



Оперативное нормирование энергоресурсов на тягу поездов с использованием метода искусственных нейронных сетей



Сергей МАЛАХОВ



Михаил КАПУСТИН

*Малахов Сергей Валерьевич – Российский университет транспорта, Москва, Россия.
Капустин Михаил Юрьевич – Российский университет транспорта, Москва, Россия*.*

Задача ресурсосбережения является актуальной для всех транспортных компаний, и поисками путей её решения занимаются многие мировые сообщества учёных и инженеров. Мировые железнодорожные компании и особенно такие крупные, как «Российские железные дороги», являются большими потребителями энергоресурсов, поэтому экономия этих ресурсов – целевая задача при снижении операционных затрат. Одним из способов достижения поставленной цели может быть применение системы оптимального нормирования энергии на тягу каждого поезда – система оперативного нормирования. Этот способ основывается на моделировании процесса движения за счёт применения метода теории оптимального управления – динамического программирования. В современных условиях развития техники и технологий стала возможна разработка таких систем оперативного нормирования, наделённых важными свойствами: высокая производительность, многозадачность, точность решения, простота использования и обслуживания. Эти требования накладывают определённые ограничения на архитектуру системы оператив-

ного нормирования. Типовая архитектура системы должна строиться вокруг централизованного узла, который будет выступать в роли решателя и хранилища, узлы для ввода и вывода информации могут быть географически разделены. Метод динамического программирования может быть усовершенствован за счёт использования его в процессе обучения искусственных нейросетей, которые будут формировать не только априорные оценки расхода энергии на тягу, но и апостериорную оценку управления поездом (машинистом или системой автоведения). Также использование искусственных нейросетей позволит непрерывно совершенствовать метод за счёт обучения на накопленном объёме данных реальных поездок, что позволит уточнять нормы расхода энергоресурсов и в дальнейшем качественно планировать затраты. Прототип системы оперативного нормирования разработан на кафедре «Тяговый подвижной состав» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта, и полученные на нём результаты позволяют утверждать, что выбранный подход к решению проблемы энергосбережения выбран верно.

Ключевые слова: транспорт, железная дорога, тяговые расчёты, оптимизация тяговых расчётов, нормирование расходов энергоресурсов на тягу поездов, искусственные нейронные сети, автоматические системы управления транспортными средствами, тяговые свойства локомотива, регулирования сил тяги и торможения.

*Информация об авторах:

Малахов Сергей Валерьевич – ассистент кафедры тягового подвижного состава Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта, Москва, Россия, needhelps@mail.ru.

Капустин Михаил Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры тягового подвижного состава, Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта, член Научно-технического совета ОАО «РЖД», Москва, Россия, roatuour@bk.ru.

Статья поступила в редакцию 04.12.2019, актуализирована 20.01.2020, принята к публикации 27.02.2020.

For the English text of the article please see p. 164.

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с долгосрочными планами развития холдинга «Российские железные дороги» требуется сократить удельный расход энергоресурсов на тягу поездов [1]. Эта задача является актуальной для всех мировых железнодорожных компаний, и на практике идёт непрерывный поиск решения проблемы экономии энергоресурсов и оптимального ведения поезда [1–7]. Проблема рассматривается на разных уровнях: для единичного поезда [5], для групп поездов, следующих друг за другом [1], на уровне управления движением поездов большого количества поездов [4]. Отечественные учёные и инженеры также не оставляют без внимания указанную проблему, что отражено в практическом использовании устройств и технологий ресурсосбережения [8–10] и работах [11–13]. Использование тяговых расчётов для оперативного нормирования энергоресурсов на тягу поездов с целью снижения расхода энергии является одним из практических применений прикладных методов теории тяги. Но существующие методики тяговых расчётов и их реализации, разработанные на основании текущих правил тяговых расчётов [14], не в полной мере не соответствуют требованиям систем оперативного нормирования. Поэтому необходимо искать новые подходы к решению задачи экономии энергозатрат на тягу поездов.

Под оперативным нормированием энергозатрат будем понимать определение минимального обоснованного расхода энергозатрат на движение поезда по участку. Основными требованиями к системам оперативного нормирования являются: высокая производительность, многозадачность, точность решения, простота использования и обслуживания, высокая доступность. Также такая система должна выполнять не только оценку расхода энергии на поездку априори, но и делать оценку поездки апостериори с указанием ошибок системы автоведения или машиниста.

