

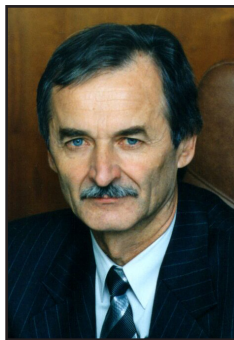


# Оптимизация оборота локомотивов с помощью системы «Лабиринт»



Сергей ВАКУЛЕНКО  
Sergey P. VAKULENKO

Пётр КОЗЛОВ  
Petr A. KOZLOV



*Вакуленко Сергей Петрович – кандидат технических наук, профессор Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.*

*Козлов Пётр Алексеевич – доктор технических наук, профессор, лауреат Государственной премии РФ, президент научно-производственного холдинга СТРАТЕГ (Современные транспортные технологии государства), Москва, Россия.*

## Optimization of Locomotives' Turnover with a «Labyrinth» System

(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 100)

**Проблема рационального использования локомотивов является довольно острой. Здесь нужно найти наилучший компромисс. При избыточном числе локомотивов меньше задержки поездов, но большие локомотивные затраты. При недостаточном – наоборот. Предлагается модель расчёта оптимальных режимов оборота поездных локомотивов при обслуживании поездопотока. Модель содействует дальнейшему развитию динамической транспортной задачи. Выдаются параметры движения поездов и использования локомотивов, строятся графики работы каждого из них. Дается оценка влияния числа локомотивов на мобильность поездов.**

Ключевые слова: железная дорога, локомотив, поездопоток, модель, оптимизация, транспортная задача.

**Р**ассчитать оптимальное число локомотивов при заданных стоимостных параметрах крайне трудно. Обычно расчёты сопровождаются ручными графиками оборота на весьма ограниченный период. Но если рассматривать полигон с несколькими сотнями локомотивов и период в несколько суток, то вариантов оборота локомотивов будет огромное множество. Нужна оптимизационная модель.

Здесь описывается система оптимизации оборота локомотивов «Лабиринт». Базой для построения модели служила динамическая транспортная задача [1]. При своем решении эта задача сводится к статической методом размножения во времени [2]. Проблема уже обсуждалась авторами в печати [3, 4]. Материал этой статьи представляет собой дальнейшее развитие предлагаемого подхода. Описываемая ранее модель превратилась в систему оптимизации оборота локомотивов, которая может стать оптимизирующим блоком в соответствующих АСУ.

## МОДЕЛЬНЫЕ СЕКТОРА

Схема станции представляется в модели в виде трех частей – сектора входа (ин-

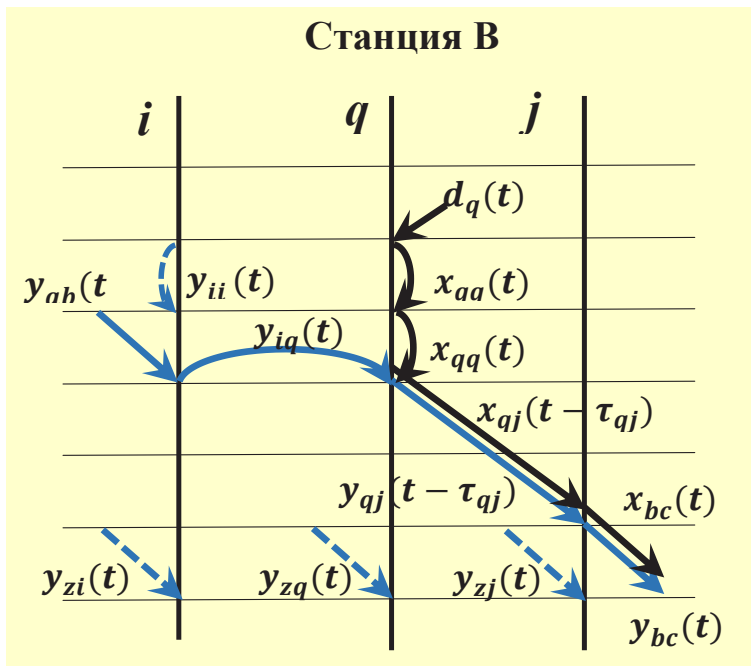


Рис. 1. Схема соединения локомотива с составом:  $i$  – сектор входа,  $j$  – сектор выхода,  $q$  – пункт зарождения составов.

