

А. Ю. ПАПАХОВ<sup>1</sup>, Н. А. ЛОГВИНОВА<sup>2</sup>, К. В. МАТВИЕНКО<sup>3</sup> (ДНУЖТ)

Кафедра «Управление эксплуатационной работой», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Днепро, Украина

<sup>1</sup>тел. + 38-067-524-43-22, e-mail: papahova0362@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2357-8158>

<sup>2</sup>тел. + 38-067-524-43-22, e-mail: logvinovanata1987@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9350-881X>

<sup>3</sup>тел. + 38-095-792-11-75, e-mail: dissertaciaz@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9054-7824>

## ВЕКТОРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ В УСЛОВИЯХ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ ПО ГРАФИКУ В ЭНЕРГООПТИМАЛЬНОМ РЕЖИМЕ

### Постановка проблемы

Главным документом, регламентирующим работу железных дорог есть график движения поездов.

При разработке графика движения поездов закладывается унифицированная масса поезда, которая определяется по тяговым расчетам в зависимости от продольного профиля железнодорожного направления. Кроме этого на основании массы поезда и тяговых характеристик локомотива строится график движения поезда по перегонам.

На железнодорожных направлениях с значительными размерами пассажирского движения грузовые поезда попадают под обгон пассажирскими, которые движутся с большей скоростью, что приводит к дополнительной остановке и троганию поезда с места, что в свою очередь ведет к значительным затратам электроэнергии на электрифицированных железнодорожных направлениях.

Перегонное время хода поезда зависит от технической скорости при существующем продольном профиле пути, массы поезда и требуемых затрат электроэнергии, которые зависят от массы поезда и скорости его движения.

При существующих программах разработки графика движения поездов перегонное время хода принимается при условии максимального использования мощности локомотивов. Увеличение ходовой скорости движения поездов при постоянной массе приводит к увеличению затрат электроэнергии на тягу поездов.

В существующих условиях необходимо решить задачу определения оптимальной массы грузовых поездов и скорости их движения с минимальными затратами электроэнергии, необходимой для их перемещения по участку.

### Анализ последних исследований

Исследованием проблемы увеличения скорости движения поездов посвящены много работ отечественных и зарубежных ученых. Эти

исследования условно можно разделить на две группы:

- к первой группе можно отнести исследования, направленные на экономико-математическое моделирование, которое минимизирует затраты железных дорог на движение поездов по графику [1, 2, 3];

- к второй группе можно отнести исследования массы и скорости движения грузовых поездов с точки зрения максимального использования пропускной способности железнодорожного направления [4, 5].

Проблема массы и скорости движения поездов исследовалась зарубежными учеными [6, 7, 8]. В этих работах поставленная проблема решалась лишь для пассажирского движения.

Для расчетов и построения энергооптимального графика движения поездов учитываются только два параметра: масса поезда и скорость его движения без учета затрат электроэнергии на его продвижение. Вместе с тем известно [9, 10], что при увеличении массы поезда - уменьшаются удельные расходы на 1 тонну массы поезда брутто. В свою очередь повышение массы поезда ведет к снижению его технической скорости, что в свою очередь приводит к снижению пропускной способности железнодорожных направлений.

Целью данной работы является обоснование и разработка нового теоретического подхода к решению задачи организации движения поездов по энергооптимальному графику с учетом нескольких противоречащих друг другу факторов и разработка алгоритма ее решения в современных условиях.

Основной задачей исследования есть организация движения поездов по энергооптимальному графику с учетом количества поездов на фидерной зоне, продольного профиля пути и массы состава поезда, а также технической скорости следования.

Объектом исследования выступает движение поездов по графику с учетом продольного профиля.

## Изложение основного материала

Нормативный график движения поездов включает в себя режим движения поезда по перегонам, промежуточным раздельным пунктам между техническими станциями. Время нахождения поездов на участках зависит от большого количества факторов: продольного профиля пути, мощности поездных локомотивов, длины блок-участков и фидерных зон, расположения на участке станций и числа путей на них, длины станционных приемоотправочных путей, средств связи движения поездов, максимальной допустимой скорости, ограничения скорости и типа графика движения поездов. Ни одно аналитическое выражение не в состоянии учесть совместно все эти факторы. Поэтому для определения энергооптимального режима движения грузовых поездов по графику в исследованиях используем метод векторной оптимизации по трем основным параметрам:

- затратам электроэнергии, необходимой для движения поездов ( $F_1(x)$ );
- массы поезда ( $F_2(x)$ );
- скорости движения поезда по графику ( $F_3(x)$ ).