Для реализации такой системы оперативного нормирования энергозатрат на тягу поездов целесообразно применять комплекс программ, который позволит эффективно использовать вычислительные мощности компьютеров. Это объясняется тем, что точные оптимальные решения (обусловлено требованием точности), полученные числен-

ным методом динамического программирования [12], являются достаточно затратными, с точки зрения вычислительной мощности процессора. Существуют методы нахождения оптимальной траектории движения на основе принципа максимума Понтрягина [11], но такие реализации имеют серьёзные ограничения на функциональные зависимости.

АРХИТЕКТУРА КОМПЛЕКСА ОПЕРАТИВНОГО НОРМИРОВАНИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ

Авторами разработана вычислительно эффективная реализация метода динамического программирования для однокритериального или многокритериального поиска оптимума. Потребности программы в оперативной памяти на один тяговый расчёт могут быть оценены по формуле:

$$N_{TC} = 5 \cdot \frac{S}{\Delta_s} \cdot \frac{v_{max}}{\Delta_v} \cdot N_U,$$

где S — длина пути;

Δ_s — величина шага дискретизации по координате;

v_{max} — максимальная скорость движения;

Δ_v — величина шага дискретизации по скорости;

N_U — число управлений.

Для типового тягового плеча в 200 км на поездку потребуется только оперативной памяти около 4 ГБ, что при многозадачном параллельном расчёте потребует серьёзных вычислительных мощностей, например, для 1000 одновременных расчётов потребуется 4 ПБ оперативной памяти. Поэтому, чтобы соответствовать требованиям высокой производительности, многозадачности, требуется использовать подход разделения задач.

Программный комплекс состоит из: программ подготовки начальной информации,

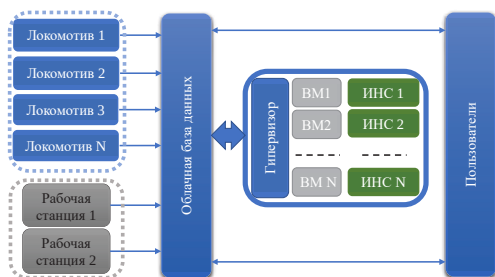


Рис. 1. Типовая архитектура комплекса оперативного нормирования энергоресурсов [автор С. В. Малахов].



Таблица 1

Тяговая характеристика электровоза ВЛ11 для последовательно-параллельного соединения ТЭД и полного возбуждения

Скорость, км/ч	Сила тяги, кН	Скорость, км/ч	Сила тяги, кН	Скорость, км/ч	Сила тяги, кН
21,7	557	28,0	239	36,1	106
22,3	513	28,9	217	37,0	100
22,9	468	29,5	196	38,3	93,1
23,5	436	30,4	177	39,8	84,2
24,1	399	31,3	164	41,0	78,3
25,0	355	31,9	154	41,9	75,3
25,9	309	33,1	139	42,8	70,9
26,5	285	34,0	124	43,7	68,0
27,1	261	35,2	114	44,9	65,0

Автор С. В. Малахов.

расчётных программ, программ визуализации (рис. 1).

Разделение задач позволяет независимо выполнять: ввод и актуализацию информации об условиях движения и ограничениях, расчёты, обработку результатов. Эти задачи выполняются параллельно, что требует небольшого количества операторов, которые формируют задание на расчёт и обеспечивают ввод начальной информации. Так как предполагается, что потребителем информации является локомотивное депо, то результаты работы программного комплекса должны быть доступны непосредственно в конкретном депо. Однако каждое локомотивное депо имеет ограниченное количество участков обслуживания, определённые серии локомотивов, поэтому задачу подготовки и актуализации информации о поездке необходимо решать на более высоком уровне, чем отдельно взятое депо.

ПОДГОТОВКА И ВВОД НАЧАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Операторы, решающие задачу подготовки и актуализации информации, должны изначально наполнить базу данных требуемой начальной информацией (тяговые и токовые характеристики, профиль и план пути, погодные условия и т.д.), а затем проводить актуализацию этой информации, например, ограничений по скорости, погодных условий и т.д.