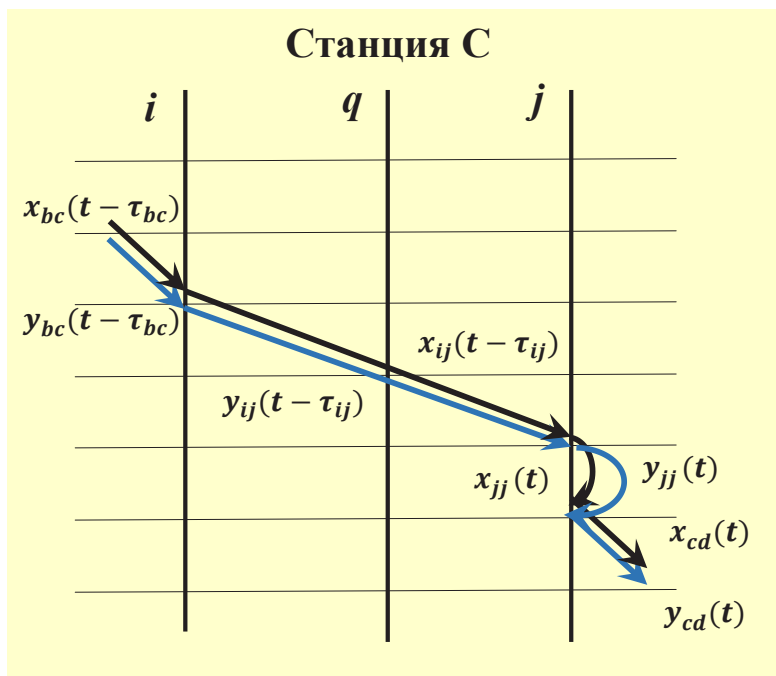


Рис. 2. Схема проследования поезда транзитом.

декс  $i$ ), сектора выхода (индекс  $j$ ) и пункта зарождения составов (индекс  $q$ ).

В сектор входа прибывают поезда (составы с локомотивами) или локомотивы резервом. Из сектора выхода отправляются поезда (локомотивы с составами) или локомотивы резервом. В пункте зарождения составы появляются в соответствии с расписанием отправления поездов. Соединение локомотива с составом происходит в этом же пункте. На рис. 1 показан процесс

соединения локомотива с составом. Локомотив прибыл в данном случае резервом с предыдущей станции (переменная  $y_{ab}(t - \tau_{ab})$ ). Затем локомотив переходит в пункт  $q$ . Если здесь имеется состав (переменная  $x_{qq}(t) \neq 0$ ), то локомотив соединяется с составом, образуя новый поезд. Поезд переходит в сектор отправления – переменные  $y_{qj}(t - \tau_{qj})$  и  $x_{qj}(t - \tau_{qj})$  – может затем отправиться на следующую станцию (переменные  $y_{bc}(t)$  и  $x_{bc}(t)$ ).



