

УДК 656.222.4

А. А. ЕРОФЕЕВ, кандидат технических наук, В. Г. КОЗЛОВ, старший научный сотрудник, О. А. ТЕРЕЩЕНКО, старший преподаватель, Ю. С. СИДОРОВИЧ, магистр технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

## НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К РАЗРАБОТКЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ГРАФИКА ДВИЖЕНИЯ ПЕЗДОВ

Развитие цифровой экономики страны требует сопутствующих научно-практических изменений в технологии планирования и организации перевозочного процесса на железнодорожном транспорте, в частности в системе планирования движения поездов. Существующая технология планирования движения поездов является весьма трудоемкой и основывается на автоматизированной разработке нормативного графика движения поездов с учетом множества технических и технологических параметров. При этом применяемая методика прокладки ниток поездов на графике движения не учитывает различие в энергетических затратах организации движения поездов разных категорий при различных схемах пропуска их по железнодорожному участку. Для решения проблемы авторами выработаны интеллектуальные подходы, позволяющие повысить энергоэффективность и, как следствие, общую эффективность разработанного графика движения поездов.

**Г**рафик движения поездов как общесистемный нормативный документ является планом эксплуатационной работы всех подразделений Белорусской железной дороги. Он обеспечивает: удовлетворение потребностей в перевозках пассажиров и грузов; безопасность движения поездов; эффективное использование пропускной и провозной способности участков и перерабатывающей способности станций; рациональное использование подвижного состава; соблюдение установленной продолжительности непрерывной работы локомотивных бригад; возможность производства работ по текущему содержанию и ремонту пути, сооружений, устройств СЦБ, связи и электроснабжения. Разработка графика движения поездов в настоящее время является одним из безусловных стандартов организации поездной работы и осуществляется как правило с применением автоматизированной системы построения графика движения поездов (АС «Графист»), которая включает в себя комплекс взаимосвязанных информационно-управляющих подсистем. При этом в нормативном графике движения поездов не учитываются отличия в энергетических затратах для различных вариантов пропуска поездов по участку.

Для ликвидации указанного недостатка на Белорусской железной дороге с привлечением ученых и специалистов БелГУТа активно ведется разработка автоматизированной системы построения и оценки энергоэффективных графиков движения поездов (АС ЭГДП). Реализация проекта осуществляется с учетом существующих информационных систем и интегрирована в единый комплекс АС «Графист» (рисунок 1). Основными целями создания АС ЭГДП являются:

- совершенствование процессов организации поездной работы на Белорусской железной дороге за счет создания и использования автоматизированной системы построения энергоэффективных графиков движения поездов и моделирования пропуска поездов на направлениях;

- информационная поддержка принятия обоснованных управленческих решений при выполнении основных задач по повышению эффективности поездной работы и конкурентоспособности Белорусской железной дороги на рынке транспортных услуг, увеличение объемов и качества перевозок, сокращение издержек.

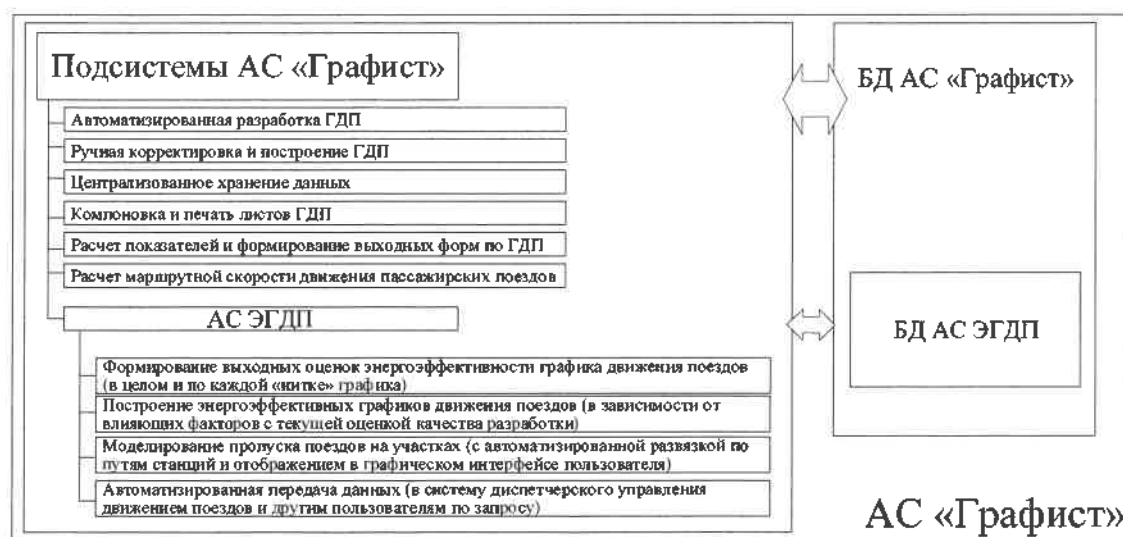


Рисунок 1 – Функциональная структура АС ЭГДП

АС ЭГДП предназначена:

