

АЛГОРИТМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СОСТАВЛЕНИЯ ГРАФИКА НАЗНАЧЕНИЯ ЛОКОМОТИВНЫХ БРИГАД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ГРАФОВ



С.П. Вакуленко



К.А. Калинин

В материалах статьи описан разработанный авторами алгоритм построения графика назначения локомотивных бригад на основе сформированного графика оборота пригородных электропоездов. Разработанный алгоритм позволяет минимизировать общее время простоя локомотивных бригад при ожидании нитки поезда, а как следствие уменьшить их штат и затраты на организацию движения на участках с интенсивным движением пригородных электропоездов.

Ключевые слова: график оборота пригородных электропоездов, локомотивная бригада, оборотный тупик, путь оборота, график движения

EDN: WOXXJG

Организация пассажирских перевозок с использованием пригородных электропоездов в крупных агломерациях представляет собой комплексный процесс, для реализации которого необходимо согласовать ряд технологических документов, которые регулируют работу различных составных элементов транспортной инфраструктуры.

В современных условиях работы пригородных и пригородно-городских маршрутов следования электропоездов в Московском транспортном узле (МТУ) существенным параметром соблюдения Трудового кодекса и технологических параметров движения железнодорожного транспорта является количество задействованных в движении локомотивных бригад.

Вакуленко Сергей Петрович, кандидат технических наук, профессор, заместитель директора Научно-исследовательского института транспорта Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: логистика грузовых и пассажирских перевозок, оптимизация перевозок в дальнем и пригородном сообщении, взаимодействие различных видов транспорта, мультимодальные и интермодальные перевозки. Автор более 400 научных работ, в том числе пяти учебников и 19 монографий. Имеет шесть патентов на изобретения.

Калинин Кирилл Антонович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: пассажирские перевозки высокоскоростным железнодорожным транспортом, грузовые перевозки, мультимодальные перевозки. Автор 86 научных работ, в том числе одной монографии.

Иванов Пётр Владимирович, ассистент кафедры «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: грузовые перевозки, технология работы терминальной инфраструктуры, грузовые перевозки в городских агломерациях, пассажирские перевозки. Автор пяти научных работ.

Сидоренко Никита Александрович, ведущий инженер Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (АО «НИИАС»). Область научных интересов: грузовые перевозки, имитационное моделирование объектов железнодорожной инфраструктуры, грузовые перевозки в городских агломерациях, пассажирские перевозки высокоскоростным железнодорожным транспортом. Автор одной научной работы.

Уваров Алексей Антонович, ведущий инженер Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (АО «НИИАС»). Область научных интересов: грузовые перевозки, имитационное моделирование объектов железнодорожной инфраструктуры, грузовые перевозки в городских агломерациях, пассажирские перевозки высокоскоростным железнодорожным транспортом.

В существующих условиях дефицита кадров неэффективная организация движения и бессистемный порядок назначения локомотивных бригад могут привести к неоправданному дефициту кадров и увеличению фонда оплаты труда.

В текущем состоянии составление графика оборота электропоездов и графика работы локомотивных бригад в Московском железнодорожном узле (МЖУ) неразрывно связано с оптимизацией разработанного графика движения поездов на рассматриваемом полигоне и параметров оборота пригородного подвижного состава. В случаях, когда для составления технологических документов используется графоаналитический подход [1], могут быть приняты нерациональные решения, приводящие к эксплуатационным потерям.

Для обеспечения пассажиров качественным транспортным сервисом необходимо разработать типовую технологию составления расписания работы локомотивных бригад. В качестве критериев оптимизации принимаем общее время работы локомотивной бригады, полезное время ее работы, среднесуточное количество рейсов бригады за рассматриваемый период, а также параметры соблюдения режима работы и отдыха локомотивной бригады.

