрьской железной дороге — филиале ОАО «РЖД» в течение года, показало, что максимальное расхождение расчетных и опытных данных не превышает 5 %.

Ключевые слова: грузовой магистральный тепловоз; поездная работа; имитационная модель; теория множеств

Введение. При введении новых конструктивных элементов и алгоритмов управления силовой установкой возникает потребность в сравнительной оценке эффективности базового и модернизированного тепловоза. Проведение опытных поездок, позволяющих получить показатели поездной работы, является достаточно длительным и весомым с финансовой точки зрения мероприятием. Меньшие временные и инвестиционные затраты достигаются путем создания имитационной модели движения поезда, позволяющей получить достоверные показатели поездной работы. При этом возможно проведение расчетов не только для одного конкретного случая, а для множества случаев при различных начальных условиях, что позволяет получить устойчивую статистику для выполнения сравнительной оценки.

Имитационная модель воспроизведения поездной работы. На сегодняшний день существует большое количество программ, позволяющих имитировать поездную работу локомотива с помощью метода тяговых расчетов [1, 2]. В качестве исходных данных в программы вводится информация об участке пути, локомотиве, составе. Недостатком моделирования движения поезда с помощью метода тяговых расче-

тов является получение локального необщего результата для конкретного участка пути. Этот недостаток был преодолен в публикации [3] путем представления работы маневрового тепловоза в виде суммы элементарных режимов: «Работа дизеля на холостом ходу», «Разгон», «Движение с постоянной скоростью», «Движение по инерции» и «Торможение», зависящих от случайных величин — массы состава, уклона, длины пути и скорости. Представление режима работы в виде суммы элементарных режимов позволило учесть процессы трогания, переходные процессы и влияние затрат энергии на агрегаты собственных нужд на общие показатели работы. Однако свои, локальные несовершенства есть и в предложенном подходе:

- Представление элементарных режимов работы маневрового локомотива в виде матрицы для каждого средневзвешенного параметра (например, массы состава) нецелесообразно, так как таких параметров, заданных случайными величинами, может быть несколько. Формирование обобщенной матрицы будет сложной и недостаточно обоснованной задачей.

- Поездная операция маневрового тепловоза представлена алгебраической суммой элементарных поездных операций, но это не совсем верно. Формально возможное сложение обобщенных режимов ведения поезда по существу неправомерно. При этом количественные показатели поездной работы (расход топлива, пробег локомотива, время выполнения поездной работы и т. п.) могут определяться алгебраической суммой соответствующих значений этих показателей за период выполнения поездной операции.

В настоящей статье поездная работа тепловоза представлена не суммой, а множеством обобщенных режимов, зависящих, в свою очередь, от ограниченного множества случайных величин уклона пути, скорости, веса состава и т. п.

Для магистрального грузового тепловоза принципиально можно выделить по аналогии с [3] следующие типы обобщенных режимов: «Разгон (далее — Р)», «Движение с постоянной скоростью (далее — П)», «Движение в режиме выбега (далее — В)», «Стоянка (далее — С)», «Торможение (далее — Т)». Количе-

ство этих режимов может быть задано случайной величиной k . Тогда множество обобщенных режимов A может быть описано числовой последовательностью:

$$A = \{a_k\}, \quad (1)$$

где a_k — k -й член множества A ; $k = 1, 2, \dots, n$ — дискретная случайная величина.

Каждый обобщенный режим характеризуется некоторыми начальными условиями (координата местоположения, скорость, масса состава и т. п.). На первом этапе начальные условия могут быть заданы достаточно большим ограниченным набором числовых последовательностей, члены которых могут быть заданы, например, с помощью порождающей процедуры [4]. В качестве примера рассмотрим множество значений начальной скорости тепловоза B_1 :

$$B_1 = \{b_{1j} | b_{11} = 0, b_{12} = 10, b_{1j} = b_{1j-1} + 10\}, \quad (2)$$

где b_{1j} — j -й член множества B_1 .