- для формирования выходных оценок энергоэффективности графика движения поездов в целом и по каждой «нитке» графика;
- построения энергоэффективных графиков движения поездов в зависимости от влияющих факторов с текущей оценкой качества разработки;
- моделирования пропуска поездов на направлениях с автоматизированной развязкой по путям станций и отображением в графическом интерфейсе пользователя;
- автоматизированной передачи данных в систему диспетчерского управления движением поездов и другим пользователям по запросу.

Композиция АС ЭГДП содержит четыре подсистемы:

- 1 Формирование выходных оценок энергоэффективности графика движения поездов в целом и по каждой «нитке» графика.
- 2 Построение энергоэффективных графиков движения поездов в зависимости от влияющих факторов с текущей оценкой качества разработки.
- 3 Моделирование пропуска поездов на участках с автоматизированной развязкой по путям станций и отображением в графическом интерфейсе пользователя.
- 4 Автоматизированная передача данных в систему диспетчерского управления движением поездов.

Подсистема «Формирование выходных оценок энергоэффективности графика движения поездов» обеспечивает:

- расчеты показателей энергоэффективности разработанного ГДП: в сравнении с другим (эталонным или разработанным ранее) ГДП, для выделенной нитки графика, для выделенной категории поездов;
- расчет энергоэффективности для фрагмента нитки разработанного ГДП при изменении параметров ее прокладки только на одном или нескольких перегонах, расположенных последовательно, в сравнении с первоначальным результатом;
- отображение выходной информации в графическом интерфейсе пользователя.

Энергоэффективность графика движения поездов оценивается: для графика движения поездов, отдельных категорий поездов и отдельных ниток графика.

Энергоэффективность для графика движения поездов и отдельных категорий поездов определяется суммированием результатов расчета энергоэффективности для отдельных ниток, принадлежащих объекту анализа.

Энергоэффективность графика движения поездов учитывается по установленным элементам затрат:

- расход топлива на разгон и замедление поездов;
- затраты поездочасов в движении и на стоянку.

Затраты учитываются отдельно по видам тяги, категориям поездов, сериям локомотивов в голове поезда, массе поездов.

Элементы учитываемых затрат на одну нитку графика движения поезда по участку:

- а) поездочасы в движении:

$$\mathcal{E}_{пч}^{дв} = \frac{L_{уч} e_{пкм}}{\sum t_{пер}}, \quad (1)$$

где  $L_{уч}$  – длина поездочастка, км;  $e_{пкм}$  – расходная ставка поездочасо-километра, руб.;  $\sum t_{пер}$  – сумма перегонов

ных времен следования поезда по участку без учета времени на стоянки, ч;

- б) поездочасы стоянок:

$$\mathcal{E}_{пч}^{ст} = c_{пч} \sum t_{ст}, \quad (2)$$

где  $c_{пч}$  – расходная ставка поездочаса простоя поезда, руб.;  $\sum t_{ст}$  – сумма времен стоянок поезда на участке следования, ч;

в) энергетические затраты, связанные с разгоном и замедлением поездов:

$$\mathcal{E}_{эл} = k_p e_p c_t, \quad (3)$$

где  $k_p$  – число разгонов на участке следования поезда;  $e_p$  – дополнительные затраты условного топлива (электроэнергии), приходящиеся на один разгон/замедление поезда, кг;  $c_t$  – стоимость 1 кг условного топлива (в т.ч. в пересчете на электроэнергию), руб.

Затраты, приходящиеся на одну нитку поезда,

$$\mathcal{E}_н = \mathcal{E}_{пч}^{дв} + \mathcal{E}_{пч}^{ст} + \mathcal{E}_{эл} = \frac{L_{уч} e_{пкм}}{\sum t_{пер}} + c_{пч} \sum t_{ст} + k_p e_p c_t. \quad (4)$$

Затраты, приходящиеся на группу ниток или график движения поездов в целом,

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{гдп} &= \sum_{i=1}^{N_n} \mathcal{E}_н = \sum_{i=1}^{N_n} (\mathcal{E}_{пч}^{дв} + \mathcal{E}_{пч}^{ст} + \mathcal{E}_{эл}) = \\ &= \sum_{i=1}^{N_n} \left( \frac{L_{уч} e_{пкм}}{\sum t_{пер}} + c_{пч} \sum t_{ст} + k_p e_p c_t \right), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $N_n$  – число поездов в группе (на графике).