Для оптимизации процесса оборота подвижного состава и пересадок локомотивных бригад предла-

гается выбрать схему, которая будет обеспечивать наименьший период ожидания поездом нитки графика и, при этом, не будет нарушать установленную норму времени на оборот. В настоящий момент в МТУ норматив времени на оборот пригородного подвижного состава составляет от 12 до 15 минут [2–4]. Продолжительность оборота зависит преимущественно от количества вагонов в составе поезда и схемы путевого развития станции оборота [5]. Схема оборота электропоезда представлена на рис. 1.

Используемый в настоящий момент процесс оборота составов не позволяет значительно сократить время оборота поездов в тупиках зонных станций. Стоит отметить, что 15-минутный норматив не является технологическим ограничением, а лишь отражает значительные временные затраты на передвижение ТЧМ и ТЧМП из головной части поезда в хвостовую. Процесс смены головного вагона электропоезда представлен на рис. 2.

На рис. 2,а представлен процесс прибытия пригородного состава на зонный путь конечной станции. После того, как пассажиры покинули поезд, помощник машиниста переходит из головной кабины управления в хвостовую кабину.

Существует несколько технологий, позволяющих значительно уменьшить продолжительность оборота. Так, в диссертационном исследовании Д.Ю. Роменского

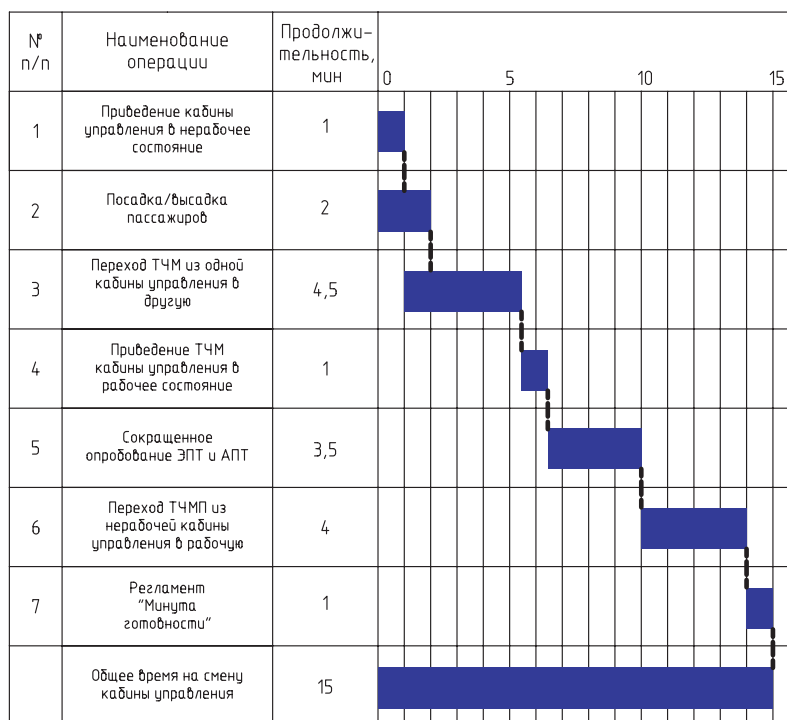


Рис. 1. Технологический график смены кабины управления электропоезда локомотивной бригадой

перечислены мероприятия, направленные на ускорение описываемого процесса [6]. Предлагается использование дополнительной маневровой или локомотивной бригады в процессе оборота, что уменьшит временные затраты на оборот электропоезда за счет сокращения времени на переход локомотивной бригады через поезд, а также отказ от опробования тормозов, поскольку смена направления движения без прекращения управления не предполагает разъединение тормозной магистрали [7].

На рис. 3 приведен схематичный фрагмент, изображающий состав, прибывающий на станцию В, который

имеет 3 доступных варианта оборота. Производится проверка интервала между текущим временем и временем отправления маршрута. Если он меньше, чем минимальное необходимое время для осуществления операций по обороту прибывающего электропоезда, то подобные нитки увязывать нельзя. В случае, если интервал больше установленного значения, следует выбрать состав с наименьшим периодом ожидания локомотивной бригады.