У множеств значений начальных условий $B_1, B_2, \dots, B_m$ нет общих элементов, то есть они являются дизъюнктивными. Множества начальных элементов можно представить в виде семейства множеств, перечисленных индексами из I :

$$\{B_i | i \in I\}. \quad (3)$$

Тогда для получения набора начальных условий достаточно выполнить дизъюнктивное объединение [5]:

$$\bigcup_{i \in I} \{(x, i) | x \in B_i\}. \quad (4)$$

Таким образом, тяговый режим может быть описан некоторой числовой последовательностью C , полученной путем декартового произведения множеств (1) и (4):

$$C = \{a_k\} \times \bigcup_{i \in I} \{(x, i) | x \in B_i\}. \quad (5)$$

Для расчета параметров рабочего процесса дизель-генераторной установки тепловоза использовалась математическая модель, основные положения которой изложены в [6, 7].

При моделировании движения поезда для определения приращений и текущих значений скорости и пути за шаг интегрирования применен метод Эйлера. В качестве независимой переменной принималось время [1, 2]. Текущее значение времени определяется по следующей зависимости:

$$t_j = t_{j-1} + \Delta t, \quad (6)$$

где t_j — значение времени за шаг интегрирования; t_{j-1} — текущее значение времени; Δt — шаг интегрирования.

Текущее значение скорости движения локомотива определялось по следующей зависимости:

$$v_j = v_{j-1} + k(f - \omega - b)\Delta t, \quad (7)$$

где v_j — значение скорости движения локомотива за шаг интегрирования; v_{j-1} — текущее значение скорости движения локомотива; k — коэффициент, учитывающий размерность переменных, заданных в единицах, не соответствующих системе СИ; f — удельная сила тяги; ω — общее удельное сопротивление движению поезда; b — удельная замедляющая сила.

Текущее значение пройденного пути определялось по следующей зависимости:

$$S_j = S_{j-1} + \frac{(v_j + v_{j-1})\Delta t}{2}, \quad (8)$$

где S_j — значение пройденного пути за шаг интегрирования; S_{j-1} — текущее значение пройденного пути.

Оценка адекватности модели. В качестве исходных данных для расчета были заданы множество обобщенных режимов и семейство множеств начальных условий. В (9) приведено множество обобщенных режимов:

$$A = \{P, T, B, \Pi\}. \quad (9)$$

При этом порядок чередования режимов не имеет определяющего значения, так как зависимость (5) подразумевает для каждого обобщенного режима использование всего набора начальных условий. В (10) приведено множество начальных условий для одного обобщенного режима «Разгон»:

$$B = \left\{ \begin{array}{l} b_{1j} | b_{1j} \in Z, 0 \leq b_{1j} \leq 40 \\ b_{2j} | b_{2j} \in Z, 20 \leq b_{2j} \leq 80 \\ b_{3j} | b_{3j} \in Z, 100 \leq b_{3j} \leq 1000 \\ b_{4j} | b_{4j} \in Z, 0 \leq b_{4j} \leq 9 \end{array} \right\}, \quad (10)$$

где $j = 1, 2, \dots, l$ — количество элементов в множестве начальных условий.

В первой строке множества начальных условий приведены значения начальной скорости движения, во второй строке — значения конечной скорости движения, в третьей строке приведены значения координаты начального местоположения головы поезда, в четвертой строке — значения профиля участка пути.

Структура построения множества начальных условий для других обобщенных режимов не имеет отличий от структуры множества (10).

Адекватность воспроизведения поездной работы магистрального грузового тепловоза оценивалась сопоставлением времени работы на позициях контроллера машиниста, полученных путем математического моделирования и опытных поездок с тепловозами серии 2ТЭ116У на Октябрьской железной дороге — филиале ОАО «РЖД» в течение года [8]. При



этом профиль участка пути был задан на основании характеристик профиля II типа по классификации ВНИИЖТ. Обоснование выбора типа профиля приведено в [9]. Данные о времени работы на позициях контроллера машиниста для обоих случаев в виде гистограммы приведены на рисунке. Анализ данных, представленных на рисунке показывает, что относительное время работы по позициям контроллера машиниста, полученное экспериментальными и расчетными методами, имеет удовлетворительное совпадение. При этом максимальное отклонение расчетного относительного времени работы по позициям контроллера машиниста от полученного экспериментально составило не более 5% от общего времени работы тепловоза.

Выводы. 1. Предложенный алгоритм имитации поездной работы грузового магистрального локомотива позволяет с приемлемой для практики точностью воспроизводить показатели поездной работы тепловоза.