Коэффициент энергоэффективности:  
– нитки графика движения поездов –

$$\mathcal{E}_{эф}^н = \frac{\mathcal{E}_н^э}{\mathcal{E}_н}, \quad (6)$$

– графика движения поездов (группы поездов) –

$$\mathcal{E}_{эф}^{гдп} = \frac{\sum_{i=1}^{N_n} \mathcal{E}_{ни}^э}{\sum_{i=1}^{N_n} \mathcal{E}_{ни}}, \quad (7)$$

где  $\mathcal{E}_н^э$  – затраты, приходящиеся на пропуск поезда по эталонной нитке (без остановок на участке, по энергоэффективным временам), руб.

Для оценки совокупности  $n$  ниток, по показателю энергоэффективности  $\mathcal{E}_{эф}$  вычисляется его математическое ожидание  $M$  и среднее квадратическое отклонение  $S_0$ , взвешенные по продолжительности времени хода поезда по нитке:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n \mathcal{E}_{эф}^i T_i}{\sum_{i=1}^n T_i}, \quad (8)$$

где  $\mathcal{E}_{\phi i}$  – коэффициент энергоэффективности  $i$ -й нитки графика;  $T_i$  – время хода поезда по  $i$ -й нитке графика (разница между моментом времени прибытие и отправления поезда), ч,

$$S_0 = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\mathcal{E}_{\phi i} - M)^2} \quad (9)$$

Энергоэффективность ГДП оценивается разделением ниток на три категории:

I (энергоэффективные нитки) – все нитки для которых

$$\mathcal{E}_{\phi i} \geq (M - 0,5S_0); \quad (10)$$

II (условно энергоэффективные нитки, требующие дополнительной проверки) – все нитки для которых

$$(M - 0,5S_0) > \mathcal{E}_{\phi i} \geq (M - 1,5S_0); \quad (11)$$

III (энергетически неэффективные нитки, требующие дополнительной проверки) – все нитки для которых:

$$(M - 1,5S_0) > \mathcal{E}_{\phi i}. \quad (12)$$

Гистограмма распределения вероятности отклонения коэффициента энергоэффективности от среднеграфикового значения приведена на рисунке 2.

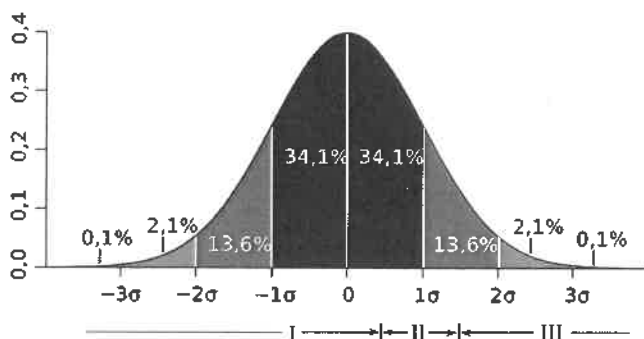


Рисунок 2 – Гистограмма распределения вероятности отклонения коэффициента энергоэффективности нитки графика от среднего значения

Таким образом, для разработанного графика движения поездов (для средних условий) оценка общего количества энергоэффективных ниток составляет около 67 %, условно энергоэффективных ниток (требующих эвристического анализа) – 24 %, энергетически неэффективных ниток (также требующих эвристического анализа) – 9 %.

Подсистема «Построение энергоэффективных графиков движения поездов» расширяет существующие возможности создания и оценки графиков движения поездов.

Построение энергоэффективных графиков движения поездов осуществляется с использованием:

- инструментария текущей версии АС «Графист»;
- разработанного специализированного инструментария, позволяющего осуществлять информационную поддержку принятия решений в процессе разработки энергоэффективного графика движения поездов.

Инструментарий информационной поддержки принятия решений обеспечивает:

- максимальное использование условий профиля пути;
- учет продолжительности стоянок поездов на промежуточных станциях участков;
- учет энергоэффективности применяемых режимов движения поезда;
- отображение выходной информации в графическом интерфейсе пользователя.

Подсистема «Моделирование пропуска поездов на участках» обеспечивает:

- автоматизированное создание предварительных пониточных моделей пропуска поездов на графике на основе алгоритмов автоматической прокладки;
- автоматизированную развязку поездов по путям станции с указанием ограничивающих условий;
- отображение результатов моделирования в графическом интерфейсе пользователя.