В качестве программы подготовки начальной информации для расчёта целесообразно использовать приложение для работы с электронными таблицами из готовых свободных офисных пакетов, например, LibreOffice Calc на операционной системе Linux, которое является открытым

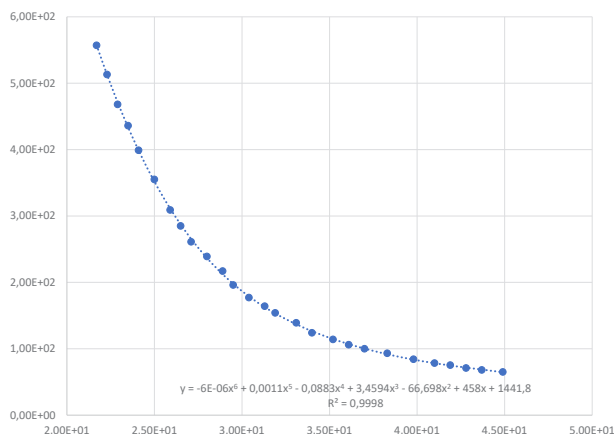
программным обеспечением. Так как обмен данными между частями комплекса проходят через базу данных (рис. 1), то на этапе подготовки данных следует использовать готовое программное обеспечение, имеющее версии для всех распространённых операционных систем.

Профиль и план пути может быть введён в электронную таблицу с использованием возможностей импорта, например, в базе данных MySQL существует оператор «Load Data Infile», который может напрямую загружать данные из файла в формате текста с разделителями.

Ввод функциональных зависимостей, выраженных в табличных данных из [14], также возможно реализовать в LibreOffice Calc или Microsoft Excel. Рассмотрим пример получения функциональной зависимости тяговой характеристики ВЛ11, заданной в табличном виде (табл. 1).

Данные вносятся в электронную таблицу, затем по ним строят диаграмму, добавляют линию тренда, которая является регрессионной. Для лучшего приближения выбираем полиномиальную зависимость не менее седьмого порядка. Результат выполнения процедуры представлен на рис. 2. Значение коэффициента детерминации показывает достаточно хорошее приближение. Параметры аппроксимирующей функции могут подбираться для данных индивидуально. Коэффициенты уравнения с рис. 2 могут быть перенесены в базу данных путём вставки в заранее обусловленном формате в таблицу базы данных. Таким же образом вводятся и остальные функциональные зависимости локомотива и состава.

Программы в составе комплекса должны взаимодействовать друг с другом посред-



**Рис. 2. Пример
аппроксимации тяговой
характеристики
электровоза ВЛ11.
[автор С. В. Малахов].**

ством базы данных. Это обусловлено тем, что имеются готовые инструменты для просмотра и правки данных, для эффективного многопользовательского доступа к данным. База данных позволяет эффективно манипулировать данными в рамках реляционной алгебры или пользовательских скриптов и обеспечивает надёжное структурированное хранение данных, в том числе в режиме кластеризации или шардинга. В качестве такой базы данных использованы MySQL (или аналоги MariaDB, Persona Server) и PostgreSQL. Это свободные системы управления базами данных, которые используются в режиме совместного доступа по сети. Для локального тестирования программы используется локальная база данных SQLite, которая также обеспечивает многопользовательский доступ на локальном уровне. В случае реального использования системы с большим количеством удалённых пользователей целесообразно использовать одну из сетевых реляционных баз данных с размещением на выделенном сервере в облаке. Облако может быть частным в виде собственного сервера или кластера серверов с программным обеспечением на основе операционной системы Linux (OpenStack, Apache Cloudstack) или общедоступным (платформа облачных сервисов от Mail.Ru Group, платформа Microsoft Azure, платформа Amazon Web Services и т.д.).

ПОИСК ОПТИМАЛЬНОЙ НОРМЫ РАСХОДА ЭНЕРГИИ

Блок автоматического тягового расчёта также должен быть размещён в облачной среде. Для такого требования есть несколько причин:

- **высокая производительность.** В качестве универсального метода оптимизации выбрано динамическое программирование, так как позволяет реализовать детальную модель поезда без ограничений на зависимости между переменными. Динамическое программирование предполагает несколько этапов: разбиение задачи на более простые — матрица возможных состояний поезда, получение и анализ возможных траекторий движения поезда, изменение условий, пересчёт матрицы возможных состояний или пересборка траекторий и т.д. Этапы алгоритма требуют частого интегрирования уравнения движения поезда с учётом многих ограничений (в зависимости от сложности модели), которые могут быть заданы в виде дифференциальных уравнений или даже в виде систем дифференциальных уравнений (в случае учёта динамических сил в поезде). Для сокращения времени расчёта должны применяться серверы с несколькими многоядерными процессорами, их число должно позволять выдерживать нагрузку от потребителей в случае роста запросов на расчёт. С учётом парка грузовых локомотивов (порядка 7500) можно оценить максимальное количество поездов и соответственно количество запросов на расчёт, кратное количеству поездов. Поэтому требуется максимально масштабируемая система, что обеспечивается облачными решениями;