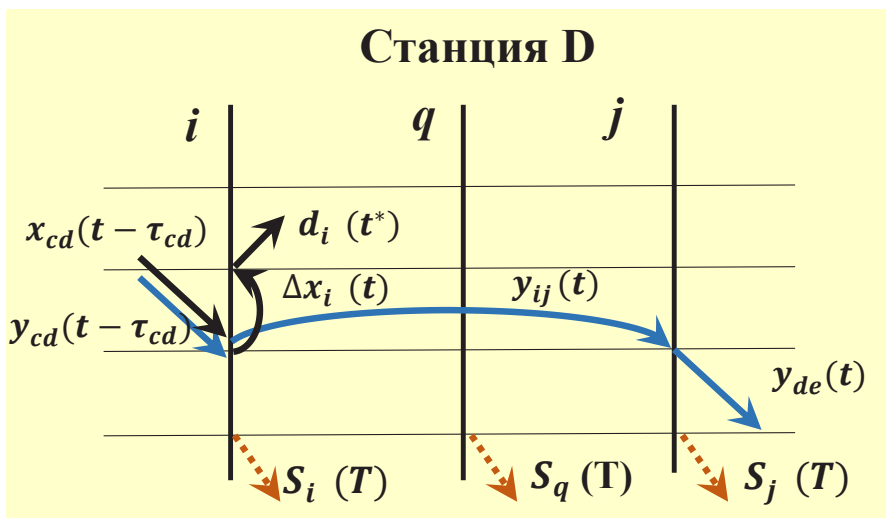


Рис. 3. Схема прибытия поезда на конечную станцию. Обратная дуга  $\Delta x_i(t)$  – опоздание.

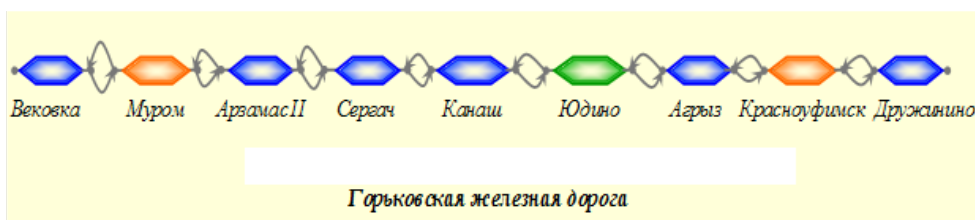


Рис. 4. Схема участка обращения локомотивов.

Если локомотив не нужен, то он ожидает во входном секторе (переменная  $y_{ii}(t)$ ).

В модели вводится понятие пул свободных локомотивов (индекс  $z$ ). Локомотивы в нем могут появляться в начале расчётного периода или по мере необходимости. Во втором случае можно проводить эксперименты по определению числа необходимых локомотивов при заданных параметрах пропуска поездопотока. Локомотивы из пула могут поступать на станцию во все части (переменные  $y_{zi}(t)$ ,  $y_{zq}(t)$ , и  $y_{zj}(t)$ ).

Время перемещения из пункта в пункт обозначается символом  $\tau$ . Например,  $y_{ab}(t - \tau_{ab})$  будет обозначать число локомотивов, прибывших на станцию Б в момент  $t$ , но вышедших со станции А на время хода  $\tau_{ab}$  раньше.

Проследование поезда станции транзитом отображается как совместное движение локомотива и состава (рис. 2).

Здесь совместно прибывают состав (переменная  $x_{bc}(t - \tau_{bc})$ ) и локомотив (переменная  $y_{bc}(t - \tau_{bc})$ ). Совместно они переходят

из сектора входа в сектор выхода (переменные  $x_{ij}(t - \tau_{ij})$  и  $y_{ij}(t - \tau_{ij})$ ). Из-за невозможности отправить поезд возникают простои (переменные  $x_{ij}(t)$  и  $y_{ij}(t)$ ). Отправление поезда отображается переменными  $x_{cd}(t)$  и  $y_{cd}(t)$ .

Для каждого поезда задается время прибытия без задержек. Прибытие фиксируется переменной  $d_i(t^*)$  (рис. 3).

Если поезд прибыл позже, то формируется переменная опоздания  $\Delta x_i(t)$ . В этом случае локомотив либо уходит резервом (переменные  $y_{ij}(t)$  и  $y_{de}(t)$ ), либо остается в ожидании в секторе входа или выхода (переменные  $y_{ii}(t)$  или  $y_{jj}(t)$ , см. рис. 1).

В динамической транспортной задаче для потока должны быть заданы исток и сток. Для потоков, которые ко времени  $T$  не дошли до своих стоков, вводятся искусственные стоки (переменные  $S(T)$ ).

