

УДК 656.223

Д-р техн. наук, проф. П. А. КОЗЛОВ, канд. техн. наук, проф. С. П. ВАКУЛЕНКО

Модель оптимального графика оборота поездных локомотивов

Аннотация. Предлагается модель расчета оптимальных режимов работы поездных локомотивов при обслуживании поездопотока. Впервые проблема формулируется в виде модели строгой оптимизации — динамической транспортной задачи. В функционале ставится задача минимизации суммарных расходов, связанных с работой локомотивов, и ущербов от задержки поездов.

В настоящее время применяются разнообразные эвристические процедуры, не позволяющие найти оптимальный вариант из-за огромной многовариантности.

Основой для построения модели являлась динамическая транспортная задача. При решении она сводится к статической методом разложения во времени. Модель позволяет рассчитать маршруты следования каждого локомотива с учетом характера поездопотока, расположения поездов на начало расчета и заданного графика движения. Критерием оптимальности может быть минимум суммарных затрат на использование локомотивов и на задержки поездов.

В результатах отражается характер полного и полезного использования локомотивов, динамика движения поездов и возникшие задержки. При этом можно увидеть режим работы каждого локомотива и график движения каждого поезда.

Для расчета выбран реальный участок обращения от станции Дружинино до станции Вековка, включающий девять станций, размеры движения приняты близкими к реальным. В действительности на участке работает 180 локомотивов. Были проведены различные эксперименты. Определено минимальное число локомотивов, при котором не возникает задержек из-за них, — 195.

Модель выдает ряд результатов, характеризующих процесс движения поездов. Выдается график работы каждого локомотива, движение каждого поезда и усредненные результаты об использовании локомотивов и задержках поездов. Можно рассчитать оптимальное число локомотивов и наилучшее их расположение на начало периода расчета по выбранному критерию.

Для отображения захода локомотивов в депо предлагается многоэтапная процедура решения динамической транспортной задачи. Для проверки реализуемости полученного оптимального варианта строится дополнительно имитационная модель, которая может учесть многие не поддающиеся формализации факторы. Принципы работы двухуровневой модели рассмотрены авторами в предыдущих публикациях.

Модель может быть использована как оптимизирующий блок в локомотивном АСУ и для расчета оптимальных режимов оборота, и в оперативном управлении. Автоматизированное управление работой локомотивов на всех участках сети может принести значительный технологический и экономический эффект.

Ключевые слова: модель; локомотив; поездопоток; оптимизация; режим работы

1. Проблема. На закрепленном участке обращения в грузовом движении работают сотни локомотивов. Вариантов движения каждого локомотива много. Можно

себе представить, как велико будет множество возможных вариантов организации обеспечения поездопотока локомотивами в целом. Так что основная проблема оптимизации — преодоление многовариантности. О полном переборе вариантов не может быть и речи. Поэтому усилия ученых были направлены в основном на совершенствование эвристических процедур для построения рационального варианта. Проблеме эффективного обеспечения поездопотока локомотивами посвящено большое число работ. Рассматривались вопросы организации работы локомотивов и бригад [6, 8, 9], определения необходимого резерва локомотивов для устойчивой работы полигона [5, 7, 11], автоматизации процесса управления локомотивным парком [4]. И конечно, затрагивались задачи собственно оптимизации [1, 5, 10]. Следует отметить как наиболее обстоятельное исследование диссертацию [1].

О строгом оптимуме во всех этих исследованиях речь не идет, ибо нужна специальная динамическая оптимизационная модель.

Трудность задачи состоит в том, что статические модели линейного программирования здесь не подходят. Процесс существенно динамический. Поэтому в качестве исходной модели была выбрана *динамическая транспортная задача с задержками* [2]. Для решения динамическая задача сводится к статической транспортной задаче линейного программирования *методом разложения во времени* [3]. Основная трудность здесь — огромный размер получающихся матриц, так что выбор решателя — задача также непростая.

2. Содержательная постановка задачи. Содержательная постановка согласовывалась с профессионалами, непосредственно занимающимися этой проблемой. Создаваемая модель является замкнутой с точки зрения наличия тяговых ресурсов в течение всего периода моделирования. Моделирование осуществляется исходя из наличия, состояния и дислокации локомотивов по объектам (станциям и участкам) на конец сформированных «нулевых» («пустых») суток, и в течение моделирования общее число локомотивов не изменяется. Меняется их расположение по станциям, появляются станции с избытком локомотивов и соответственно с их недостатком.