- **требования к объёму оперативной памяти.** Динамическое программирование является поисковым алгоритмом направленного перебора, который для определения решения осуществляет неполный перебор вариантных траекторий, количество которых ограничивается алгоритмически по целому ряду усло-



Результаты расчётов

Расчёт	Расход энергии (метод Беллмана), кВт • ч	Расход энергии (метод ИНС), кВт • ч	Время хода (метод Беллмана), мин	Время хода (метод ИНС), мин
1	2723	2774	61,54	61,33
2	2810	2852	61,61	61,72
3	2858	2860	61,66	61,65
4	2443	2479	61,39	61,47
5	2597	2423	61,66	61,71

Автор С. В. Малахов.

вий. Невозможные варианты перебора отсеиваются на каждом шаге, поэтому не осуществляется полный перебор. Но даже в этом случае при малой величине шага по координате и большой длине тягового плеча количество возможных траекторий составляет число 10^{22} и более. Использование облачной среды позволяет запустить процесс решения внутри виртуальной машины, ресурсами которой можно гибко управлять;

- **сетевой доступ.** Высокие требования к аппаратному обеспечению накладывают ограничения на сценарии использования вычислительной программы для большого количества потребителей. При наличии быстрых каналов связи нет необходимости размещать оборудование рядом с конечным пользователем. Поэтому облачное применение программы позволит сэкономить финансовые ресурсы заказчика и консолидировать вычислительную нагрузку.

Прорывным решением по сравнению с классическими методами является метод, позволяющий разделить процессы реализации и получения решения. Современный технический уровень и математический аппарат позволяют в полной мере использовать методы нелинейной аппроксимации многомерных функций — искусственные нейронные сети (ИНС). Также актуализация требуется только для классических методов оптимизации, таких как принцип максимума Понтрягина или принцип оптимальности Беллмана, которые не предполагают обучение (повышение адекватности) модели. Такие методы чувствительны к точности начальной информации. В случае если изменяются характеристики подвижного состава, например, из-за износа оборудования, полученное оптимальное решение не претендует на точность. В отличие от классических методов применение «чёрного ящика» — ИНС — позволяет обеспечить непрерывное обучение и повышение точности норм в зависимости

от количества обучающей информации. С течением времени объём обучающей информации будет только возрастать, что позволит обеспечить непрерывное улучшение результата без применения отдельных дополнительных методик или технологий.

Необходимость в применении таких структур возникла по причине основных недостатков классических методов: длительное получение оптимального решения, потребность в специальном повышении адекватности начальных данных, априорная модель поезда, не учитывающая конкретные особенности подвижного состава. Для метода искусственных нейронных сетей потребности в памяти оказывают существенное ограничение только в режиме обучения, которое может производиться параллельно с работой нейросети и разделено во времени и пространстве (например, другим центром обработки данных), зависят от структуры сети и размера выборок.

В качестве универсального кроссплатформенного средства визуализации результатов расчётов выступает интерфейс веб-приложения, альтернативным вариантом может быть использование отдельного десктопного приложения. Для работы с разработанным на кафедре «Тяговый подвижной состав» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта комплексом было создано приложение с подключением к базе данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приложение посредством прямого подключения к базе данных извлекает результаты расчётов и отображает на дисплее пользователя (машиниста). В прототипированной версии, реализованной на кафедре «Тяговый подвижной состав», выполняется только поиск по уникальному идентификатору поездки для того, чтобы показать реализуемость предлагаемого в работе решения. Если используется сетевая база данных, то поддерживается

многопользовательский доступ к нормам в сервере базы данных.

Для проверки работы комплекса выполнялись нормировочные вариантные расчёты для различных участков пути с различными условиями движения и параметрами поезда, обучение проводилось на ограниченном числе модельных поездов.

Для базового расчёта выбирался произвольный участок профиля длиной около 50 километров, а поезд состоял из локомотива ВЛ11 и 50 полувагонов, полностью и частично загруженных. Проводилось десять вариантных расчётов (табл. 2), имитирующих различные ситуации с пропуском поезда на отдельных участках пути за изменения временных ограничений скорости, которые выполнены с различными условиями движения. С целью снижения потребления памяти и ускорения расчётов не приводятся кривые движения в графическом виде.