2. Данный алгоритм может быть использован для получения количественных оценок влияния изменения показателей поездной работы магистральных грузовых тепловозов при введении в состав дизель-генераторной установки новых элементов и алгоритмов управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила тяговых расчетов для поездной работы / П. Т. Гребенюк [и др.]. М.: Транспорт, 1985. 287 с.

2. Оптимизация управления движением поездов: учеб. пособие / Л. А. Баранов [и др.]. М.: МИИТ, 2011. 164 с.

3. Коссов Е. Е., Кузнецова И. А. К вопросу совершенствования методов имитации поездной работы маневрового тепловоза // Вестник ВНИИЖТ. 2013. № 1. С. 22–26.

4. Киркинский А. С. Линейная алгебра и аналитическая геометрия: учеб. пособие. М.: Академический Проект, 2006. 256 с.

5. Белова Л. Ю., Белов Ю. А. Элементы теории множеств и математической логики: теория и задачи: учеб. пособие. Ярослав: Яросл. гос. ун-т им. П. Г. Демидова, 2012. 204 с.

6. Коссов Е. Е., Сухопаров С. И. Оптимизация режимов работы тепловозных дизель-генераторов // Труды ВНИИЖТ. М.: Интекст, 1999. 184 с.

7. Изменение скоростных характеристик тепловозного дизеля перепуском воздуха и газов / А. Г. Силюта [и др.] // Локомотивы. XXI век: сб. тр. IV Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 140-летию со дня рождения д-ра техн. наук, проф. Ю. В. Ломоносова. СПб.: ПГУПС, 2016. С. 21–25.

8. Валиев М. Ш. Повышение эффективности работы тепловозов средствами бортовых систем диагностирования: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07. СПб., 2011. 161 с.

9. Никифорова Н. Б., Мурзин Р. В., Кудрявцев Я. Б. Обобщенные профили железных дорог при тягово-энергетических расчетах // Вестник ВНИИЖТ. 2011. № 2. С. 22–26.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

СИЛЮТА Анатолий Геннадьевич,
заместитель заведующего лабораторией, отделение
«Тяговый подвижной состав», АО «ВНИИЖТ»

КОССОВ Евгений Евгеньевич,
д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник,
отделение «Тяговый подвижной состав», АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 12.03.2018 г., актуализирована 24.05.2018 г., принята к публикации 14.06.2018 г.

Modeling the train operation of the mainline locomotive

A. G. SILYUTA, E. E. KOSSOV

Joint Stock Company "Railway Research Institute" (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

Abstract. To date, there is a large number of programs that simulate the train operation of the locomotive using the method of traction calculations. As input data in the program, information is entered about the track section, locomotive and train composition. The drawback of modeling the train motion using the traction calculation method is the obtaining of a local unimportant result for a particular section of the track. The article proposes a new approach to modeling the operation of freight mainline locomotive. The train operation of the mainline locomotive is represented by a limited number of generalized modes depending in turn on a limited set of initial conditions – the profile of the track section, the weight of the train, the speed of the locomotive, etc. In this case, the elements of the set of initial conditions are random variables. The advantage of the proposed approach is the ability to give a generalized assessment of the change in the performance of the locomotive train when introducing new elements and control algorithms into the diesel generator unit without linking to a particular section of the track. Comparison of the time of work on the positions of the driver's controller was obtained during the year by mathematical modeling and experienced runs with diesel locomotives of the 2TE116U series at Oktyabrskaya Railway, a branch of the Russian Railways. It showed that the maximum discrepancy between calculated and experimental data does not exceed 5 %. The proposed algorithm for simulating the train operation of the freight mainline locomotive allows reproducing the locomotive train performance parameters with an acceptable accuracy for practice. It can be used to obtain quantitative estimates of the impact of changes in the performance of the train operation of long-distance freight diesel locomotives when new elements and control algorithms are introduced into the diesel generator unit.