Требуется организовать грамотную передислокацию локомотивов резервом со станции образовавшегося их избытка в пункт дефицита. В реальных условиях наличие, состояние и дислокация локомотивов

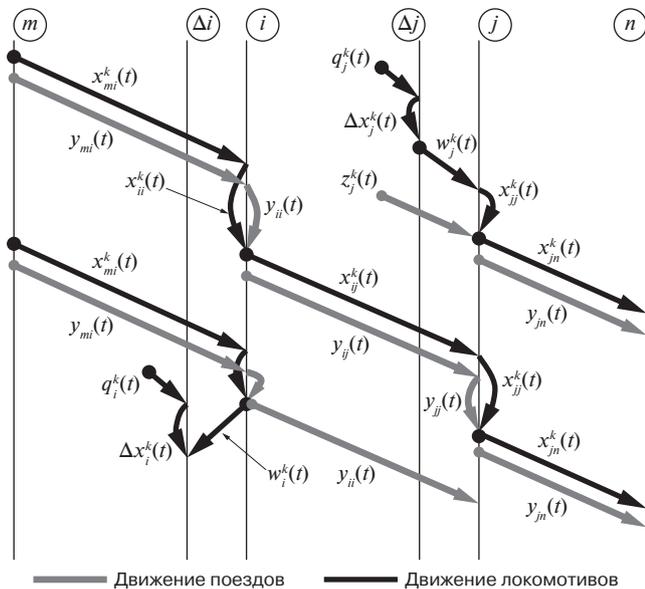


Рис. 1. Схема сведения динамической задачи к статической методом размножения во времени: обозначения приводятся ниже в балансных уравнениях

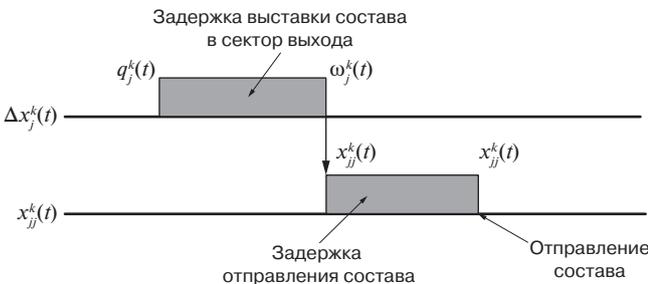


Рис. 2. Схема передачи состава в сектор выхода станции

по объектам принимаются из системы оперативного контроля дислокации локомотивов (ОКДЛ) на начало планируемого периода.

Поэтапным введением дополнительных локомотивов можно определить их минимально необходимое количество (M_{mn}) для обеспечения поездопотока. Затем для оперативных условий модель должна позволять оценить экономически обоснованную (оптимальную) потребность в локомотивах ($M_{оп}$), величина которой меньше M_{mn} , но при этом допускаются простои составов в ожидании их отправления из-за отсутствия локомотивов. Целевая функция имеет вид

$$E = 24T_m M e_d + \sum M l_p e_p + \sum N t_{ож} e_c \quad (1)$$

при $t_{ож} \leq t_{ож.д}$,

где T_m — период моделирования, сут; M — число локомотивов, находящихся в системе; $\sum M l_p$ — суммарные за период моделирования резервные пробеги локомотивов; $\sum N t_{ож}$ — суммарные простои составов поездов в ожидании отправления из-за отсутствия локомотивов за период моделирования; e_d — стои-

мость 1 локомотиво-ч, руб.; e_p — стоимость 1 локомотиво-км резервного пробега, руб.; e_c — стоимость 1 составо-ч, руб.; $t_{ож}$ — время ожидания составом локомотива; $t_{ож.д}$ — допустимое время ожидания составом локомотива.

3. Формальная постановка задачи. Динамическая транспортная задача формулируется в виде функционала оптимизации и балансных уравнений (ограничений) в динамике. В функционале ставится задача минимизации суммарных расходов, связанных с работой локомотивов, и ущербов от задержки поездов.

Схема размноженной сети с потоками приведена на рис. 1.

На рис. 1 схематически изображена станция (ij) с прилегающими участками (mi, jn). На станции вводятся понятия сектора входа и сектора выхода. Это довольно абстрактные понятия для модели строгой оптимизации. В сектор входа приходит локомотив с перерегона, из сектора выхода он может отправляться с составом или без него.