Результаты расчётов показывают, что время хода поезда выдерживается достаточно точно и разброс этого параметра менее минуты. Цифры, полученные одним и другим методом, являются достаточно близкими, что подтверждает эквивалентность решений. Результаты расчётов передаются машинисту поезда для выполнения мотивационной функции. По окончании поездки по фактическим условиям движения происходит корректировка оперативной нормы и проводится анализ поездки на соответствие оптимальному плану движения. В случае сильного отклонения нормы и фактического результата поездка добавляется в обучающую выборку для переобучения ИНС.

Такой подход является только первым этапом для создания современной беспилотной единой системы управления перспективными локомотивами [8]. На втором этапе обученная ИНС может формировать нормы и проводить анализ движения на борту локомотива непрерывно с постоянным обучением в режиме подкрепления, то есть без необходимости в учителе (не требуется мощный стационарный компьютер). На третьем этапе следует переходить к управлению поездом на основе ИНС при сохранении контролирующего персонала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2025 года и на

перспективу до 2030 года. [Электронный ресурс]: http://www.rzd-expo.ru/innovation/resource_saving/energeticheskay_efektivnost/enstrat2030.pdf. Доступ 19.12.2019.

2. Huang, Jin; Deng, Yangdong; Yang, Qinwen; Sun, Jianguang. An Energy-Efficient Train Control Framework for Smart Railway Transportation. IEEE Transactions on Computers, 2015, Vol. 65, Iss. 5, pp. 1407–1417. DOI: 10.1109/TC.2015.2500565.

3. Cismaru, D. C., Drighiciu, M. A., Nicola, D. A. SIMULINK Model for Study of Energy Efficient Train Control. Proceedings 12th International Conference on Applied and Theoretical Electricity, 2014. DOI: 10.1109/ICATE.2014.6972685.

4. Miyatake, M., Ko, H. Optimization of Train Speed Profile for Minimum Energy Consumption. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, May 2010, Vol. 5, Iss. 3, pp. 263–269. DOI: 10.1002/tee.20528.

5. Lu, Shaofeng; Hillmanssen, S.; Ho, Tin; Roberts, C. Single-Train Trajectory Optimization. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, June 2013, Vol. 14, Iss. 2, pp. 743–750. DOI: 10.1109/ITITS.2013.2234118.

6. Su, Shuai; Tang, Tao; Roberts, C. A Cooperative Train Control Model for Energy Saving. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, April 2015, Vol. 16, Iss. 2, pp. 622–631. DOI: 10.1109/ICIT.2013.6696259.

7. Yang, Li; Lidén, T.; Leander, P. Achieving energy-efficiency and on-time performance with Driver Advisory Systems. IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation Proceedings, August 2013, pp. 13–18. DOI: 10.1109/ICIRT.2013.6696260.

8. Истомин С. Г. Определение непроизводительных потерь электроэнергии электроподвижным составом с использованием бортовых информационно-измерительных комплексов учёта электроэнергии // Вестник РГУПС. — Ростов-на-Дону. — 2015. — № 2 (58). — С. 19–24.

9. Мугинштейн Л. А. Современная методология технического нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов локомотивами на тягу поездов. — М.: ВМГ-Принт, 2014. — 144 с.

10. Черемисин В. Т., Ушаков С. Ю., Истомин С. Г. Контроль нерационального использования электрической энергии на тягу поездов с применением бортовых информационно-измерительных комплексов учёта электроэнергии // Известия Транссиба. — 2015. — № 1 (21). — С. 69–74.

11. Юренко К. И. Принцип максимума Л. С. Понтрягина в задаче оптимального управления движением поезда // Вестник ВЭЛНИИ. — 2018. — № 1–2(79). — С. 147–161.

12. Юренко К. И. Расчёт энергооптимальных режимов движения перспективного подвижного состава методом динамического программирования // Известия вузов. Электромеханика. — 2013. — № 3. — С. 78–82.

13. Юренко К. И., Фандеев Е. И. Принципы построения и имитационное моделирование систем автоведения электроподвижного состава // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2016. — № 08. — С. 88–102.

14. Правила тяговых расчётов для поездной работы. Нормативное производственно-практическое издание. Утверждены распоряжением ОАО «РЖД» № 867р от 12.05.2016 г. — М.: ОАО «РЖД», 2016. — 515 с.

15. Капустин М. Ю., Малахов С. В. К вопросу об унификации и стандартизации локомотивных микропроцессорных систем // Локомотивы. Электрический транспорт. XXI век: Т. 2: Материалы VI Международной научно-техн. конференции, Санкт-Петербург, 13–15 ноября 2018 г. — СПб.: ПГУПС, 2018. — С. 67–74.