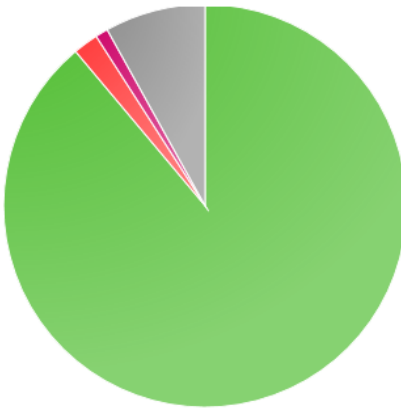
### ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

*Динамика составов в секторе входа*  
 $x_{ab}(t - \tau_{ab}) = x_{ij}(t) + \Delta x_i(t) + d_i(t) + S_i(T)$ , при  $0 \leq t \leq T$ .

Таблица 1

Параметры работы локомотивов

Локомотив	Полезная занятость	Отстой	Простои с составом	Резервный пробег	Число поездов
2461	[5] 16:08	01:36	04:00	00:00	6
2453	[5] 16:08	03:04	02:48	00:00	6
2496	[5] 16:00	04:16	02:16	00:00	8
2507	[5] 15:36	02:56	03:20	00:00	6
2559	[5] 15:36	01:52	02:40	00:32	5
2454	[5] 15:20	01:12	06:24	00:00	6



- Полезная занятость (88%)
- Простои с составом (2%)
- Резервный пробег (1%)
- Отстой (8%)

Рис. 5. Использование локомотивов.

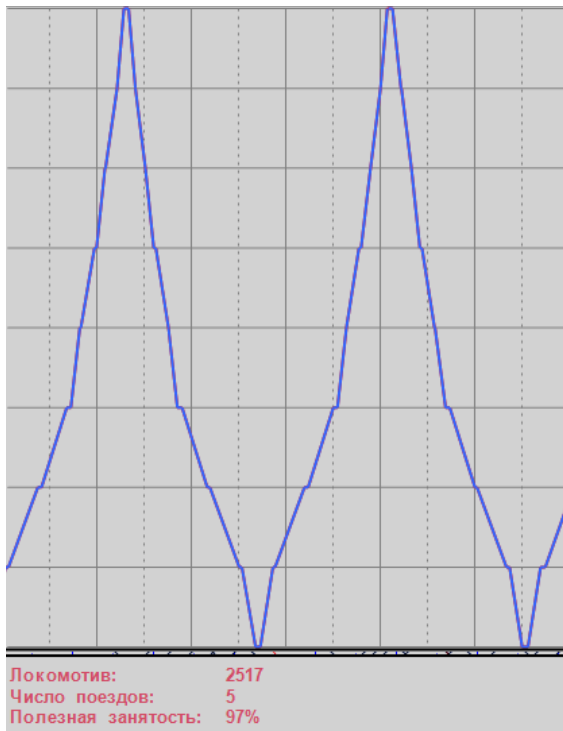


Рис. 6. График оборота локомотива без резервных пробегов.

**Динамика составов в секторе выхода станции**

$$x_{ij}(t) = x_{ij}(t-1) + x_{qi}(t-\tau_{qi}) + x_{ij}(t-\tau_{ij}) - x_{bc}(t) - S_j(T).$$

**Отражение опоздания поездов**

$$\Delta x_i(t) = x_{ab}(t-\tau_{ab}) - x_{ij}(t) - d_i(t),$$

$$\Delta x_i(t-1) = \Delta x_i(t) - d_i(t).$$

Здесь  $\Delta x_i(t)$  – число опаздывающих поездов на шаге  $t$ .

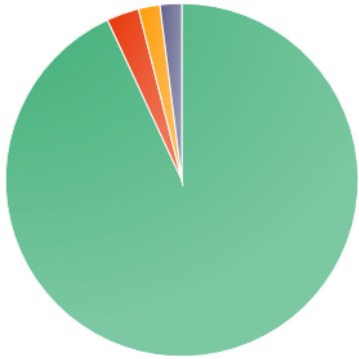
**Отражение ожидания составами локомотива**

$$x_{qq}(t) = x_{qq}(t-1) + d_q(t) - x_{qi}(t) - S_q(T).$$

Баланс локомотивов в секторе входа  $y_{ii}(t) = y_{ii}(t-1) + y_{zi}(t) - y_{ij}(t) - y_{iq}(t) + y_{ab}(t - \tau_{ab})$ .