По результатам проведенных исследований выделены основные технико-технологические параметры, влияющие на движение грузового поезда по графику на рассматриваемом направлении. К параметрам первого порядка относятся параметры, определяющие технологию пропуска поездов по участкам: длина перегонов ( $S$ ); ходовая скорость ( $V_x$ ); техническое оснащение линии ( $M$ ); количество главных путей на направлении (однопутная или двухпутная линия); средства СЦБ и связи ( $C$ ) (полуавтоблокировка, автоблокировка, диспетчерская централизация).

Длина участка и ходовая скорость поезда дифференцированной массы определяют его время хода по перегонам. Время хода поездов дифференцированной массы по перегонам принимается по тяговым расчетам. При неизменных значениях параметров первого порядка скорость и время нахождения поезда дифференцированной массы на фидерном участке может значительно отличаться друг от друга.

В работе [10] указано, что с ростом плотности потока поездов интенсивность их движения, а, следовательно, и количество на фидерной зоне увеличивается до максимального значения. Дальнейшее увеличение плотности по-

тока поездов приводит к снижению скорости движения.

Дальнейшее увеличение плотности поездотока приводит к снижению участковой скорости и интенсивности. Таким образом, при определении времени нахождения поездов на участках необходимо учитывать влияние параметра второго порядка – коэффициента заполнения пропускной способности ( $K_{зап}^{пр}$ ), который характеризуется соотношением фактических размеров движения грузовых поездов к максимальному числу грузовых поездов, установленной массы и длины.

В качестве параметров третьего порядка выделены:

- тип графика ( $R$ );
- количества пассажирских поездов ( $N_{пас}$ ), которые обращаются по участкам.

Прогнозное время движения поездов различной массы на железнодорожном направлении в энергооптимальном режиме зависит от следующих факторов:

$$\sum_{k=1}^n t_{D_k}^{пор} = f(S; V_x; M; C; K_{зап}^{пр}; R; N_{пас}) \rightarrow \min \quad (1)$$

Рассматриваются три основные функции  $F_1(x)$ ,  $F_2(x)$  и  $F_3(x)$ , определенные на множестве  $X \subseteq E_1$ .

Относительно функции  $F_i(x)$ ,  $i = \overline{1,3}$  предполагаем, что они выпуклые, т.е. их надграфик выпуклое множество. Качественный характер этих функций представлен на рис. 1.

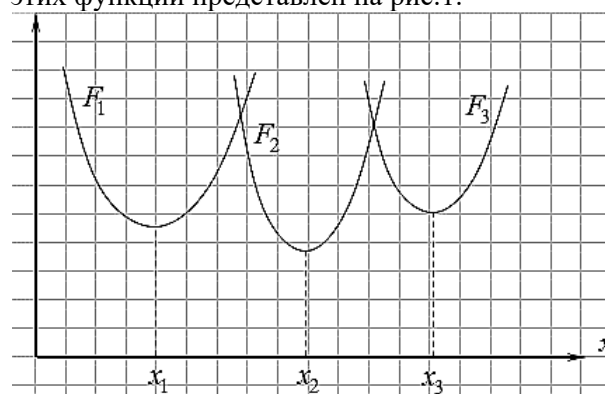


Рис. 1. Качественный характер функций  $F_1, F_2, F_3$

Не ограничивая общности рассмотрения считаем, что точки, в которых они достигают минимальное значение удовлетворяют условию:

$$0 < x_1 < x_2 < x_3$$

Область определения  $X$  представляет собой:

$$X = \{x : x \geq 0\}$$

Наложим еще одно ограничение на функцию  $F_i(x), i=1,3$ . Считаем, что они дифференцируемы и при каждом  $x \in X$  их производные ограничены, т.е.:

$$\frac{dF_i(x)}{dx} < \infty$$

При сделанных предположениях формальная запись задачи векторной оптимизации представляет собой:

$$\begin{pmatrix} F_1(x) \\ F_2(x) \\ F_3(x) \end{pmatrix} \rightarrow \min$$

при условии  $x \in X$ .

Определение 1. Множество  $X_* \subseteq X$  будем называть решением задачи (1) если это множество обладает следующими свойствами:

- а)  $\forall x \in X_*$  является эффективным;
- б)  $\forall x, y \in X_*$  между собой несравнимы.

Определение 2.  $x \in X$  является эффективным, если найдутся такие функции  $F_i(x)$  и  $F_j(x)$ , что любое изменение  $x$  приводит к увеличению одной из этих функций и уменьшение другой.