На представленной ниже схеме (см. рис. 3) отображен процесс работы локомотивной бригады, включающий в себя показатели: количество смен локомо-

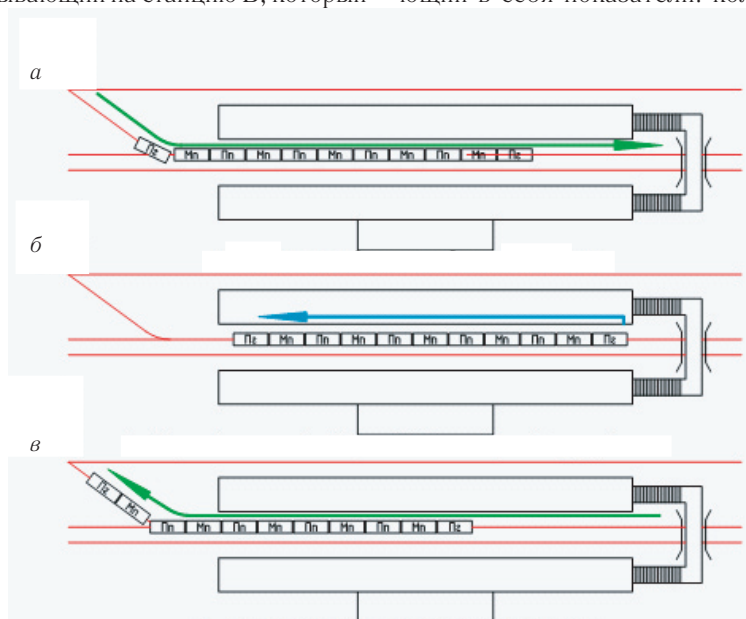


Рис. 2. Смена оборота пригородного электропоезда на зонном пути станции:
а – прибытие поезда на зонный путь для оборота; б – переход локомотивной бригады в хвостовую кабину управления; в – отправление пригородного поезда со станции

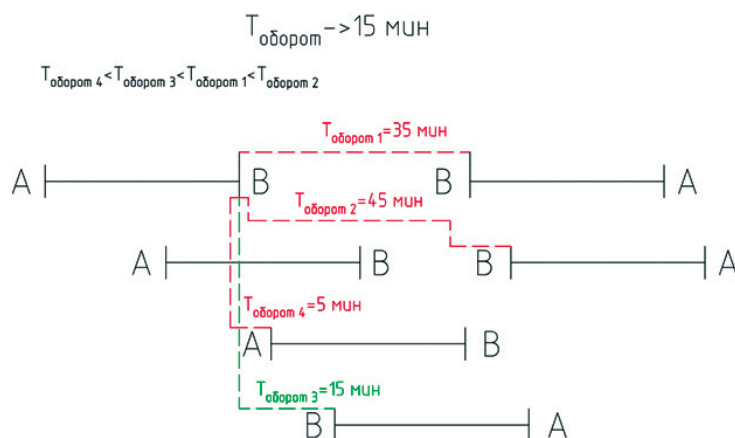


Рис. 3. Схема выбора оптимального маршрута для размещения локомотивной бригады

тивов и направлений движения, преодолеваемое на протяжении смены расстояние и суммарное время в пути локомотивной бригады N . Также на схеме выделен наиболее рациональный маршрут.

Целью формирования данной схемы является минимизация времени простоев локомотивной бригады на станции по ожиданию нитки на отправление. То есть время в пути локомотивной бригады должно стремиться к общей продолжительности смены, что в условиях реальной эксплуатации не должно превышать 10 ч

$$T_{\text{раб}}^i \rightarrow T_{\text{Общ}} - T_{\text{Отд}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{Общ}}$ — продолжительность смены локомотивной бригады, ч;

$T_{\text{раб}}^i$ — суммарное время, которое проводит i локомотивная бригада в кабине управления, ч;

$T_{\text{Отд}}$ — гарантируемое работодателем время нахождения бригады в доме отдыха локомотивных бригад, ч.

