

Расчет эксплуатационных расходов в задачах оптимизации продольного профиля железнодорожных станций

БОБРОВСКИЙ В. И., к.т.н., доцент,

КОЗАЧЕНКО Д. Н., (ДГТУЖТ, г. Днепропетровск, Украина)

Представил д.т.н., профессор Е.М. Шафит

Постановлена задача оптимизации продольного профиля сортировочной горки.
Получены статистические модели для расчета эксплуатационных расходов

Одним из основных элементов, определяющих конструкцию железнодорожных станций, является продольный профиль. Оптимальный продольный профиль обеспечивает улучшение условий работы станции, повышение ее пропускной и перерабатывающей способности, сокращение времени выполнения отдельных операций и в целом расходов на эксплуатацию станций.

В настоящее время оптимизация продольного профиля железнодорожных станций практически не выполняется, а проектные решения принимаются на основании опыта проектировщика. Нормы проектирования устанавливают лишь допустимые пределы изменения уклонов отдельных элементов станции [1]. В этой связи была поставлена задача разработки методики оптимизации продольного профиля железнодорожных станций.

Продольный профиль станции $I = (i_1, i_2, \dots, i_n)$ может быть представлен точкой в n -мерном пространстве уклонов отдельных ее элементов. Задача оптимизации продольного профиля состоит в выборе вектора I^* , удовлетворяющего всем ограничениям и минимизирующего приведенные расходы

$$\Pi = KE_n + \Xi \rightarrow \min, \quad (1)$$

где K - капитальные вложения;

Ξ - годовые эксплуатационные расходы;

E_n - нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений.

В данной работе рассматриваются вопросы построения математической модели, позволяющей установить взаимосвязь эксплуатационных расходов с продольным профилем станции для решения задачи оптимизации (1).

Анализ станционных процессов показывает, что продольный профиль влияет на энергетические расхо-

ды, связанные с поездными (прием, отправление, пропуск поездов) и маневровыми (перестановка составов, надвиг на горку и др.) передвижениями, на продолжительность выполнения этих операций, а также операций по закреплению подвижного состава на станционных путях. Кроме того, продольный профиль оказывает косвенное влияние на простои составов в ожидании выполнения технологических операций и на объем дополнительной сортировки вагонов, которая возрастает при увеличении времени выезда составов из сортировочного парка. Таким образом, в общем виде эксплуатационные расходы при некотором продольном профиле могут быть представлены как

$$\Xi = 0,365 \left(\sum_{i=1}^n N_i (C_{ni} + C_{mi} + C_{ti}) + C_{dc} \right), \quad (2)$$

где N_i - суточное число поездов i -й категории; n - число категорий поездов, обрабатываемых на станции; C_{ni} - энергетические расходы на перемещение поезда; C_{mi} - энергетические расходы на перемещение состава при маневровой работе; C_{ti} - расходы, связанные со временем нахождения поезда на станции; C_{dc} - расходы, связанные с дополнительной сортировкой вагонов (все виды расходов выражаются в гривнях).

Энергетические расходы на перемещение поезда определяются по формуле [2]:

$$C_n = R_n e_{R_n} + R_{co} e_{R_{co}} + R_t e_{R_t} + G e_G$$

где R_n - механическая работа локомотива (тыс. ткм); R_{co} - работа сил сопротивления (тыс. ткм); R_t - работа сил торможения (тыс. ткм); G - расход дизельного топлива (т) или электроэнергии (тыс. кВт·ч на тягу); e_{R_n} , $e_{R_{co}}$, e_{R_t} - единичные нормы расходов, относимых на

механическую работу локомотивов, сил сопротивления и торможения (грн/тыс. ткм); e_G -расходы (грн на 1т дизельного топлива или тыс. кВт·ч электроэнергии), включающие стоимость топлива или электроэнергии и затраты на экипировку.

Энергетические расходы на маневровую работу C_m определяются аналогично.