Определение 3. Два значения  $x$  и  $y$  из  $X$  будем называть несравнимыми, если найдутся две функции  $F_i(x)$  и  $F_j(x)$  такие, что имеет место

$$\begin{pmatrix} F_i(x) \leq F_j(x) \\ F_i(y) \geq F_j(y) \end{pmatrix} \text{ или } \begin{pmatrix} F_i(x) \geq F_j(x) \\ F_i(y) \leq F_j(y) \end{pmatrix}$$

причем хотя бы одно из неравенств является строгим.

Введенные определения поясним на примере, когда

$$F_1(x) = (x-1)^2; F_2(x) = (x-2)^2;$$

$$F_3(x) = (x-3)^2.$$

Для данного примера  $x_1 = 1; x_2 = 2; x_3 = 3$ .

Возьмем  $x=1,2$ , тогда увеличивая  $x$  получим, что  $F_1(x)$  возрастает, а  $F_2(x)$  убывает. Если  $x$  уменьшаем, то  $F_1(x)$  уменьшается, а  $F_2(x)$  возрастает, таким образом  $x=1,2$  является эффективным.

Естественно возникает вопрос о нахождении эффективных точек.

Лемма 1. Если  $x$  является эффективным для  $F_i(x)$  и  $F_j(x)$ , то с необходимостью имеет место:

$$\frac{dF_i}{dx} + t \frac{dF_j}{dx} = 0, t \geq 0. \quad (2)$$

Доказательство. Пусть  $x$  эффективное значение, тогда производные  $\frac{dF_i}{dx}$  и  $\frac{dF_j}{dx}$  разного знака тогда существует некоторое  $t \geq 0$ , что имеет место (2).

Для рассматриваемого примера

$$\frac{dF_1}{dx} = 2(x-1); \frac{dF_2}{dx} = 2(x-2),$$

а соотношение (2) принимает вид:

$$2(x-1) + t \cdot 2(x-2) = 0$$

откуда:

$$x = \frac{1+2t}{1+t}. \quad (3)$$

Положив  $t=0$  имеем  $x=1$ , а при возрастании  $t$  возрастает и  $x$  вычисляемое по (3) и при  $t \rightarrow \infty$  получаем  $x \rightarrow 2$ . То что  $x(t)$  возрастает с ростом  $t$  следует из того, что производная от  $x(t)$  по  $t$  равна

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{(1+t)^2}$$

Следовательно, множеств  $X_{12} = \{x : 1 \leq x \leq 2\}$  является эффективным.

Легко проверить, что множества  $X_{23} = \{x : 2 \leq x \leq 3\}$  и множество  $X_{13} = \{x : 1 \leq x \leq 3\}$  являются эффективными.

Объединяя все эти множества

$$X = X_{12} \cup X_{23} \cup X_{13} = \{x : 1 \leq x \leq 3\},$$

получаем, что  $X$  является множеством эффективных значений.

Заметим, что лемма 1 может быть усилена, когда функции  $F_k(x), k=1,3$  являются выпуклыми.

Покажем, что соотношение (2) является достаточным для выпуклых функций.

Так как функции выпуклые, то они дифференцируемы по Ф. Кларку [11].

Пусть при некотором  $t \geq 0$  имеет место (2), где производные вычислены по Ф. Кларку так как функции выпуклые.

Следовательно,  $\frac{dF_i}{dx}$  и  $\frac{dF_j}{dx}$  имеют разный знак.

Представим  $F_i$  и  $F_j$  при  $x + \Delta x$  в виде

$$F_i(x + \Delta x) = F_i(x) + \frac{dF_i}{dx} \cdot \Delta x + o(\Delta x);$$

$$F_j(x + \Delta x) = F_j(x) + \frac{dF_j}{dx} \cdot \Delta x + o(\Delta x).$$

Выбирая  $\Delta x$  так, чтобы

$$\text{sign}\left(\frac{dF_i}{dx} \Delta x + o(\Delta x)\right) = \text{sign}\left(\frac{dF_i}{dx} \Delta x\right);$$

$$\text{sign}\left(\frac{dF_j}{dx} \Delta x + o(\Delta x)\right) = \text{sign}\left(\frac{dF_j}{dx} \Delta x\right);$$

и учитывая, что

$$\text{sign}\left(\frac{dF_i}{dx} \Delta x\right) = -\text{sign}\left(\frac{dF_j}{dx} \Delta x\right);$$

получаем, что при любом  $\Delta x$  как положительном, так и отрицательном, одна из функций возрастает, а другая убывает. Что и доказывает достаточность (2) для определения эффективных значений  $x$  для выпуклых функций.