Рабочим временем локомотивной бригады считается то время, когда локомотивная бригада находится в пути, стремящееся к $T_{\text{Общ}}$.

$$T_{\text{раб}}^i = \sum T_i^j, \quad (2)$$

где T_i^j — время t поездки по маршруту j .

Таким образом по окончании трудового дня показатель $T_{\text{раб}}^i$ может принимать следующий вид:

$$T_{\text{раб}}^i = T_1^1 + T_2^1 + T_3^2 + T_4^3 + T_5^1 + T_6^3 + T_7^2 \rightarrow T_{\text{Общ}} - T_{\text{Отд}}. \quad (3)$$

Формула разности времен начала смены локомотивной бригады и начала рейсов:

$$T_1 - T_0 < T_2 - T_0 < T_3 - T_0. \quad (4)$$

На рис. 4 приведен фрагмент схемы оборота пригородных поездов.

В соответствии с формулой (4), для приведенной схемы можно сделать вывод, что из трех представленных вариантов оборота, наиболее целесообразным является первый маршрут — T_1 , так как он обеспечивает наименьший простой локомотивной бригады при ожидании к отправлению.

Помимо оптимизации работы одной конкретной локомотивной бригады перед графистами возникает другая технологическая задача, а именно комплексная взаимосвязка графика оборота в тупиках участковых станций [8–10]. Фактически, данный процесс представляет собой сложную оптимизационную задачу, когда схема оборота одной бригады может значительно увеличивать время простоя другой [11].

Если рассматривать работу локомотивной бригады в течение суток, то общую схему можно представить в виде графа древовидной структуры с развитой вариативностью принятия решений. Схема выбора представлена на рис. 5.

На рис. 5 отображены все варианты назначения локомотивной бригады на рейс в течение суток. При использовании описанной технологии принятия решения об оптимальном размещении бригады на поезд, выбор последующей ветви будет обусловлен временем $T_{\text{раб}}^i$, стремящимся к нормативному времени работы локомотивной бригады, а также показателем пройденного расстояния S , значение которого, целесообразно выбирать наибольшим, максимизируя таким образом