3.1. Отображение процесса выставки состава в секцию выхода. Уравнение для отображения количества ожидающих выставки в сектор выхода составов для потока k

$$\Delta x_j^k(t+1) = \Delta x_j^k(t) + q_j^k(t) - w_j^k(t). \quad (2)$$

В содержательном смысле — это выставка составов из зоны ожидания в зону отправления (рис. 2). Если выставка невозможна, то накопление составов отображается переменной $\Delta x_j^k(t)$. Здесь $\Delta x_j^k(t)$ — количество составов, готовых к выставке в сектор выхода; $q_j^k(t)$ — фиксатор времени подачи состава в сектор выхода. Задается согласно расписанию отправления. Прибавляет (+1) к значению $\Delta x_j^k(t)$; $w_j^k(t)$ — фиксатор выставки состава в сектор выхода. Отнимает (–1) от значения $\Delta x_j^k(t)$. Фиксатор используется в формуле баланса составов в секторе выхода станции.

Отображение захода локомотивов в депо.

Для отображения замены локомотивов под составами задача решается в несколько этапов.

Этап 1. Обеспечение поездопотока локомотивами, как если бы они не заходили в депо. Решается задача ДТЗЗ-Л, описанная выше.

Этап 2. Специальная подпрограмма определяет точки замены локомотивов под составами (рис. 3).

Этап 3. Строится новая ДТЗЗ, где потоками являются только движение локомотивов из точек замены в депо и из депо к точкам замены. На этом этапе решается задача выбора оптимальных маршрутов движения локомотивов с учетом возможностей депо и бесперебойного обеспечения поездопотока. Если локомотивов не хватает, ДТЗЗ укажет точки возможного срыва.

3.2. Подсчет времени опоздания прибытия поездов. Уравнение для отображения количества опаздывающих поездов

$$\Delta x_i^k(t+1) = \Delta x_i^k(t) + q_i^k(t) - w_i^k(t), \quad (3)$$

где $\Delta x_i^k(t)$ — количество опаздывающих поездов, (+1) означает, что поезд опаздывает на 1 такт, (0) — что опоздания нет; $q_i^k(t)$ — фиксатор времени прибытия поезда по расписанию. Заносит (+1) на значение переменной $\Delta x_i^k(t)$; $w_i^k(t)$ — фиксатор факта прибытия поезда.

3.3. *Баланс составов в секторе входа станции.* Уравнение для фиксации количества составов в секторе входа станции

$$x_{ii}^k(t+1) = x_{ii}^k(t) - x_{ij}^k(t) - w_i^k(t) + x_{mi}^k(t - t_{mi}^k), \quad (4)$$

где $x_{ii}^k(t)$ — остаток составов в секторе входа; $x_{ij}^k(t)$ — число составов, переведенных из сектора входа i в сектор выхода j на такте t . Состав переходит из сектора входа в сектор выхода станции, используя эту переменную; $w_i^k(t)$ — фиксатор фактического прибытия поезда в сектор входа. Эта переменная используется также в подсчете времени опоздания поезда; $x_{mi}^k(t - t_{mi}^k)$ — число составов, прибывающих с участка mi на такте t ; t_{mi}^k — время движения по участку mi , выраженное в тактах.

3.4. *Баланс составов в секторе выхода станции.* Уравнение для отображения количества составов в секторе выхода станции

$$x_{jj}^k(t+1) = x_{ij}^k(t) + w_j^k(t) + x_{ij}^k(t - t_{ij}) - x_{jn}^k(t), \quad (5)$$

где $x_{jj}^k(t)$ — остаток составов в секторе выхода пассажирской станции; $w_j^k(t)$ — фиксатор появления состава в секторе выхода пассажирской станции при передаче с технической; $x_{ij}^k(t - t_{ij})$ — число составов, переданных из сектора входа в сектор выхода; t_{ij} — время передачи поезда из сектора входа в сектор выхода станции в тактах; $x_{jn}^k(t)$ — поток поездов на участке jn .

3.5. *Баланс локомотивов в секторе входа.* Динамика количества локомотивов в секторе входа станции

$$y_{ii}(t+1) = y_{ii}(t) - y_{ij}(t) + \sum_m y_{mi}(t - t_{mi}). \quad (6)$$

Локомотив может менять направление движения, поэтому в формуле используются переменные всех примыкающих участков. Здесь: $y_{ii}(t)$ — остаток локомотивов в секторе входа станции; $y_{ij}(t)$ — число локомотивов, переданных из сектора входа в сектор выхода станции; $\sum_m y_{mi}(t - t_{mi})$ — число локомотивов, прибывших с примыкающих участков; t_{mi} — время прохождения локомотивом участка mi в тактах.