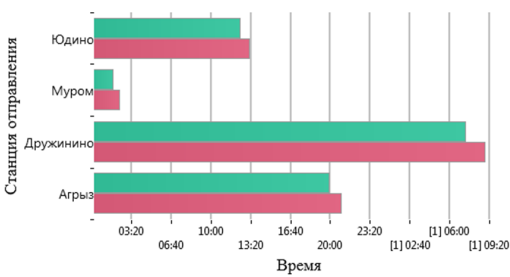
Новый локомотив либо прибывает с предыдущей станции, либо привлекается из пула.





■ Время хода + технические операции (94%)  
 ■ Ожидание нитки графика (3%)  
 ■ Ожидание локомотива (2%)  
 ■ Простой под обгоном (2%)

Рис. 7. Параметры продвижения поездопотока.



■ Время без задержек ■ Фактическое время

Рис. 8. Задержки поездов по отдельным струям потока.

**Динамика локомотивов в секторе выхода**  
 $y_{ij}(t) = y_{ii}(t-1) + y_{ij}(t-\tau_{ij}) + y_{zj}(t) + y_{qj}(t-\tau_{qj}) - y_{bc}(t).$

**Баланс локомотивов в пункте зарождения составов**

$$y_{iq}(t) + y_{zq}(t) = y_{qj}(t).$$

Дополнительные ограничения

Невозможность выхода состава в сектор выхода без локомотива

$$x_{qj}(t) = y_{qj}(t).$$

Состав в секторе выхода может быть только с локомотивом

$$x_{ij}(t) \leq y_{ij}(t).$$

Невозможность отправления состава без локомотива

$$x_{ab}(t) \leq y_{ab}(t).$$

**Функционал**

$$\sum_{t=0}^T (c^c \sum_k x_{ij}^k(t) + x_{qq}^k(t)) + c^o \sum_k \Delta x_i^k(t) + c_\beta \sum_k (y_{ii}^k(t) + y_{ij}^k(t) + y_{jj}^k(t)) + \sum_\eta c_\eta (y_\eta(t) - x_\eta(t)) \rightarrow .$$

→ min

Здесь:

- $\eta$  – номер участка,
- $k$  – номер станции,
- $c^c$  – стоимость одного часа простоя состава,

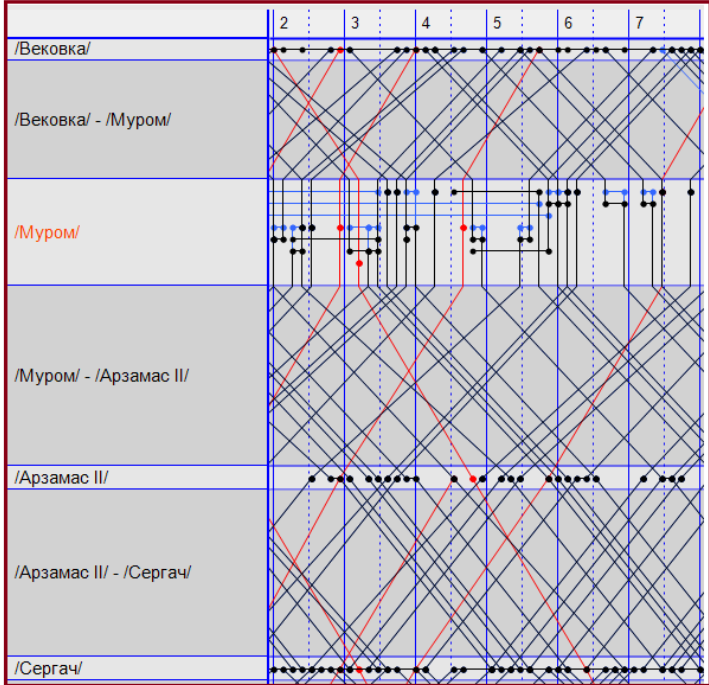


Рис. 9. График исполненного движения поездов.