Расходы, связанные со временем нахождения поездов на станции, определяются как

$$C_i = t_c C_c + t_n (C_c + C_n), \quad (3)$$

где $C_c = m e_{nh} 10^{-3}$ – расходы на один составо·ч (грн); $C_n = G' e_G + e_{mh} + e_{mn}$ – расходы на один локомотиво·ч (грн); t_c – время нахождения состава на станции; t_n – время нахождения поезда на станции; m – состав поезда; G' – расход топлива (электроэнергии) за час на служебные нужды локомотива (т или тыс. кВт·ч); e_{nh} , e_{mh} , e_{mn} – единичные нормы расходов, относимых соответственно на 1000 вагоно·ч (бригадо·ч и локомотиво·ч).

Величины t_c и t_n включают в себя время выполнения технологических операций и простоев в их ожидании. Так, например, для системы отправления в состав t_c входит время на окончание формирования, перестановку составов, установку тормозных башмаков, технический и коммерческий осмотр, прицепку локомотива; в состав t_n входит время на уборку тормозных башмаков, пробу автотормозов и отправление поезда со станции.

Расходы C_{dc} пропорциональны объему дополнительной сортировки вагонов $m_{доп}$, возникающей вследствие задержек освобождения сортировочных путей после окончания накопления составов

$$C_{dc} = m_{доп} \cdot e_c, \quad (4)$$

где e_c – расходная ставка на сортировку одного вагона.

Таким образом, для расчета эксплуатационных расходов Э (2) необходима модель, позволяющая определять расходы топлива (электроэнергии) и работу всех сил для поездных и маневровых передвижений, а также учет времени выполнения отдельных операций и простоев в их ожидании в зависимости от продольного профиля станции.

Ввиду сложности станционных процессов получить математическую модель Э(1) в аналитическом виде не представляется возможным. Поэтому для определения эксплуатационных расходов может использоваться имитационная модель станции, которая позволяет учесть ее техническое оснащение, технологию и объемы работы. Однако с помощью имитационной модели могут быть получены только частные решения,

соответствующие фиксированным наборам параметров станции. Это обстоятельство затрудняет использование имитационной модели в эффективных оптимизационных алгоритмах, требующих непрерывности и дифференцируемости поверхности отклика. Данная проблема может быть преодолена при использовании ее для решения задачи оптимизации статистических моделей, полученных на основании экспериментов с имитационной моделью. С этой целью предварительно должна быть решена задача идентификации, которая включает следующие этапы:

- анализ технологии работы станции и определение перечня элементарных операций, выполняемых с поездами и составами;
- получение частных статистических моделей для определения продолжительности отдельных операций и расходов, связанных с их выполнением.
- построение имитационной модели работы станции в целом, использующей частные статистические модели;
- постановка факторных экспериментов с имитационной моделью станции и расчет коэффициентов статистической модели Э(1).

Ниже излагается методика получения частных статистических моделей поездных и маневровых передвижений, позволяющих определять расходы на передвижения C_n и C_m , а также их продолжительности t_n и t_m . В качестве моделей используются уравнения регрессии в форме полиномов второй степени

$$y(a, x) = a_0 + a_1 x_1 + \dots + a_n x_n + a_{n+1} x_1^2 + \dots + a_{2n} x_n^2 + a_{2n+1} x_1 x_2 + \dots + a_k x_{n-1} x_n,$$

где $a_0 \dots a_k$ – коэффициенты регрессии, которые определяются с помощью методов планирования экспериментов.

Процесс получения модели поездных передвижений рассмотрим на примере отправления поездов со станции. Схема участка отправления поездов со станции показана на рис.1.

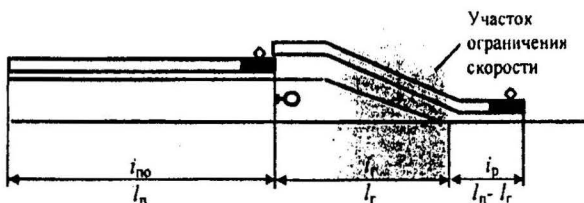


Рисунок 1 - Схема маршрута отправления поезда

В качестве откликов \hat{y} выбраны эксплуатацион-

ные расходы на отправление поезда C_n и время освоения пути t_0 , в качестве факторов - уклоны парка отправления $i_{по}(x_1)$, выходной горловины $i_r(x_2)$ и участка разгона $i_p(x_3)$, а также состав поезда $m(x_4)$. Другие факторы (тип локомотива, план участка и т. д.) принимаются фиксированными и устанавливаются в зависимости от конкретных условий.