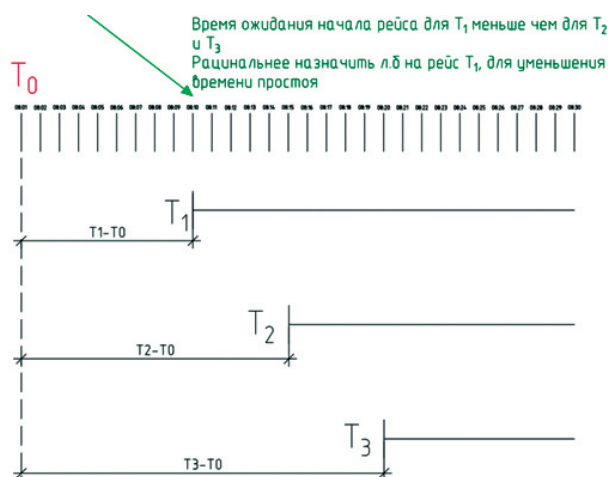


Рис. 4. Определение оптимального рейса для локомотивной бригады

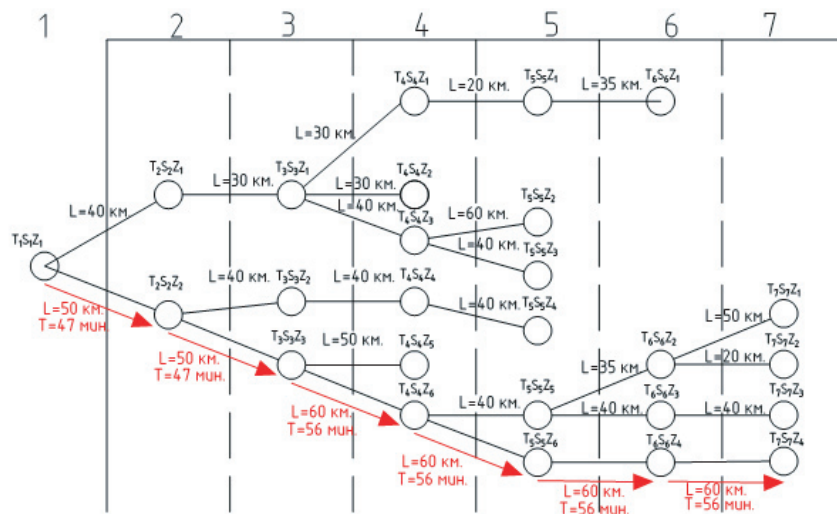


Рис. 5. Схема постановки локомотивной бригады на маршрут

полезную поездокилометровую работу бригады. Таким образом, последовательность поездок локомотивной бригады может принимать следующий вид:

$$T_1 S_1 Z_1 \rightarrow T_2 S_2 Z_2 \rightarrow T_3 S_3 Z_3 \rightarrow \\ \rightarrow T_4 S_4 Z_6 \rightarrow T_5 S_5 Z_6 \rightarrow T_6 S_6 Z_4 \rightarrow T_7 S_7 Z_4.$$

В приведенном примере по заданному маршруту суммарное расстояние, преодолеваемое локомотивной бригадой, составляет 340 км. Общее время хода по перегонам составляет 5 часов 18 минут. С учетом времени на смену кабины управления на станциях оборота итоговый показатель времени $T_{\text{раб}}^i = 7$ часов 33 минуты, полученное значение удовлетворяет условию.

При разработке графика оборота поездов и назначении локомотивных бригад на рейсы предлагается использовать метод, представленный на рис. 6.

Используемые обозначения: T_0 — задаваемый временной параметр, указывающий начало работы алгоритма; $N_{\text{подв}}$ — количество пар ниток графика движения занесенных в график оборота; $M_{\text{пар}}$ — количество пар поездов в графике движения; A — массив данных о графике движения; n — номер нитки; m — номер следующей выбранной нитки; b — номер локомотивной бригады; $A_{\text{отпр}}^m$ — станция отправления нитки m ; $T_{\text{отпр}}^n$ — время отправления рассматриваемой нитки; T_l^j — время проследования l нитки по j маршруту; $T_{\text{отпр}}^m$ — время отправления второй нитки в подвижной паре; K — массив данных о станциях, остановочных и отдельных пунктах на рассматриваемом

перегоне; $T_{\text{об}}$ — нормативное время продолжительности оборота пригородного состава на станции, где осуществляется оборот;

Массив «А» представляет собой структурированный набор информации и содержит следующие данные о графике движения поездов: существующие размеры движения, расстояния перегонов, скоростные режимы движения, а также продолжительность остановок на станциях и остановочных пунктах. В массиве «К» содержится информация о технико-технологических параметрах станций и остановочных пунктов, используемых при разработке графика движения. Стоит отметить, что данная схема применима только к участкам, на которых оборот пригородного электропоезда осуществляется на конечных станциях. То есть блок-схема, изображенная на рис. 6, не допускает возможности смены локомотивной бригады в пути следования на промежуточных станциях.

Пункт 1 алгоритма описывает процесс выбора первой нитки в графике движения поездов. Изначально задается параметр начала работы алгоритма T_0 , затем проверяется условие соответствия временных показателей T_0 и $T_{\text{отпр}}^n$. Если значения совпадают, то алгоритм продолжает работу с ниткой n . Если условие не выполняется, то значение T_0 сдвигается на заданный шаг дискретности графика (в примере на 1 минуту) вперед, таким образом осуществляется поиск нитки в графике. Итого максимальное количество операций по смещению значения T_0 равняется 1440 итерациям [12;13].