–  $c^o$  – стоимость одного часа ожидания поезда на станции,

–  $c^c_\beta$  – стоимость одного часа использования локомотива.

Стоимости  $c^c$ ,  $c^o$ ,  $c^c_\beta$  приведены к одному такту моделирования.

–  $c_\eta$  – стоимость одного локомотиво-километра, умноженная на длину участка  $\eta$ .

**Содержательный смысл слагаемых функционала**

$c^c \sum_k (x_{jj}^k(t) + x_{qq}^k(t))$  – стоимость простоя

составов на станциях (все затраты измеряются течение одного такта).

$c^o \sum_k \Delta x_i^k(t)$  – штраф за опоздание поезда.

$c^c_\beta \sum_k (y_{ii}^k(t) + y_{jj}^k(t) + y_{jj}^k(t))$  – стоимость

использования локомотива. Технические операции на станции отображаются переменной  $y_{ij}^k(t)$ .

$\sum_\eta c_\eta (y_\eta(t) - x_\eta(t))$  – стоимость резервного пробега локомотива.

Здесь из общих поездных затрат вычитается стоимость перемещения состава.

## МОДЕЛЬ УЧАСТКА ОБРАЩЕНИЯ ЛОКОМОТИВОВ

Тестирование осуществлялось на участке Горьковской железной дороги Дружино–Вековка (рис. 4).

Проведен ряд расчётов. Ниже приводятся некоторые результаты одного из них. Расчётный период был девять суток. Первые и двое последних – отбрасывались как переходные, чтобы учитывались только устойчивые периоды.

Параметры использования локомотивов на рис. 5.

Здесь видно, что резервный пробег сведен к минимуму. При ручном управлении достичь таких результатов невозможно, ибо число вероятных движений локомотивов за несколько суток миллиарды. Простой с составом включает в себя технические операции и простой под обгоном.

Можно посмотреть параметры работы каждого локомотива (таблица 1).

Содержимое таблицы можно упорядочивать по любому столбцу. Из каждой строчки можно выйти на график работы того или иного локомотива. При этом значительное число локомотивов вообще не имеет порожних пробегов (рис. 6).

В полезную занятость не входят простои с составом под обгоном. Аналогичная информация выдается и по движению поездов (рис. 7).

Как можно увидеть, ожидание составов локомотивов также сведено к минимуму.

Модель выдает информацию по движению поездов по каждому направлению (рис. 8).

Можно посмотреть исполненный график движения и параметры каждого поезда (рис. 9).

Модель позволяет проводить различные эксперименты, в том числе – расчёт оптимального числа локомотивов при заданных стоимостных параметрах, определение наилучшего расположения локомотивов на начало расчётного периода при заданной структуре поездопотока, оценку влияния числа локомотивов на продвижение поездов и др.

Для использования в оперативном планировании модель следует подключить к соответствующим информационным системам.

Для дополнительного исследования полученных результатов (см., напр., [4]) была построена имитационная модель этого же участка с теми же поездопотоками и технологическими нормативами. Управление оборотом локомотивов реализовано максимально близко к реальному диспетчерскому управлению, когда диспетчер принимает решение в оперативной обстановке, стремясь найти наиболее эффективные решения. Оценить влияние принятого решения на более или менее длительную перспективу диспетчер, конечно, не может из-за огромной многовариантности.