В процессе моделирования пропуска поездов подсистема учитывает:

- количество путей на перегоне;
- количество и полезную длину приемоотправочных путей на станции и их специализацию;
- категорирование поездов и их технические характеристики;
- установленный приоритет пропуска для заданных категорий поездов;
- эталонные времена хода по категориям поездов;
- действующие ограничения скорости движения поездов.

Подсистема «Автоматизированная передача данных» обеспечивает автоматизированное копирование в настраиваемом режиме разработанных ГДП (нормативных и вариантных) в виде графика и расписания в специальные директории с ограниченным удаленным доступом.

Автоматизация процесса двустороннего обмена данными между АС ЭГДП и автоматизированной системой «Актуальное расписание движения поездов» (АС АРДП) реализовано согласно схеме, представленной на рисунке 3.

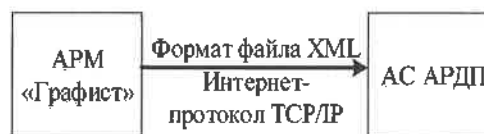


Рисунок 3 – Процесс передачи файла нормативного графика движения поездов между АС ЭГДП и АС АРДП

Протоколы информационного обмена между АС ЭГДП и АС АРДП разработаны и реализованы совместно с Конструкторско-техническим центром Белорусской железной дороги.

Таким образом, разработанные и представленные в статье научно-практические подходы позволяют создавать более качественные графики движения поездов, актуализировать их и обеспечивать в процессе разработки всестороннюю численную оценку энергоэффективности.

## Список литературы

1 **Бадажков, М. А.** Энергоэффективность существующего графика движения поездов, решения по оптимизации / М. А. Бадажков // Транспортная инфраструктура сибирского региона. – 2017. – № 1. – С. 134–138.

2 Автоматизированная система сменно-суточного планирования поездной и грузовой работы Белорусской железной дороги / В. Г. Кузнецов [и др.] // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. – 2015. – № 2(30). – С. 53–56.

3 **Кузнецов, В. Г.** Комплексный подход к информационным технологиям оперативного управления поездной работой на Белорусской железной дороге / В. Г. Кузнецов, А. А. Ерофеев, М. В. Федорцов // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте (ИСУЖТ-2013): Вторая науч.-техн. конф., 21–22 окт. 2013, Москва. – М. : ОАО «НИИАС», 2013. – С. 80–82.

4 **Миронов, А. Ю.** Перевозочному процессу – инновационные технологии / А. Ю. Миронов // Железнодорожный транспорт. – 2008. – № 5. – С. 26–30.

5 **Терещенко, О. А.** Методика оценки энергоэффективности графика движения поездов / О. А. Терещенко, Ю. С. Сидорович // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. – 2017. – № 2. – С. 103–105.

6 **Шапкин, П. Н.** Твердый подекадный график движения поездов как одно из решений проблемы адаптации графика к колебаниям вагонопотоков / П. Н. Шапкин, Е. М. Кожанов // Вестник ВНИИЖТ. – 2007. – № 3. – С. 30–33.

7 **Шаронов, Е. А.** Организация грузового движения по расписанию / Е. А. Шаронов // Железнодорожный транспорт. – 2010. – № 10. – С. 74–77.

8 Управление эксплуатационной работой и качеством перевозок на железнодорожном транспорте / П. С. Грунтов [и др.]. – М. : Транспорт, 1994. – 543 с.

9 **Schittenhelm, B.** Planning with Timetable Supplements in Railway Timetables Proc. / B. Schittenhelm // Annual Transport Conference, Esbjerg, 26 aug. 2011 abstr. / Aalborg University. – Esbjerg, 2011. – P. 47–61.

Получено 27.05.2019

**A. A. Erofeev, V. G. Kozlov, O. A. Tereshchenko, Yu. S. Sidorovich.** Scientific and practical approaches to the development of energy efficient train schedule.

The development of the country's digital economy requires accompanying scientific and practical changes in the technology of planning and organizing a transportation process in railway transport including a train planning system. The existing technology of planning a movement of trains is very time consuming and its based on the automated development of regulatory train schedules taking into account many technical and technological parameters. At the same time the applied method of laying train tracks on the schedule does not take into account a difference in the energy costs of organizing a movement of different categories of trains with different schemes for passing them through the railway section. To solve the problem the authors developed intelligent approaches that improve energy efficiency and as a result the overall efficiency of the developed train schedule.