Keywords: freight mainline diesel locomotive; train performance; simulation model; theory of sets

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-4-218-221>

REFERENCES

1. Grebenyuk P. T., Dolganov A. N., Nekrasov O. A., Lisitsyn A. L. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoy raboty* [Rules of traction calculations for train operation]. Moscow, Transport Publ., 1985, 287 p.
2. Baranov L. A., Erofeev E. V., Meleshin I. S., Chin' L. M. *Optimizatsiya upravleniya dvizheniem poezdov*. Ucheb. posobie [Optimization of Traffic Control. A tutorial]. Moscow, MIIT Publ., 2011, 164 p.
3. Kossov E. E., Kuznetsova I. A. *K voprosu sovershenstvovaniya metodov imitatsii poezdnoy raboty manevrovogo teplovoza* [To

the question of improving the methods for simulating the train operation of a shunting locomotive]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 2013, no. 1, pp. 22–26.

4. Kirkinskiy A. S. *Lineynaya algebra i analiticheskaya geometriya*. Ucheb. posobie [Linear algebra and analytical geometry. A tutorial]. Moscow, Akademicheskii Proekt Publ., 2006, 256 p.

5. Belova L. Yu., Belov Yu. A. *Elementy teorii mnozhestv i matematicheskoy logiki: teoriya i zadachi*. Ucheb. posobie [Elements of set theory and mathematical logic: theory and tasks. A tutorial]. Yaroslavl', YARosl. gos. un-t im. P. G. Demidova Publ., 2012, 204 p.

6. Kossov E. E., Sukhoparov S. I. *Optimizatsiya rezhimov raboty teplovoznogo dizel'-generatorov* [Optimization of operating modes of diesel locomotive generators]. *Trudy VNIIZhT* [Proc. of the JSC "VNIIZhT"]. Moscow, Intext Publ., 1999, 184 p.

7. Silyuta A. G. *Izmenenie skorostnykh kharakteristik teplovoznogo dizelya perepuskom vozdukha i gazov* [The change in the speed characteristics of diesel locomotive by air and gas bypass]. *Lokomotivy. XXI vek. Sb. tr. IV Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., posvyashchennoy 140-letiyu so dnya rozhdeniya d-ra tekhn. nauk, prof. Yu. V. Lomonosova* [Locomotives. XXI century. Proc. of works of the IV International Scientific and Technical Conference, dedicated to the 140th anniversary of the birth of Dr. Tech. Sciences, Prof. Yu. V. Lomonosov]. St. Petersburg, PGUPS Publ., 2016, pp. 21–25.

8. Valiev M. Sh. *Povyshenie effektivnosti raboty teplovoznov sredstvami bortovykh sistem diagnostirovaniya*. Kand. tekhn. nauk diss. [Improving the efficiency of diesel locomotives using on-board diagnostic systems. Cand. tech. sci. diss.]. St. Petersburg, 2011, 161 p.

9. Nikiforova N. B., Murzin R. V., Kydryavtsev Ya. B. *Obobshchennye profili zheleznykh dorog pri tyagovo-energeticheskikh raschetakh* [Generalized profiles of railways for traction-energy calculations]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 2011, no. 2, pp. 22–26.

ABOUT THE AUTHORS

Anatoliy G. SILYUTA,

Deputy Head of the Laboratory, Department "Traction rolling stock", JSC "VNIIZhT"

Evgeniy E. KOSSOV,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, Department "Traction rolling stock", JSC "VNIIZhT"

Received 12.03.2018

Revised 24.05.2018

Accepted 14.06.2018

■ E-mail: Silyuta.Anatoly@vniizht.ru (A. G. Silyuta)

ВЫШЛИ В СВЕТ ТРУДЫ ВНИИЖТ

Савин А. В. Безбалластный путь. М.: РАС, 2017. 192 с.

Представлена эволюция безбалластного пути как способа уменьшения давления на балласт и уменьшения трудозатрат на текущее содержание, а также рациональные сферы его применения. Выполнено сравнение различных конструкций по объемам укладки в разных странах мира. Описаны конструкции отечественных и зарубежных вариантов безбалластного пути и их классификация, даны технические требования к их отдельным элементам. Также описаны неисправности безбалластных конструкций и способы их устранения в процессе текущего содержания.

Книга предназначена для научных и научно-технических работников железнодорожного транспорта, будет полезна преподавателям и студентам отраслевых вузов, а также тем, кому предстоит проектировать, сооружать и эксплуатировать безбалластный путь.

По вопросам приобретения книги обращаться по адресу: 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, редакционно-издательский отдел АО «ВНИИЖТ».

Тел.: (499) 260-43-20, e-mail: rio@vniizht.ru, www.vniizht.ru.