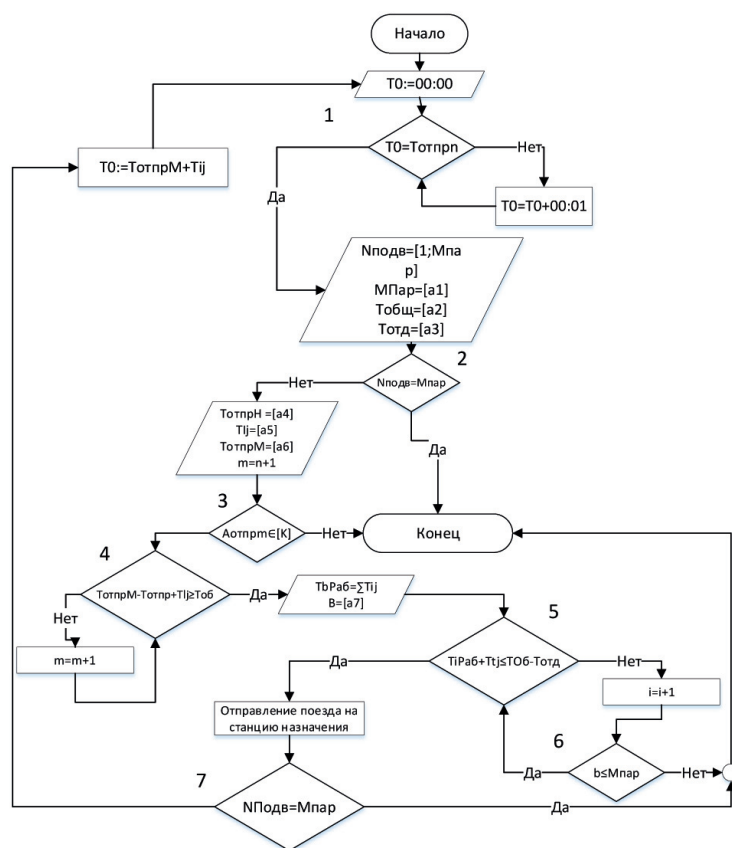
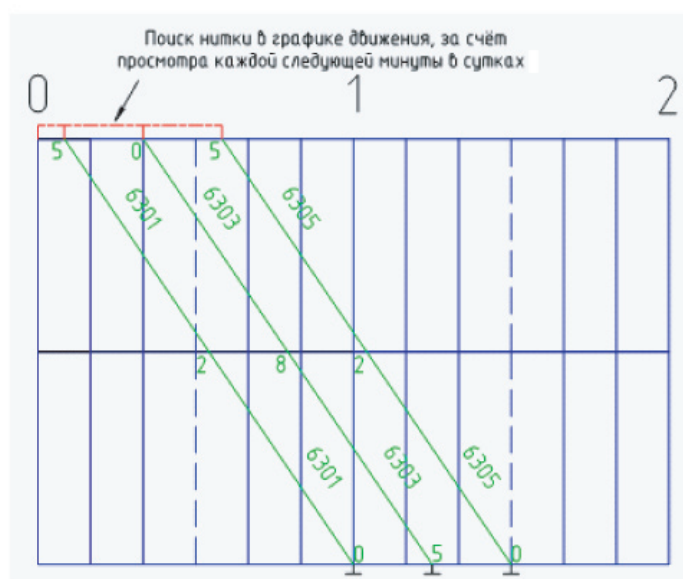


Рис. 6. Блок-схема процесса назначения



В пункте 2 проверяется условие соответствия парности графика и текущее количество ниток в графике оборота. Если условие $N_{\text{подв}} = M_{\text{пар}}$ выполняется, то алгоритм завершает работу и график оборота считается исполненным. В противном случае алгоритм переходит к следующему условию. Одним из критериев отбора подходящей для оборота нитки является возможность выполнения оборота пригородного состава m на станции отправления. Массив «К» содержит сведения о станциях рассматриваемого участка, на которых может быть выполнен оборот поезда. Если выполняется условие $A^m_{\text{отпр}} \in K$, то алгоритм переходит к следующему условию. Если в массиве «К» не обнаружено данных о станции $A^m_{\text{отпр}}$, то алгоритм завершает работу.