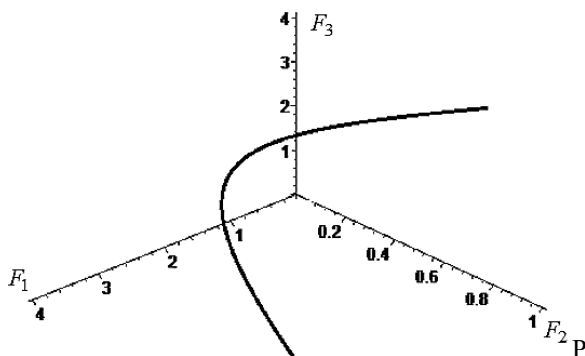
Определение 4. Два значения  $x$  и  $y$  принадлежащие  $X$  будем называть несравнимыми если  $F_i$  и  $F_j$  такие что имеет место:

$$\left( \begin{matrix} F_i(x) \leq F_i(y) \\ F_j(x) \geq F_j(y) \end{matrix} \right) \text{ или } \left( \begin{matrix} F_i(x) \geq F_i(y) \\ F_j(x) \leq F_j(y) \end{matrix} \right) \quad (4)$$

Причем среди неравенств имеет хотя бы одно строгое. В рассмотренном примере, а на этом же множестве только убывает.

Следовательно, множество состоит из эффективных точек и между собой несравнимых, поэтому множество является решением задачи векторной оптимизации по трем показателям для рассмотренного примера.

В пространстве функционалов множество представлено на рис. 2.



ис. 2. Решение задачи векторной оптимизации в пространстве функционалов

Затраты на механическую работу по перевозке груза в прямом и обратном направлениях составляют [12]:

$$C_k = 0,365LN_k \left[ \begin{matrix} P(w'_0 + i_k^{\text{ЭК}}) + \\ + Q_k(w''_k + i_k^{\text{ЭК}}) \end{matrix} \right] C''_{\text{ткм}} \quad (5)$$

где  $k=1$  – в прямом и  $k=2$  – в обратном направлении;

$L$  – длина звена, км;

$Q_k$  – масса груженого поезда брутто, т;

$P$  – масса локомотива, т;

$N_k$  – количество грузовых поездов данного направления;

$w'_0$  – сопротивление движению локомотива, Н/м;

$w''_k$  – сопротивление движению груженого вагона, Н/м;

$i_k^{\text{ЭК}}$  – эквивалентный уклон, ‰;

$C''_{\text{ткм}}$  – затраты электроэнергии на 1 ткм работы локомотива по преодолению основного сопротивления.

Затраты на механическую работу по перевозке порожних вагонов определяются аналогично:

$$C_{\text{пор}} = 0,365LC''_{\text{ткм}} \left[ \begin{matrix} P(w'_0 + i_k^{\text{ЭК}}) + \\ + Q_{\text{пор}}(w''_{\text{пор}} + i_k^{\text{ЭК}}) \end{matrix} \right] (N_1 - N_2) \quad (6)$$

где  $Q_{\text{пор}}$  – масса порожнего поезда, т;

$w''_{\text{пор}}$  – сопротивление движению порожнего вагона, Н/м.

Энергоэффективность графика движения грузовых поездов определяется затратами электроэнергии на движение поездов по графику установленной массы, затратами на остановки грузовых поездов под обгонами пассажирскими, собственные нужды локомотивов [13].

Затраты электроэнергии на движение поездов зависят от скорости их движения и массы [14].

Средняя масса поезда рассчитывается по формуле:

$$Q_{\text{бр}} = \frac{n_{\text{м.ср.}} \cdot m(q_T + p_{\text{нав}}^{\text{дин}} (1 - \alpha_{\text{пор}}))}{n_{\text{пог}} + n_{\text{дис}}} \quad (7)$$

где  $n_{\text{м.ср.}}$ ,  $n_{\text{пог}}$ ,  $n_{\text{дис}}$  – соответственно среднее количество поездов на участке, количество грузовых поездов на графике и диспетчерских ло-

комотивов в зависимости от парности поездо-  
потока.

$m$  – количество вагонов в составе поезда,  
ваг;

$q_T$  – средняя масса тары вагона,  $m$ ;

$p_{нав}^{дин}$  – динамическая нагрузка груженного  
вагона,  $m$ ;

$\alpha_{пор}$  – коэффициент порожнего пробега.