Для идентификации модели поставлена серия экспериментов с использованием ортогонального центрального композиционного плана (план Бокса), плоская интерпретация которого изображена на рис.2. В качестве ядра плана использован полный факторный план 24.

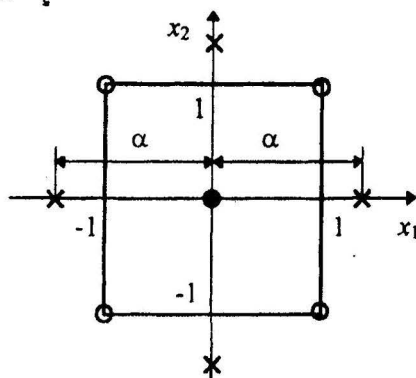


Рисунок 2 - Ортогональный центральный композиционный план второго порядка для $n=2$

Уровни варьирования факторов представлены в табл.1.

Для получения значений функций отклика C_n и t_0 в отдельных точках плана используется имитационная модель движения поездов, в которой режимы их движения выбираются в соответствии с показаниями станционных сигналов с учетом ограничений скорости в горловинах станции [3].

Таблица 1 - Факторы и уровни их варьирования для построения модели отправления поездов

Факторы	$x_1 = -1.414$ звездная точка	$x_1 = -1$ нижний уровень	$x_1 = 0$ основной уровень	$x_1 = 1$ верхний уровень	$x_1 = 1.414$ звездная точка
$x_1 (i_{по})$	-1.414	-1	0	1	1.414
$x_2 (i_r)$	-1.414	-1	0	1	1.414
$x_3 (i_p)$	-5.656	-4	0	4	5.656
$x_4 (m)$	48	50	55	60	62

Оценки регрессионных коэффициентов определяются по формулам [4]:

$$a_i = \begin{cases} c_1 \sum_{j=1}^N x_i^j \tilde{y}^j, i = 1, \dots, n; \\ c_2 \sum_{j=1}^N [(x_{i-n}^j)^2 - \beta] \tilde{y}^j, i = n+1, \dots, 2n; \\ c_3 \sum_{j=1}^N x_\mu^j x_\lambda^j \tilde{y}^j, \mu, \lambda = 1, \dots, n, \mu \neq \lambda, i = 2n+1, \dots, k; \end{cases} \quad (5)$$

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y^j - \beta \sum_{i=1}^n a_{n+i}.$$

где \tilde{y}^j - значение функции отклика в j -й точке; c - элементы дисперсионной матрицы; N - общее число точек в плане.

В результате статистической обработки данных эксперимента получены следующие модели для расчета расходов на отправление поезда C_n и времени отправления t_0 :

$$C_n = 21 + x_1 + 1.7x_2 + 1.1x_3 + 2.2x_4 - 0.5x_1^2 - 0.4x_2^2 + 0.8x_4^2 - 0.3x_1x_2 - x_2x_3 + 0.3x_2x_4;$$

$$t_0 = 2.08 + 0.06x_1 + 0.2x_4.$$

Аналогичным образом могут быть получены модели для других поездных передвижений по станции.

Статистические модели для маневровой работы получают с помощью имитационного моделирования движения маневровых составов. При этом следует заметить, что для моделирования маневровых передвижений имитационная модель движения поездов [3] не вполне приемлема. В этой связи была разработана специальная имитационная модель, в которой учтены особенности эксплуатации маневровых локомотивов и значения сил, действующих при выполнении маневровой работы. В частности, известно, что большую часть маневрового полурейса локомотив движется в неустановившемся режиме (разгон, замедление) с относительно невысокой скоростью. Торможение маневрового состава, как правило, осуществляется только локомотивом (без включения тормозов вагонов), вследствие чего длительность этого режима составляет значительную часть продолжительности всего полурейса. В этой связи моделирование торможения должно осуществляться с учетом изменения тормозного коэффициента по мере заполнения тормозных цилиндров локомотива [5]. Необходимо учесть также особенности расчета сопротивлений движению при низких скоростях. В настоящее время эти вопросы изучены недостаточно и поэтому в модели использована методика, рекомендованная в ПТР [6] для поездной работы. Для учета сопротивления стрелок и кривых в горловинах станции действительный профиль необходимо заменить приведенным.