3.6. *Баланс локомотивов в секторе выхода.* Динамика количества локомотивов в секторе выхода станции

$$y_{jj}(t+1) = y_{ij}(t) + y_{ij}(t - t_{ij}) - \sum_n y_{jn}(t) + z_j(t), \quad (7)$$

где $y_{jj}(t)$ — остаток локомотивов в секторе выхода; $y_{ij}(t - t_{ij})$ — число локомотивов, переданных из сектора входа в сектор выхода; t_{ij} — время передачи локомотива из сектора входа в сектор выхода; $\sum_n y_{jn}(t)$ — чис-

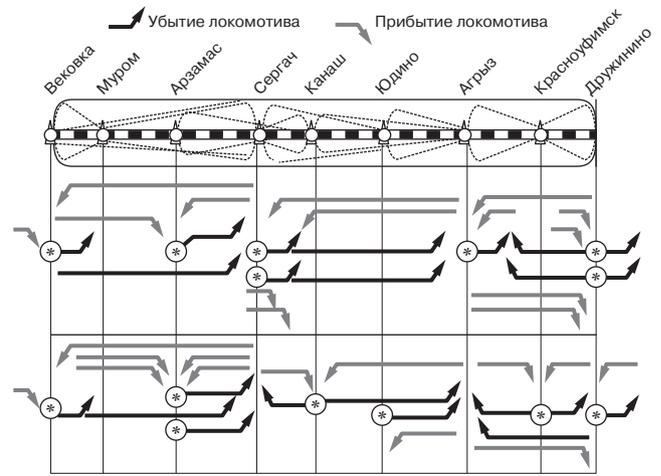


Рис. 3. Схема замены локомотивов

ло отправленных локомотивов на примыкающие участки; $z_j(t)$ — фиксатор подачи локомотива в сектор выхода станции из резерва.

3.7. *Ограничения для потоков на участке:*

$$\sum_k x_{mi}^k(t) \leq y_{mi}(t) \text{ — ограничение, не допускающее}$$

движения состава по участку без локомотива;

$y_{mi}(t) \leq d_{mi}$ — ограничение по пропускной способности потока локомотивов на участке; d_{mi} — пропускная способность участка.

3.8. *Функционал минимизации*

$$\begin{aligned} & Tc_l \sum_j \sum_t z_j(t) + M \sum_i \sum_t y_{ii}(t) + M_n \sum_i \sum_k \Delta x_i^k(T-1) + \\ & + c_h \sum_i \sum_k \sum_t x_{ii}^k(t) + c_h \sum_j \sum_k \sum_t x_{jj}^k(t) + \\ & + (c_h + 1) \sum_j \sum_k \sum_t \Delta x_j^k(t) + c_d \sum_i \sum_k \sum_t \Delta x_i^k(t) + \\ & + c_{lr} \left(\sum_m \sum_i \sum_t s_{mi} \left(y_{mi}(t) - \sum_k x_{mi}^k(t) \right) \right) \rightarrow \min, \quad (8) \end{aligned}$$

где T — расчетный период в тактах; M — большая величина (штраф); c_l — стоимость одного локомотиво-такта в работе; M_n — штраф за неприбытие поезда (большое число); c_h — стоимость одного поездо-такта; c_d — стоимость одного такта задержки (опоздания прибытия); s_{mi} — длина участка в километрах; c_{lr} — стоимость локомотиво-километра резервного пробега; $t = 0, 1, 2, \dots, T$.

4. *Выдаваемые результаты.* В результатах отражается характер полного и полезного использования локомотивов, динамика движения поездов и возникшие задержки. При этом можно увидеть режим работы каждого локомотива и график движения каждого поезда.

Для расчета выбран реальный участок обращения от станции Дружинино до станции Вековка, включающий девять станций, размеры движения приняты близкими к реальным. В действительности на участке работает 180 локомотивов. Были проведены различные эксперименты.