Суммарные затраты электроэнергии на  
участке рассчитываются по формуле:

$$A_{эл} = 2 \cdot 10^{-4} L_{нав} n_{м.ср.} m (q_T + p_{нав}^{дин} (1 - \alpha_{пор})) \cdot (e_{п} + e_{зуп} + e_{сл}) \lambda + N_{рез} L_{нав} e_{сл.рез.} \quad (8)$$

где  $L_{нав}$  – длина направления перевозки,  $км$ ;

$e_{п}$ ,  $e_{зуп}$ ,  $e_{сл}$  – удельные (на 1000 тонно-км  
брутто) затраты электроэнергии соответственно  
на перемещение поездов, разгон поездов после  
остановки и на собственные нужды электрово-  
зов,  $кВт-час$ ;

$\lambda$  – коэффициент учета «условных» затрат  
электроэнергии в контактной сети и на тяговых  
подстанциях;

$e_{сл.рез.}$  – удельные (на 1 км одиночного про-  
бега) затраты электроэнергии на перемещение  
локомотивов резервом,  $кВт-час$ .

Общие удельные (на 10000 тонно-км брутто)  
затрат электроэнергии рассчитываются по  
формуле:

$$a_{эл} = \frac{10000 A_{эл}}{2 L_{нав} n_{м.ср.} m (q_T + p_{нав}^{дин} (1 - \alpha_{пор}))} \quad (9)$$

Практически все удельные расходы  
( $e_{п}$ ,  $e_{зуп}$ ,  $e_{сл}$ ) в той или иной мере увеличива-  
ются с уменьшением  $Q_{бр}$ .

Экономико-математическая модель оптими-  
зации скорости движения грузовых поездов по  
критерию минимизации затрат на тягу поездов  
и затрат на собственные нужды локомотивов  
составляют:

$$C = C_{эл} + C_{лок} \Rightarrow \min \quad (10)$$

где  $C_{эл}$  – затраты, связанные с использованием  
электроэнергии на тягу поездов по железнодо-  
рожному направлению без остановок,  $грн$ ;

$C_{лок}$  – эксплуатационные затраты, отнесен-  
ные к использованию электроэнергии на соб-  
ственные нужды электровоза, отнесенные на  
все время нахождения грузового поезда на  
направлении движения поездов,  $грн$ .

Затраты, связанные с использованием элек-  
троэнергии при пропуске грузовых поездов по  
направлению рассчитываются по формуле:

$$C_{эл} = W \cdot e_{эл} = (W_{эл} + W_{вл} + W_{зуп}) \cdot e_{эл}, \quad (11)$$

где  $e_{эл}$  – стоимость  $кВт$  электроэнергии,  $грн$ ;

$W_{эл}$  – затраты электроэнергии на перемеще-  
ние грузового поезда в случае его движения по  
железнодорожному участку без остановок, ко-  
торые определяются с помощью программы  
«ГАС Railway»,  $кВт$ ;

$W_{вл}$  – затраты электроэнергии на собствен-  
ные нужды электровоза за все время нахожде-  
ния электровоза на железнодорожном направ-  
лении,  $кВт$ ;

$W_{зуп}$  – дополнительные затраты, связанные с  
остановками грузового поезда под обгонами  
пассажирскими,  $кВт$ .

Затраты электроэнергии на собственные  
нужды электровоза за время все время нахож-  
дения на железнодорожном направлении опре-  
деляются по формуле:

$$W_{вл} = \frac{(t_{ход}^{ван} + t_{ход1}^{ван})}{60} w_{вл}, \quad (12)$$

где  $t_{ход}^{ван}$  – время движения грузового поезда по  
железнодорожному направлению, без учета  
первого перегона,  $мин$ ;

$t_{ход1}^{ван}$  – время движения грузового поезда по  
первому перегону направления,  $мин$ ;

$w_{вл}$  – удельные затраты электроэнергии на  
собственные нужды локомотива,  $кВт-час$ .

Дополнительные затраты электроэнергии,  
связанные с остановками грузовых поездов под  
обгонами их пассажирскими определяют по  
формуле:

$$W_{зуп} = n_{обг} \cdot w_{зуп}, \quad (13)$$

где  $n_{обг}$  – количество обгонов пассажирскими  
поездами грузовых на всем железнодорожном  
направлении, определяется в соответствии с  
[15];

$w_{зуп}$  – усредненные дополнительные затраты  
электроэнергии,  $кВт$ .

Проведенными исследованиями установле-  
но, что затраты электроэнергии на тягу поездов  
зависят от характеристик продольного профиля  
пути и количества локомотивов задействован-  
ных в тяге поезда.

При критической массе поезда для одного локомотива расходы, связанные с тягой поездов, которые приходится на 1 тонну массы поезда уменьшаются при одновременном уменьшении скорости его движения, что в свою очередь приводит к опозданию поездов в соответствии с графиком движения.

В тоже время, уменьшение массы поезда в сравнении с нормативной, которая заложена в графике движения, расходы на 1 тонну массы поезда незначительно увеличиваются с одновременным увеличением скорости его движения.