После проверки $A^m_{\text{отпр}}$ производится контроль условия №4 — соблюдение разницы во времени отправления следующего и текущего поездов минимального нормативного значения, отводимого на оборот пригородного электропоезда. Если разница между отправлением и прибытием меньше 15 минут, то по данному критерию рассматривается следующая нитка. В случае, если разница во времени удовлетворяет неравенству, то цикл рассматривает следующее неравенство. С целью иллюстрации описываемого процесса был разработан фрагмент графика движения поездов, представленный на рис. 8.

На основании условия №4 блок-схемы и рисунка 8 можно сделать вывод, что совершить оборот ниток 6113 и 6112 не представляется возможным из-за несоответствия разницы во времени прибытия поезда 6113 и отправляющегося 6112:

$$|19:04-19:09| \leq 15, \text{ мин.}$$

Необходимо также заложить в алгоритм ограничение, связанное с максимальной продолжительностью смены локомотивной бригады. Потребное ограничение рассматривается в блоке №5 блок-схемы:

$$T^i_{\text{раб}} + T^j_t \leq T_{\text{общ}} - T_{\text{отд}}, \quad (5)$$

где T^j_t — продолжительность t поездки по маршруту j , ч.

Если полученные значения удовлетворяют заданному неравенству, то локомотивная бригада назначается на рассматриваемую поездку. Затем алгоритм вновь проверяют на количество ниток в графике оборота относительно показателя парности нормативного графика движения поездов. В случае, если условие $N_{\text{подв}} = M_{\text{пар}}$ выполняется, алгоритм завершает работу. В противном случае алгоритм начнет поиск последующих ниток, то есть начнет цикл с начала. Таким образом время T_0 принимает следующий вид:

$$T_0 = T^m_{\text{отпр}} + T^j_t. \quad (6)$$

На рис. 9 представлена схема, описывающая формулу (5). Продолжительность текущей работы $T^i_{\text{раб}} = 3 \text{ ч } 55 \text{ мин}$, а продолжительность рейса 6104 составляет 55 мин. Прежде, чем назначить локомотивную бригаду на рейс, необходимо определить итоговую продолжительность ее работы. В соответствии с формулой (5) определим верность неравенства:

$$3:55 + 0:55 \leq 12:00 - 2:00.$$

Для разработки графика оборота поездов необходимо учитывать особенности эксплуатации рассматриваемого полигона, а именно:

1. Количество главных путей, на которых обращаются пригородные электропоезда.

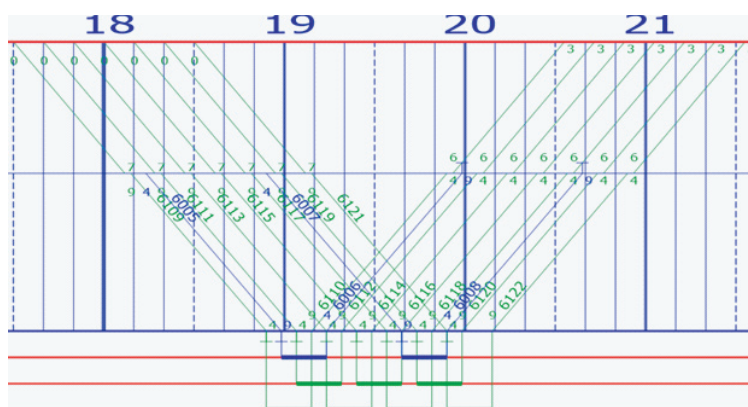


Рис. 8. Фрагмент графика движения поездов в пиковый период

2. Техническое обеспечение, наличие устройств сигнализации, централизации и блокировки.
3. Суточное количество пар поездов, подлежащих обороту.
4. Скоростной режим на участках полигона.
5. Продолжительность остановки на вокзалах и пассажирских платформах.
6. Распределение пассажиропотока по направлениям.
7. Продолжительность пикового и непикового периода.