Для иллюстрации рассмотрим методику получения

модели маневровых передвижений на примере перестановки составов из сортировочного в парк отправления. При перестановке разгон осуществляется на путях сортировочного парка и вытяжках формирования, а на пути парка отправления выполняется торможение. Схема маршрута перестановки приведена на рис. 3.

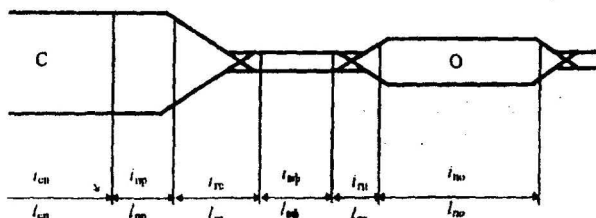


Рисунок 3 - Схема маршрута перестановки составов из сортировочного в парк отправления

В качестве откликов \hat{y} выбраны эксплуатационные расходы C_m и время $t_{пер}$ на перестановку составов, в качестве факторов - противоуклон хвоста сортировочного парка $i_{пр}$ (x_1), уклон вытяжки формирования $i_{вф}$ (x_3), уклоны горловин парков $i_{гс}$, $i_{гп}$ (x_2 , x_4), уклон отправочного парка $i_{по}$ (x_5) и масса маневрового состава Q (x_6). Для идентификации модели поставлена серия экспериментов по плану Бокса с ядром 26-2. Уровни варьирования факторов представлены в табл. 2.

Таблица 2 - Факторы и уровни их варьирования для построения модели перестановки составов.

Факторы	$x_1 = -1.722$ звездная точка	$x_1 = -1$ нижний уровень	$x_1 = 0$ ос- новной уровень	$x_1 = 1$ верх- ний уровень	$x_1 = 1.722$ звездная точка
$x_1 (i_{пр})$	0.511	0.8	1.2	1.6	1.889
$x_2 (i_{гс})$	0.278	1	2	3	3.722
$x_3 (i_{вф})$	-1.722	-1	0	1	1.722
$x_4 (i_{гп})$	-1.722	-1	0	1	1.722
$x_5 (i_{по})$	-1.722	-1	0	1	1.722
$x_6 (Q)$	1967	2400	3000	3600	4033

В результате получены следующие модели:

$$C_m = 15.1 + 0.4x_2 + 0.4x_3 + 0.2x_4 + 0.1x_5 + 0.9x_6 - 0.1x_1^2 - 0.1x_2^2 - 0.1x_3^2 - 0.1x_4^2 - 0.1x_5^2 - 0.8x_6^2;$$

$$t_{пер} = 8 + 0.12x_2 + 0.08x_3 - 0.25x_5 + 0.47x_6 - 0.07x_1^2 - 0.06x_2^2 - 0.06x_3^2 - 0.07x_4^2 - 0.45x_6^2 - 0.05x_5x_6.$$

Продолжительности установки и уборки тормозных башмаков ($t_{уст}$, $t_{уб}$), которые входят в состав t_c и t_n (3) и необходимы в имитационной модели станции, могут быть установлены аналитически в соответствии

с технологией работы и продолжительностью отдельных операций. Например, на ст. Нижнеднепровск-Узел применяется следующая технология: башмаки лежат вдоль путей; сигналист, двигаясь вдоль пути в глубину парка, укладывает или убирает башмаки, затем возвращается в голову и докладывает ДСП. При подобной технологии время установки и уборки башмаков определяется как:

$$t_{уст} = n_6 \left(4l_a \left(\frac{1}{v_1} + \frac{3}{v_0} \right) + t_{вз} + t_{ук} \right) + t_d; \quad (6)$$

$$t_{уб} = n_6 \left(\frac{l_b}{v_0} + t_y \right) + t_d, \quad (7)$$

где l_a - длина вагона, м; v_1 , v_0 - скорость прохода сигналиста соответственно с одним башмаком и без башмаков, м/с; $t_{вз}$, $t_{ук}$, t_y - время, необходимое соответственно для взятия, укладки и уборки одного башмака, с; t_d - время на доклад ДСП, с;

Количество тормозных башмаков n_6 для закрепления подвижного состава зависит от уклона парка $i_{по}$ и определяется в соответствии с инструкцией [7]

$$n_6 = \frac{n_{ос} (4|i_{по}| + 1)}{200}, \quad (8)$$

где $n_{ос}$ - число осей в составе.