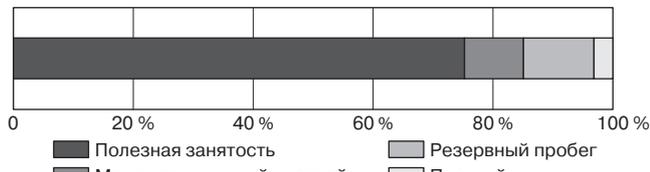


Рис. 4. Полное и полезное использование локомотивов: межоперационный простой — это простой локомотива с составом из-за недостатка пропускной способности участка; простой — простой локомотива на станции без состава

Задержки поездов по направлениям

Станция назначения	Расчетное время (ч:мин)	Среднее время (ч:мин)
Муром (24000)	01:31	01:31
Арзамас II (24420)	04:16	04:20
Юдино (25490)	13:52	14:03
Агрыз (25890)	21:42	22:00
Дружинино (78250)	32:07	32:19

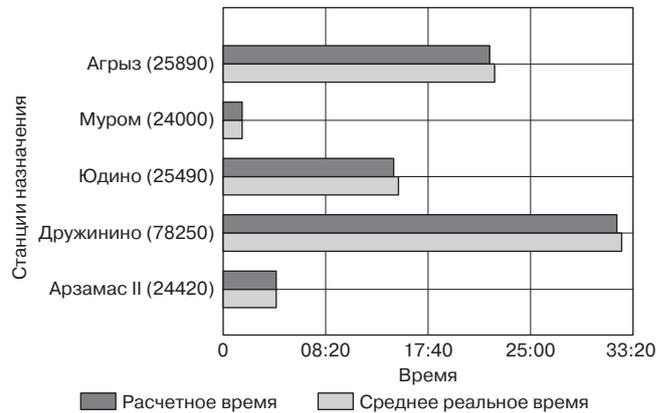


Рис. 5. Задержки поездов, отправленных со станции Вековка: расчетное время — по графику движения без задержек, среднее реальное время — с задержками из-за локомотивов

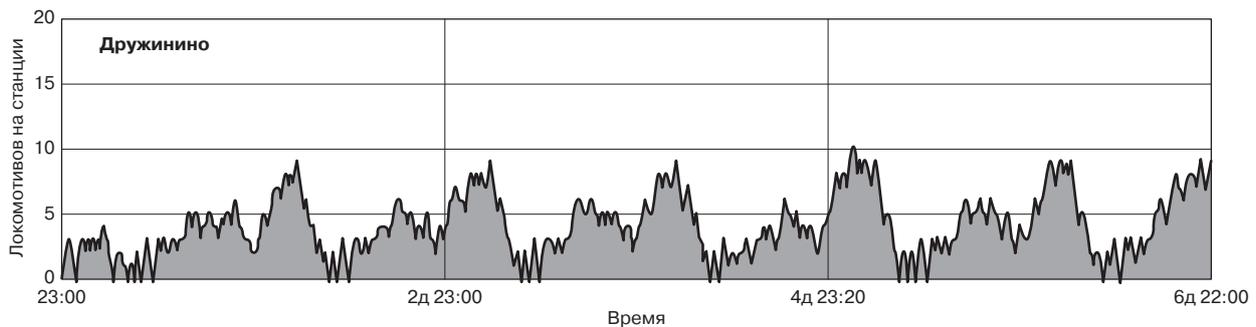


Рис. 6. Наличие локомотивов на конечной станции полигона

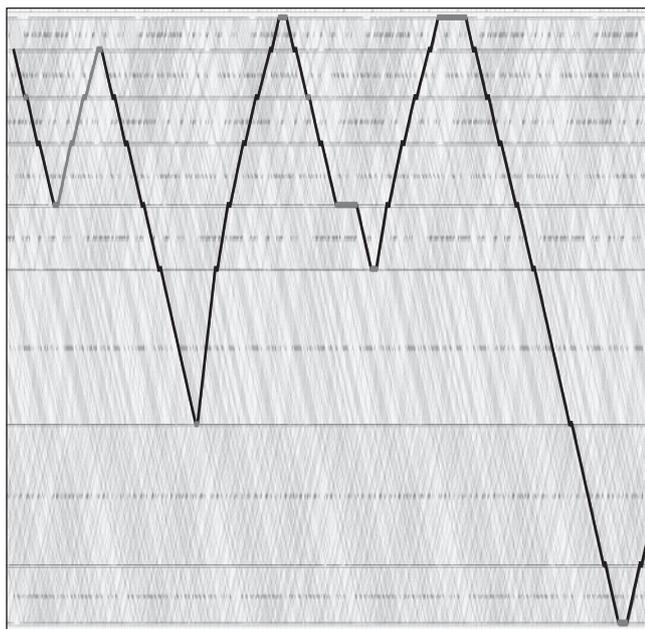


Рис. 7. График работы локомотива

Для пропуска потока без задержек требуется 195 локомотивов (при наилучшем начальном расположении). Уменьшение числа локомотивов со 180 до 175 приводит к незначительному увеличению задержек. Ниже приводятся некоторые результаты расчета со 175 локомотивами. Период расчета 7 суток. Средняя занятость локомотивов составила 98% модельного времени, которое распределяется следующим образом (рис. 4).