Из приведенного выше следует, что решение задачи программой в среде Maple позволяет найти оптимальное решение затрат между затратами электроэнергии, необходимой для движения поездов, массой поезда брутто и скоростью его движения.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бакланов, А. А. Принципы выбора энергооптимальных скоростей движения и режима работы электровоза [Текст] / Доклады четвертой Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электроподвижного состава». – Новочеркасск: ОмГУПС, 2003. – С. 118 – 120.
2. Бакланов, А.А. Энергетический баланс движения для решения задач снижения расхода электроэнергии на тягу поездов [Текст] / А.А. Бакланов // Транспорт: наука, техника, управление / ВИНТИ. – 2005. – №6. – С. 32 – 35.
3. Полянин, Г.Е. Рекомендации по выбору оптимальных скоростей движения и весовых норм грузовых поездов на участке железной дороги [Текст] / Г.Е. Полянин // Повышение тягово-энергетической эффективности магистральных электровозов: Межвузовский тематический сборник научных трудов. – Омск: ОМИИТ. – 1989. – С. 28 – 34.
4. Малькевич, Н.А., Шкурин, М.И., Зеньчук, Н.Ф. Ресурсосберегающие технологии в поездной работе [Текст] / Н.А. Малькевич, М.И. Шкурин, Н.Ф. Зеньчук // Самарский ин-т инж. ж.-д. транспорта: Межвузовский сб. науч. Трудов. – 2001. – №21. – С. 340 – 344.
5. Кузнецов, В.Г, Калашников К.О. Розробка наукових принципів зменшення витрат електроенергії в тяговій мережі постійного струму шляхом регулювання транспортного потоку [Текст] / В.Г. Кузнецов, К.О. Калашников // Електрифікація транспорту: науковий журнал. – Д: ДНУЗТ.- 2014.- №8.-С.104 – 109.
6. Вебер, П.Ю. К вопросу определения скорости движения на железных дорогах Европы [Текст] /

#### Выводы

Авторами разработан новый теоретический подход к решению задачи организации движения поездов по энергооптимальному графику. В процессе моделирования движения поездов по участку установлено, что энергооптимальный график движения поездов может быть использован на участках, на которых заполнение пропускной способности составляет не более 70-75 %, что позволяет снизить техническую скорость заложенную в график движения поездов на 3-5 % с одновременным снижением массы поезда на 6-10 %. При определении количества поездов, которое одновременно может находиться на фидерной зоне, зависит от размеров движения поездов в грузовом и обратном направлениях.

Предложен новый метод решения может быть использован при разработке энергооптимального графика движения поездов на полигоне сети железных дорог.

#### REFERENCES

1. Baklanov, A. Guidelines on choosing energy-optimal speeds and modes of operation of electric [Text] / Report of the Fourth International Scientific Conference "Status and prospects of development of electric rolling stock." - Novocherkassk: OmGUPS, 2003. - pp. 118 – 120.
2. Baklanov, A. The energy balance of the movement to address the problem of reducing energy consumption for traction [Text] / A. Baklanov // Transport: science, technology, management / VINITI. - 2005. – No 6. - pp. 32 – 35.
3. Polyanin, G. Guidelines for selecting the optimum speeds and weight standards of freight trains on the railway [Text] / G. Polyanin // Improving the energy efficiency of the trailer electric locomotives: Interuniversity thematic collection of scientific papers. - Omsk: OMIIT. - 1989. - p. 28 – 34.
4. Malkevich, N, Shkurin, M, Zenchuk, N Resource-saving technologies in the train [Text] / N. Malkevich, M. Shkurin, N. Zenchuk // Samara Inst Ing. railroad Transportation: Intercollegiate Scientific. Proceedings. - 2001. – No 21. - pp. 340 – 344.
5. Kuznetsov, V, Kalashnikov K. Rozrobka NAUKOVO printsiyv zmenshennya vitrat elektroenergiï in tyagoviy MEREZH postynogo Strouma Shlyakhov reguluvannya traffic flows [Text] / V. Kuznetsov, K. Kalashnikov // Elektrifikatsiya Transport Naukova magazine. - D: DNUZT.- 2014.-No 8.-pp.104 - 109.
6. Weber, P. On the question of determining the speed of railways in Europe [Text] / P. Weber // Railways mira.-1983.- No 5.- pp. 2-5.
7. The optimal from an economic point of view, the maximum speed on the Australian Federal Rail-

© Папахов О. Ю. та ін., 2017

П.Ю. Вебер // Железные дороги мира.-1983.- №5.- С. 2-5.