Полученные таким образом частные модели используются при построении имитационной модели работы станции [8] для расчета продолжительности выполнения отдельных операций и определения энергетических расходов, связанных с перемещением поездов и маневровых составов. В имитационной модели станция рассматривается как многоканальная многофазная система массового обслуживания, входящими потоками которой являются поступающие в обработку поезда и составы, а обслуживающими устройствами - технические средства станции (маневровые локомотивы, бригады ПТО и др.). В результате функционирования этой модели определяются межоперационные простои, которые зависят от продолжительности выполнения отдельных операций и, следовательно, от продольного профиля станции, а также от общего времени нахождения составов t_c и поездов t_n на станции. Моделирование процесса накопления позволяет определять число вагонов, направляемых на отсевные пути $m_{доп}$, которое необходимо для расчета расходов $C_{дс}$, связанных с дополнительной сортировкой (4).

Методика построения модели Э(И) аналогична рассмотренной выше методике получения частных моделей. Так, при моделировании работы системы отпра-

ления в качестве функции отклика выбраны годовые эксплуатационные расходы \mathcal{E} , в качестве факторов - противоуклон хвоста сортировочного парка $i_{\text{пр}}(x_1)$, уклон вытяжного пути $i_{\text{вф}}(x_3)$, уклоны горловин парков $i_{\text{гс}}, i_{\text{гп}}, i_{\text{г}}(x_2, x_4, x_6)$, уклон парка отправления $i_{\text{по}}(x_5)$ и участка разгона $i_{\text{р}}(x_7)$ (рис. 2, рис. 3).

Так как при определении продолжительности операций по закреплению подвижного состава используется абсолютное значение уклона $i_{\text{по}}(8)$, то зависимость времени установки $t_{\text{уст}}$ и уборки $t_{\text{уб}}$ тормозных башмаков от уклонов продольного профиля является негладкой (рис.4).

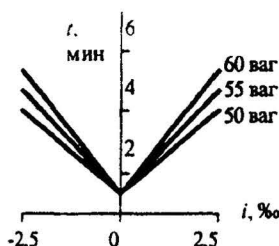


Рисунок 4 - Зависимость времени установки тормозных башмаков от уклона парка

В этой связи и эксплуатационные расходы $\mathcal{E}(I)$, которые зависят в том числе от $t_{\text{уст}}$ и $t_{\text{уб}}$, также представляются негладкой функцией вида:

$$\mathcal{E}(I) = \begin{cases} \mathcal{E}_1(I), & \text{при } i_{\text{по}} \geq 0; \\ \mathcal{E}_2(I), & \text{при } i_{\text{по}} < 0. \end{cases}$$

Для идентификации модели выполнена серия экспериментов по плану Бокса с ядром 2^{7-1} . Уровни варьирования факторов для $i_{\text{по}} \geq 0$ указаны в табл.3.

Таблица 3 - Факторы и уровни их варьирования для построения модели $\mathcal{E}(I)$ при $i_{\text{по}} \geq 0$

Факторы	$x_1 = -1.885$ звездная точка	$x_1 = -1$ нижний уровень	$x_1 = 0$ основной уровень	$x_1 = 1$ верхний уровень	$x_1 = 1.885$ звездная точка
$x_1 (i_{\text{пр}})$	0.6345	0.90	1.20	1.50	1.7655
$x_2 (i_{\text{гс}})$	0.1150	1.00	2.00	3.00	3.8850
$x_3 (i_{\text{вф}})$	-1.8850	-1.00	0.00	1.00	1.8850
$x_4 (i_{\text{гп}})$	-1.8850	-1.00	0.00	1.00	1.8850
$x_5 (i_{\text{по}})$	0.3075	0.75	1.25	1.75	2.1925
$x_6 (i_{\text{г}})$	-1.8850	-1.00	0.00	1.00	1.8850
$x_7 (i_{\text{р}})$	-7.5400	-400	0.00	4.00	7.5400

При $i_{\text{по}} < 0$ варьирование фактора x_5 выполняется в области отрицательных значений.