Выдается информация о числе проведенных поездов локомотивами. Маршруты могут быть короткими, и поездов можно провести больше.

Можно увидеть, какие задержки в поездопотоке возникали на разных направлениях (рис. 5, таблица).

Выдается и динамика нахождения локомотивов на каждой станции (рис. 6).

Модель выдает режим работы каждого локомотива (рис. 7), а также график движения каждого поезда.

Эксперименты с различным числом локомотивов позволяют сравнить полученные результаты, в том числе зависимость средних задержек поездов именно из-за локомотивов (рис. 8).

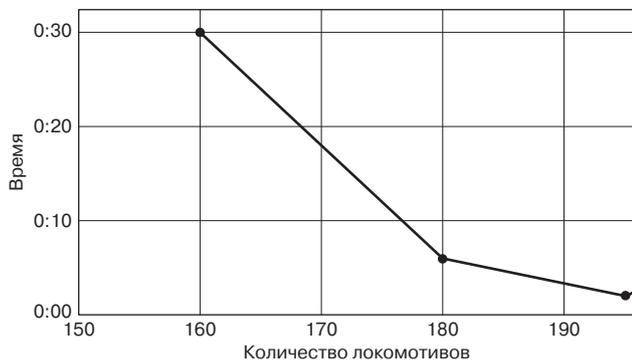


Рис. 8. Задержки поездов на направлении Дружинино — Вековка

Модель может рекомендовать наилучшее расположение локомотивов по станциям на начало расчета (рис. 9) (суммы не совпадают, так как при выдаче результатов отсекаются сутки с переходными периодами).

Можно рассчитать оптимальное число локомотивов по выбранному критерию, например по минимуму суммарных затрат на использование локомотивов и задержки поездов (рис. 10). Естественно, характер ломаной кривой будет зависеть от стоимостных параметров.

Модель можно использовать в двух вариантах — для разработки рациональной технологии работы локомотивов на участке при той или иной структуре поездопотока и для оптимального управления оборотом локомотивов в оперативных условиях. Для последнего оптимизирующий блок необходимо подключить к информационным системам. При внедрении необходимо строить дополнительно имитационную модель участка обращения, которая проверяет реализуемость оптимального варианта с учетом многих трудно формализуемых факторов. Принципы работы двухуровневых моделей рассмотрены в [12].

Автоматизированное управление работой локомотивов на всех участках сети может принести значительный технологический и экономический эффект.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Некрашевич В. И. Система управления эксплуатацией локомотивов: дис... д-ра техн. наук. М.: ВНИИЖТ, 1988. 588 с.
2. Козлов П. А., Миловидов С. П. Оптимизация структуры транспортных потоков в динамике при приоритете потребителей // Экономика и математические методы. 1982. Т. XVIII. Вып. 3. С. 521–531.
3. Козлов П. А. Теоретические основы, организационные формы, методы оптимизации гибкой технологии транспортного обслуживания заводов черной металлургии: дис... д-ра техн. наук. Липецк: ЛПИ, 1986. 377 с.
4. Максимов Д. В. Автоматизация составления графика оборота локомотивов // Труды ВНИИЖТ, вып. 633. М.: Транспорт, 1980. С. 86–96.
5. Быкадоров В. А., Потапов П. Р. Оптимизация локомотивного парка и оперативного регулирования его с учетом создания резерва локомотивов на станциях участка обращения // Труды ВНИИЖТ, вып. 192/5. М.: Транспорт, 1978. С. 62–76.
6. Некрашевич В. И. Оперативное регулирование локомотивным парком // Железнодорожный транспорт. 1981. № 5. С. 53–56.