7. Оптимальные с экономической точки зрения максимальные скорости на Австралийских федеральных железных дорогах [Текст]// Железнодорожный транспорт за рубежом: ЭИ/ ЦНИИТЭИ МПС.- 1995.- Сер. 1.- Вып. 5.- С. 5 – 19.

8. Оценка существующих нормативов ограничения скорости движения поездов (США) [Текст]// Управление, логистика и информатика на транспорте: ЭИ/ВИНИТИ.- 1999.- №15.

9. Кужель, А. Л. Роль графика движения поездов в рыночных условиях [Текст]/ А. Л. Кужель, И. Н. Шапкин, Е. М. Кожанов // Железнодорожный транспорт, – 2007. – № 7. – С. 33-36.

10. Папахов О. Ю. Обґрунтування руху поїздів на напрямках за погодженими розкладами [Текст] / О. Ю. Папахов, Н. О. Логвінова // Електрифікація транспорту. – Дніпропетровськ : ДНУЗТ, 2014. – Вип. 8. – С. 110-116.

11. Босов, А. А. Функции множества и их применение [Текст] / А.А. Босов – Днепродзержинск, Изд. дом «Андрей», 2007. – 182 с.

12. Хачиян, Д.Г. Сложность задач линейного программирования. [Текст] / Д.Г. Хачиян – М: Знание, 1987, 32 с.

13. Некрасевич В.И. Каким быть графику грузового движения [Текст] / В.И. Некрасевич, А.Ф. Бородин// Железнодорожный транспорт – 1992. – № 12. – С. 2–8.

14. Папахов, А. Ю. Использование метода функции множества при рациональной организации вагонопотоков [Текст] /А. Ю. Папахов // Транспортные системы и технологии перевозок. Сборник научных трудов Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна. – 2016. – 12. – С. 69 – 74.

15. Вернигора Р.В. Аналітичний розрахунок коефіцієнтів зйому вантажних поїздів пасажирськими в умовах швидкісного руху [Текст]/ Р.В. Вернигора, О.Ю. Папахов, Н.О. Логвінова//Східно-Європейський журнал передових технологій –2013. № 2/3 (62) - С. 51-55.

ways [Text] // Rail abroad: EI / TSNIITEI MPS.- 1995.- Ser. 1.- No. 5.- pp. 5 – 19.

8. Assessment of existing regulations limit the speed of trains (USA) [Text] // management, logistics and informatics in transport: EI / VINI-TI.- 1999.- №15.

9. Kuzhel, A. Role of train table in market conditions [Text]/ Kuzhel A, Shapkin, A, Ko-zhanov, E // /The Railway transport, – 2007. – № 7. – p. 33-36.

10. Papakhov, O. The ground of motion of trains on directions on the concerted time-table [Text] / Papakhov, O, Lohvinova, N. // The electrification of transport. – Dnipropetrovsk : DNURT, 2014. – № 8. – p. 110-116.

11. Bosov A. Set Functions and Their Applications [Text] / A. Bosov - Dnieper-Dzerzhinsk, Ed. house "Andrei", 2007. - 182 p.

12. Khachiyan, D. Complexity of linear programming problems. [Text] / D. Khachiyan - M: Knowledge, 1987, 32 p.

13. Nekrashevich V.I. What charts of freight motion [Text] / V.I. Nekrashevich, A.F. Borod-in// Railway transport – 1992. – № 12. – p. 2–8.

14. Papakhov, O. Using of method of function of great number for rational organization of wagon flows [Text] / Papakhov, O // Transport system and technologies of transportations. Col-lection of scientific works of the Dnipropetrovsk National University of railway Transport named after academitian V. Lazaryan. – 2016. – 12. – p. 69 – 74.

15. Vernigora R. Analytical calculation of coefficient of output of freight trains passenger in the conditions of speed motion [Text] /R. Vernigora, A. Papakhov, N. Lohvinova // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies-2013. N 2/3 (62) - pp. 51-55

Целью данной работы является обоснование и разработка нового теоретического подхода к решению задачи организации движения поездов по энергооптимальному графику с учетом нескольких противоречащих друг другу факторов и разработка алгоритма ее решения в современных условиях.

Основной задачей исследования есть организация движения поездов по энергооптимальному графику с учетом количества поездов на фидерной зоне, продольного профиля пути и массы состава поезда, а также технической скорости следования.

Объектом исследования выступает движение поездов по графику с учетом продольного профиля.

Предметом исследования есть определение оптимального количества поездов на фидерной зоне с учетом исполнения графика движения поездов, а также массы поезда и скорости его движения.

Методом исследования является теории тяги и функции множества.