Так как процесс обработки составов и поездов в системе носит случайный характер, в каждой точке

плана ставится серия параллельных опытов, что позволяет определить значимость коэффициентов и адекватность модели.

Расчет оценок регрессионных коэффициентов выполняем по формулам (5). Оценка значимости коэффициентов выполнена по t -критерию Стьюдента. Доверительный интервал при $i_{\text{по}} \geq 0$ для линейных коэффициентов составляет 4.503, для коэффициентов второго порядка - 5.399, для эффектов взаимодействия - 7.123; при $i_{\text{по}} < 0$ соответственно - 5.254; 6.299 и 8.410.

Таким образом, модель эксплуатационных расходов для системы отправления имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_1 &= 1784.19 + 10.03x_2 + 5.69x_3 - 12.67x_4 + 23.92x_5 + 10.11x_6 + \\ &+ 8.05x_7 - 5.53x_4^2 - 7.29x_6x_7, \quad i_{\text{по}} \geq 0, \\ \mathcal{E}_2 &= 1796.04 + 9.90x_2 + 7.76x_3 - 7.9x_4 - 38.03x_5 + \\ &+ 15.61x_6 + 8.051x_7 - 6.561x_4^2, \quad i_{\text{по}} < 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Для проверки гипотезы об адекватности модели используется критерий Фишера:

$$F = \frac{S_D / \varphi_1}{S_e / \varphi_2}$$

Здесь $S_D = \sum_{j=1}^N (\bar{y}^j - \hat{y}^j)^2$ - сумма квадратов,

характеризующая неадекватность (дефект) модели с числом степеней свободы $\varphi_1 = N - (k+1)$;

$S_e = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^v (\tilde{y}^{jk} - \hat{y}^j)^2$ - сумма квадратов, характери-

зующая разброс результатов параллельных опытов, с числом степеней свободы $\varphi_2 = N(v-1)$; v - число параллельных опытов в каждой точке; \bar{y}^j - среднее значение по экспериментам в j -й точке; \tilde{y}^{jk} - результат g -го эксперимента в j -й точке; \hat{y}^j - результат, рассчитанный по модели для j -й точки.

Для модели системы отправления получены значения $F = 0.15$ (при $i_{\text{по}} \geq 0$) и $F = 0.18$ (при $i_{\text{по}} < 0$) при критическом значении $F_{\text{кр}} = 1.7$, из чего следует, что модели адекватны. Полученная модель $\mathcal{E}(I)$ (9) может быть использована для оптимизации продольного профиля системы отправления рассматриваемой сортировочной станции.

Таким образом, разработанная методика позволяет получать адекватные модели зависимостей эксплуатационных расходов от уклонов продольного профиля железнодорожных станций, пригодные для использования в оптимизационных алгоритмах. Указанная методика может быть использована также для решения

других задач проектирования железнодорожных станций.

Литература

1. *Проектирование железнодорожных станций и узлов: Справочное и методическое руководство*// Под ред. А.М. Козлова, К. Г. Гусевой. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Транспорт, 1980. - 592 с.
2. *Методические указания по сравнению вариантов проектных решений железнодорожных линий, узлов и станций.* -М.: ВПТИТРАНССТРОЙ, 1988. 468 с.
3. *Бобровский В.И.* Имитационная модель развязки линий в железнодорожном узле // 36. наукових праць ХарДАЗТ. - Харків. - 1999. - Вип. 38. - С.35-42.
4. *Хартман и др.* Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. - М.: Мир, 1977. - 552с.
5. *Гребенюк П.Т. и др.* Тяговые расчеты: Справочник. - М: Транспорт, 1987. - 271с.
6. *Правила тяговых расчетов для поездной работы.* - М.: Транспорт, 1985. - 287с.
7. *Інструкція з руху поїздів і маневрової роботи на залізницях України.* - К.: Транспорт України, 1995. - 506с.
8. *Бобровский В.И., Козаченко Д.Н.* Информационные технологии в проектировании железнодорожных станций и узлов // Залізничний транспорт України. - 1999. -№6(15). - С. 6-10.

Поступила 2.03.2000