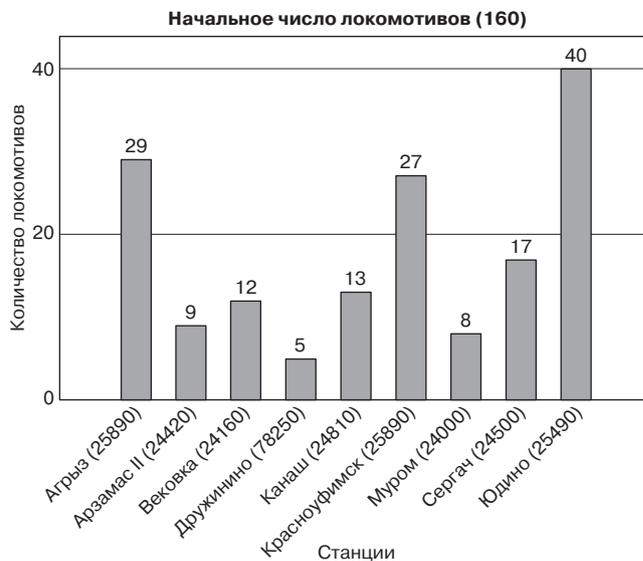


Рис. 9. Оптимальное расположение локомотивов по станциям на начало расчета

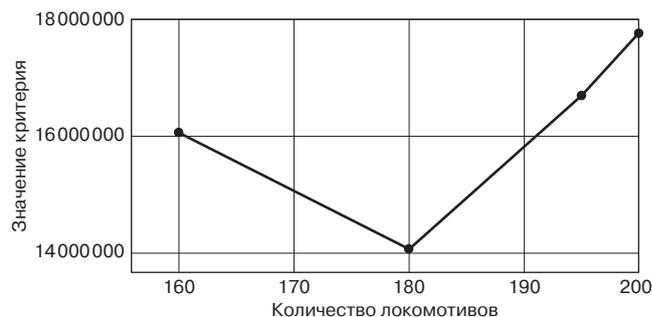


Рис. 10. Зависимость суммарных затрат от числа локомотивов

7. Потапов П. Р., Быкадоров А. В. Распределение резерва поездных локомотивов между станциями их смены и перецепки // Сб. научн. тр. МИИТа. 1978. Вып. 593. С. 39–0.
8. Тишкин Е. М. Организация работы локомотивов и их бригад // Электрическая и тепловозная тяга. 1965. № 7. С. 25–27.
9. Булер Дж. Календарное планирование использования локомотивов // Железные дороги мира. 1981. № 8. С. 40–43.
10. Potthoff G. Der optimale Lokomotiveinsatz. // Deutsche Eisenbahntechnik, 1966. Nr. 10. S. 4–7.
11. Feubner A. Die Zentrale Triebfahrzeug disposition. // Die Bundesbahn, 1979, Heft 9. S. 677–684.
12. Козлов П. А., Мишарин А. С. Двухуровневая модель управления грузопотоками // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2002. № 5. С. 25–34.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОЗЛОВ Петр Алексеевич, президент, научно-производственный холдинг «СТРАТЕГ». 109029, Москва, ул. Нижегородская, д. 32, стр. 15. Тел.: (985) 969-77-04. E-mail: Laureat_k@mail.ru

ВАКУЛЕНКО Сергей Петрович, директор Института управления информационных технологий в МГУПСе. 127055, Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9. Тел.: (499) 972-34-19. E-mail: Vakulenko@miit.ru

Simulation Model to Optimize Turnover Schedule for Train Locomotives

Petr A. Kozlov, Dr. of Technical Science, Professor, President of Research & Production Holding STRATEG. Building 15, 32 Nizhegorodskaya St., 109029 Moscow, Russian Federation. Tel.: +7 (985) 9697704. E-mail: Laureat_k@mail.ru ✉

Sergey P. Vakulenko, Candidate of Technical Science, Professor, Director of Institute for Management and Information Technologies at Moscow State University of Railway Engineering (MIIT). Building 9, 9 Obratsov str., 127994 Moscow, Russian Federation. Tel.: +7 (499) 9723419. E-mail: Vakulenko@miit.ru

Abstract. This work relates to a suggested simulation model to optimize turnover schedule for train locomotives operating in train flow service. It is first time the problem was formulated as a strict optimization model — a dynamic transportation problem. On the functional level, the main goal was to minimize overall costs which are directly related to locomotives operation and to losses due to train delays.

At present the problem has been solved through various heuristic procedures, which fail to find the optimum alternative due to a huge amount of multivariate solutions.

The dynamic traffic problem was taken as a starting point for simulation model development. In the process of calculations the dynamic problem is reduced to the static one by use of time multiplication method. The model helps to calculate routes for each locomotive with due account for train flow pattern, location of trains at the start of calculations, and specified traffic schedule. The lowest total costs of locomotives use and losses for train delays can be taken as a criterion of optimality.

The output reflects the complete nature of productive locomotive operations, train operation dynamics and resultant delays. Additionally, each locomotive's operation mode and each train's timetable can be seen.