Многочисленные эксперименты показали, что обеспечить такой высокий уровень полезного использования локомотивов при ручном управлении невозможно (рис. 10). Здесь даже при 150 локомотивах возникают большие задержки поездов. Средняя полезная занятость составляет только порядка 75%. Задержки несколько



Группы локомотивов				
Название	Количество	Полная занятос	Полезная занят	Задержка из-за
ВЛ80	150	23443:17(93%)	18854:47(74.8%)	3223:04

Группы локомотивов				
Название	Количество	Полная занятос	Полезная занят	Задержка из-за
ВЛ80	155	23151:04(88.9%)	18724:20(71.9%)	2656:14

Группы локомотивов				
Название	Количество	Полная занятос	Полезная занят	Задержка из-за
ВЛ80	159	22922:31(85.8%)	18662:39(69.9%)	2433:52

**Рис. 10. Параметры работы локомотивов (имитационная модель). Разницу в таких результатах можно понять, если сравнить наиболее типичные графики оборота в оптимизационной модели (рис. 6) и в имитационной модели (рис. 11).**

снижаются при увеличении числа локомотивов до 155 и 160.

На основе динамической транспортной задачи оптимизировать одновременно процесс продвижения поездопотока и технического обслуживания нельзя, поскольку потоки в этих процессах различные. Для них надо задавать пункты производства и потребления с ритмами их работы. В модели «Лабиринт» элементами потока являются составы, локомотивы прикрепляются к ним соответствующими ограничениями. А в задаче техобслуживания рассматриваются потоки локомотивов. Поэтому предлагается трехэтапное решение (рис. 12).

Расчетным периодом является предельное время работы локомотива без техобслуживания (обычно 4 суток). Первый этап – это расчет с помощью программы

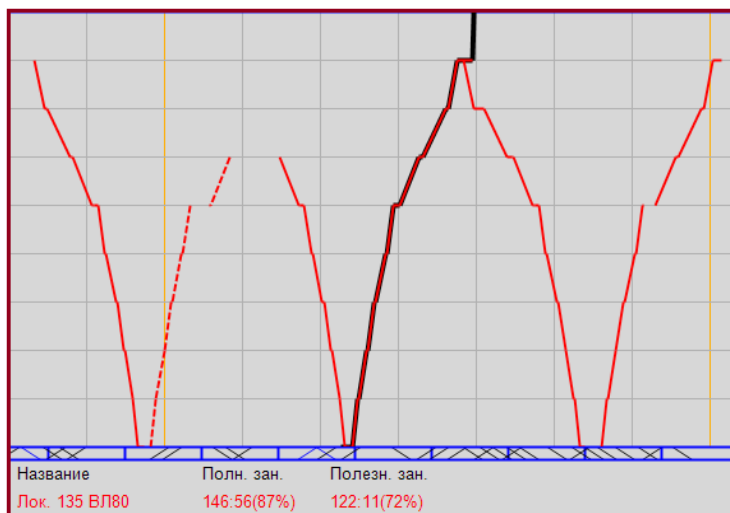
«Лабиринт» на весь период. Затем сервисная программа СП-1 определяет пункты остановки поездов по предельному времени работы локомотивов и формирует множество пунктов и моментов отправления для динамической транспортной задачи.

Затем формируется динамическая транспортная задача ДТЗЗ-Л, где элементами потока будут локомотивы, пунктом назначения искусственный сток, а депо обслуживания – транзитными пунктами (рис. 13).

Обозначения на рис. 13:

$u_{ij}^k(t)$  – поток локомотивов  $k$ -го типа от местонахождения до пункта технического обслуживания,

$u_{ij}^k(t)$  – локомотивы в ожидании обслуживания,



**Рис. 11. Типичный график оборота локомотива в имитационной модели (пунктиром – резервные пробеги, разрывы – простои локомотива в ожидании состава)**

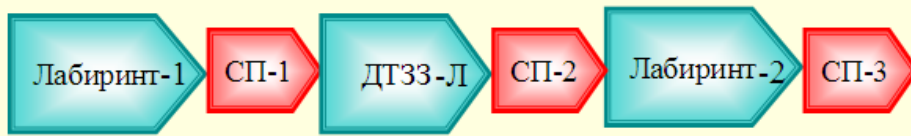


Рис. 12. Схема расчета оптимального оборота локомотивов с учетом техобслуживания (СП-1, СП-2, СП-3 – сервисные программы).