Научная новизна заключается в решении задачи векторной оптимизации применительно к организации движения поездов по энергооптимальному графику с учетом эффективного соотношения массы и скорости, а также ограничением количества поездов на фидерной зоне. Получены необходимые условия решения задачи организации движения поездов по энергооптимальному графику с учетом нескольких параметров векторной оптимизации: массы и скорости движения поезда по энергооптимальному графику в современных условиях.

**Ключевые слова:** график движения; масса поезда; скорость; функции множества.

УДК 656.212

О. Ю. ПАПАХОВ<sup>1</sup>, Н. О. ЛОГВИНОВА<sup>2</sup>, Х. В. МАТВИЄНКО<sup>3</sup> (ДНУЗТ)

Кафедра «Управління експлуатаційною роботою», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна

<sup>1</sup>тел. + 38-067-524-43-22, e-mail: papahova0362@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2357-8158>

<sup>2</sup>тел. + 38-067-524-43-22, e-mail: logvinovanata1987@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9350-881X>

<sup>3</sup>тел. + 38-095-792-11-75, e-mail: dissertaciaz@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9054-7824>

## ВЕКТОРНА ОПТИМІЗАЦІЯ В УМОВАХ РУХУ ПОЇЗДІВ ЗА ГРАФІКОМ В ЕНЕРГООПТИМАЛЬНОМУ РЕЖИМІ

Метою даної роботи являється обґрунтування та розробка нового теоретичного підходу до вирішення задачі організації руху поїздів за енергооптимальним графіком з урахуванням декількох суперечливих один одному факторів і розробка алгоритму її вирішення у сучасних умовах.

Основною задачею дослідження є організація руху поїздів за енергооптимальним графіком з урахуванням кількості поїздів на фідерній зоні, повздовжнього профілю колії та маси складу поїзда, а також технічної швидкості слідування.

Об'єктом дослідження виступає рух поїздів за графіком з урахуванням повздовжнього профілю.

Предметом дослідження є визначення оптимальної кількості поїздів на фідерній зоні з урахуванням виконання графіка руху поїздів, а також маси поїзду і швидкості його руху.

Методом дослідження являється теорія тяги і функції множин.

Наукова новизна полягає у вирішенні задачі векторної оптимізації призначеної до організації руху поїздів за енергооптимальним графіком з урахуванням ефективного співвідношення маси і швидкості, а також обмеженні кількості поїздів на фідерній зоні. Отримані необхідні умови вирішення задачі організації руху поїздів за енергооптимальним графіком з урахуванням декількох параметрів векторної оптимізації: маси і швидкості руху поїзду за енергооптимальним графіком у сучасних умовах.

**Ключові слова:** графік руху; маса поїзда; швидкість; функції множин.

UDC 656.212

O. YU. PAPAHOV<sup>1</sup>, N. A. LOGVINOVA<sup>2</sup>, K. V. MATVIENKO<sup>3</sup> (DNURT)

Department "Management of operational work", Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan st. Lazaryan, 2, 49010, Dnipro, Ukraine

<sup>1</sup>Tel. + 38-067-524-43-22, e-mail: papahova0362@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2357-8158>

<sup>2</sup>Tel. + 38-067-524-43-22, e-mail: logvinovanata1987@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9350-881X>

<sup>3</sup>Tel + 38-095-792-11-75, e-mail: dissertaciaz@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9054-7824>

## VECTOR OPTIMIZATION IN THE CONDITIONS OF MOTION OF TRAINS ON CHART IN ENERGYOPTIMAL MODE

The purpose of work are a ground and development of the new theoretical going near the decision of task of organization of motion of trains on an energy optimal chart taking into account a few conflicting with each other of factors and development of algorithm of her decision in modern terms.

The basic task of research is organization of motion of trains on an energy optimal chart taking into account the amount of trains on a feeder zone, longitudinal profile of way and mass of composition of train, and also technical speed of the following.

Motion of trains comes forward a research object on a chart taking into account a longitudinal profile.

The article of research is determining the optimal amount of trains on a feeder zone taking into account execution of train table, and also mass of train and rate of his movement.

A research method is to the theory of traction and function of great number.

A scientific novelty consists in the decision of task of vectorial optimization as it applies to organization of motion of trains on an energy optimal chart taking into account effective correlation of mass and speed, and also by the limit of amount of trains on a feeder zone. The necessary terms of decision of task of organization of motion of trains are got on an energy optimal chart taking into account a few parameters of vectorial optimization: the masses and rates of movement of train on energy optimal chart in modern terms.

**Keywords:** chart of motion; mass of train; speed; functions of great number.

Received 11.10.2017; accepted in revised form 07.12.2017.