For calculation tests there was selected an existing main line section between stations Druzhinino and Vekovka including 9 stations; traffic data were chosen close to reality. Actually, the above sub-division employs 180 locomotives. Various experiments were held. The minimum number of locomotives necessary to secure faultless operation (195 units) was calculated.

The model generates different results, which characterize train operations. Output includes a schedule for each locomotive, timetable for each train, average operating results for locomotives, and train delays data. For a selected criterion the model suggests calculations of an optimal number of locomotives and their best locations at the start of calculations.

In order to register depot orders to locomotives, a multistage procedure for solving dynamic transportation problems was proposed. In order to check the feasibility of generated results, another imitational model was built which may reconsider many of non-definable factors. Operating principles for a two-level model were reviewed by the authors in their earlier publications.

The model can be used as an optimizing unit in the Locomotive Computer-Assisted Management System — in sphere of day-to-day management and for calculating the optimum turnover modes. Automated management of locomotive fleet operations throughout the railway network will deliver significant technological and economical effects.

Keywords: model locomotive; traffic flow of trains; optimization; operation mode

References

1. Nekrashevich V.I. *Sistema upravleniya ekspluatatsiyey lokomotivov*. Dokt. tekhn. nauk diss. [The control system of locomotive operation. Dr. tech. sci. diss.]. Moscow, Railway Research Institute Publ., 1988. 588 p.
2. Kozlov P.A., Milovidov S.P. *Optimizatsiya struktury transportnykh potokov v dinamike pri prioritete potrebiteley* [Optimization of the structure of traffic flows in the dynamics at customer priorities]. *Ekonomika i matematicheskie metody*, 1982, vol. 18, no. 3, pp. 521–531.
3. Kozlov P.A. *Teoreticheskie osnovy, organizatsionnye formy, metody optimizatsii gibkoy tekhnologii transportnogo obsluzhivaniya zavodov chernoy metallurgii*. Dokt. tekhn. nauk diss. [Theoretical bases, organizational forms, methods of optimization of flexible technology of transport service of ferrous metallurgy plants. Dr. tech. sci. diss.]. Lipetsk, LPI Publ., 1986. 377 p.
4. Maksimov D.V. *Avtomatizatsiya sostavleniya grafika oborota lokomotivov* [Automating the scheduling of locomotives turnover]. *Trudy VNIIZhT* [Proc. Railway Res. Inst.], 1980, no. 633, 1980, pp. 86–96.
5. Bykadorov V.A., Potapov P.R. *Optimizatsiya lokomotivnogo parka i operativnogo regulirovaniya ego s uchetom sozdaniya rezerva lokomotivov na stantsiyakh uchastka obrashcheniya* [Optimization of the locomotive fleet and its operational control considering a provision of locomotives at the railway line sections]. *Trudy VNIIZhT* [Proceedings of the Railway Research Institute], 1978, no. 192/5, pp. 62–76.
6. Nekrashevich V.I. *Operativnoe regulirovanie lokomotivnym parkom* [Operational management of locomotive fleet]. *Zheleznodorozhnyy transport*, 1981, no. 5, pp. 53–56.
7. Potapov P.R., Bykadorov A.V. *Raspredelenie rezerva poezdnykh lokomotivov mezhdu stantsiyami ikh smeny i peretsepki* [Distribution of train locomotives reserve between the stations of their replacement and re-coupling]. *Sb. nauch. tr. Moskovskiy inst. inzhenerov zheleznodor. transp.* [Proc. Moscow State Univ. of Railway Eng.], 1978, no. 593, pp. 39–40.
8. Tishkin E.M. *Organizatsiya raboty lokomotivov i ikh brigad* [Organization of the work of locomotives and their crews]. *Elektricheskaya i teplovoznaya tyaga*, 1965, no. 7, pp. 25–27.
9. Buler J. *Kalendarnoe planirovanie ispol'zovaniya lokomotivov* [Calendar planning of locomotives use]. *Zheleznyye dorogi mira*, 1981, no. 8, pp. 40–43.
10. Potthoff G. *Der optimale Lokomotiveinsatz* [The optimal locomotive use]. *Deutsche Eisenbahntechnik*, 1966, no. 10, pp. 4–7.
11. Feubner A. *Die Zentrale Triebfahrzeug disposition* [The central car drive disposition]. *Die Bundesbahn*, 1979, no. 9, pp. 677–684.
12. Kozlov P.A., Misharin A.S. *Dvukhurovnevaya model' upravleniya gruzopotokami* [The two-level model of cargo management]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2002, no. 5, pp. 25–34.