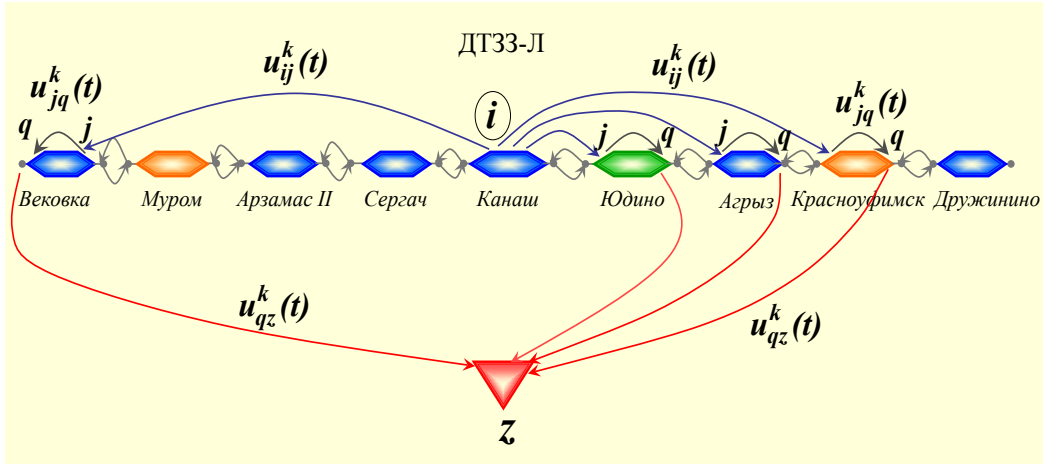


Рис. 13. Построение расчётной сети для ДТЗЗ-Л.

$u_{qz}^k(t)$  – поток по дуге до фиктивного стока  $z$ ,  
 $c_{ij}^k$  – стоимость движения локомотива до пункта технического обслуживания,  
 $c_{jj}^k$  – стоимость простоя локомотива в ожидании обслуживания,  
 $c_{z\kappa}^k = 0$  – для локомотивов всех типов.

Пути следования локомотивов к источку обязательно проходят через все депо возможного обслуживания. Критерием является минимум суммарных затрат на резервные пробеги и простои в ожидании техобслуживания. Задача будет многопродуктовой, ибо различные локомотивы могут обслуживаться в разных депо.

После расчёта сервисная программа СП-2 определяет станции обслуживания и моменты времени готовности локомотивов. Эти множества, а также множества станций и моментов остановки поездов будут исходной информацией для второго расчёта модели «Лабиринт».

Сервисная программа СП-3 формирует общие результаты расчетов.

На каждом из трех этапов реализуется процесс строгой оптимизации. Строгого доказательства оптимальности совмещенного процесса нет. Но он, по всей вероятности, будет либо оптимальным, либо близким к этому.

Совмещённый процесс можно преобразовать в автоматизированную процедуру и превратить его в оптимизирующий блок в локомотивном АСУ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Козлов П. А., Миловидов С. П. Оптимизация структуры транспортных потоков в динамике при приоритете потребителей // Экономика и математические методы. – Т. XVIII. – Вып. 3. – М., 1982. – С. 521–531.
2. Козлов П. А. Теоретические основы, организационные формы, методы оптимизации гибкой технологии транспортного обслуживания заводов черной металлургии / Дис... док. техн. наук. – Липецк: ЛПИ, 1986. – 377 с.
3. Козлов П. А., Вакуленко С. П. Расчет оптимальных режимов работы локомотивов при обслуживании поездопотоков // Транспорт Урала. – 2016. – № 1. – С. 3–8.
4. Вакуленко С. П. Модель расчета оптимальных режимов работы поездных локомотивов // Новая наука: опыт, традиции, инновации. – 2016. – № 8–2. – С. 97–104.

Координаты авторов: Вакуленко С. П. – vakulenko@miit.ru, Козлов П. А. – laureate\_k@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 22.06.2016, принята к публикации 16.08.2016.