Для апробации предлагаемой технологии был разработан фрагмент графика движения поездов (рис. 10).

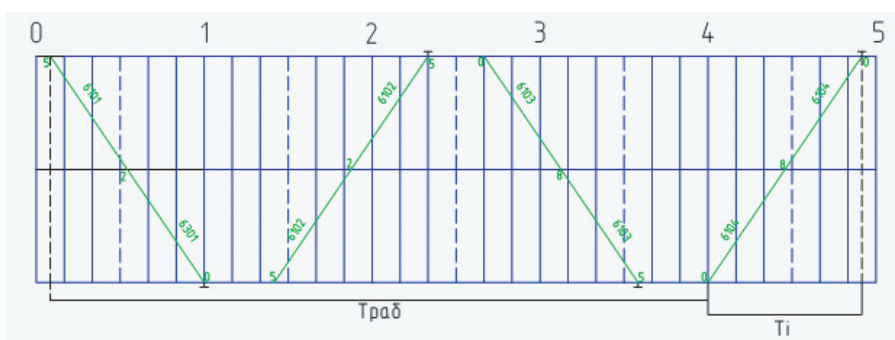
На основе фрагмента графика движения поездов и предлагаемого алгоритма был разработан график

оборота рассматриваемого участка. График оборота представлен на рис. 11.

Исходя из данных, полученных при разработке графика оборота, определяется продолжительность работы локомотивных бригад, назначенных на рассматриваемые нитки. Накопленное время работы локомотивных бригад представлено в таблице.

Вывод

С целью обеспечения комфортной для пассажиров населенности вагонов в пиковые часы к движению назначаются 3 дополнительные пары поездов. В отличие от оборота в непиковый период, для обеспечения смены головы пригородного электропоезда требуется оборудовать третий дополнительный путь. Поскольку



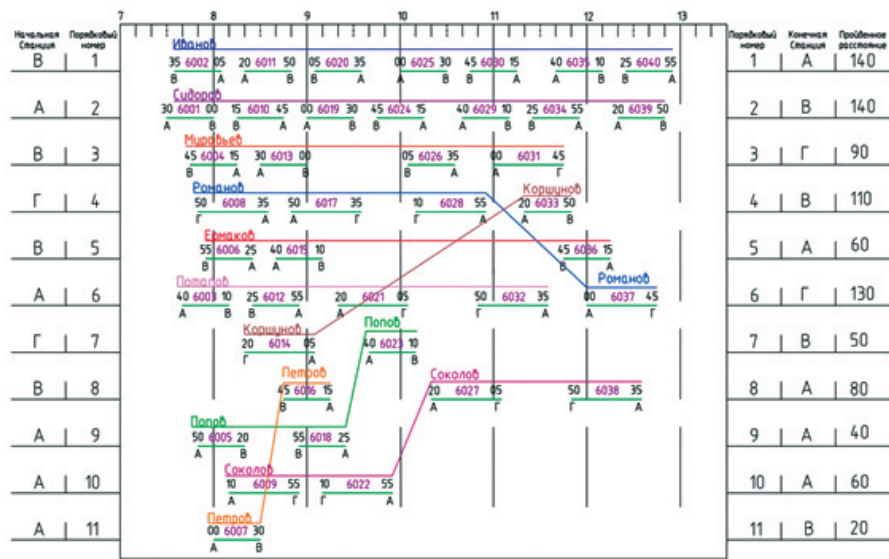


Рис. 11. Разработанный график оборота с назначенными локомотивными бригадами

Таблица

Время работы локомотивных бригад

№	Локомотивная бригада	Время работы, мин
1	Иванов	210
2	Сидоров	210
3	Муравьев	135
4	Романов	180
5	Ермаков	90
6	Потапов	150
7	Коршунов	75
8	Попов	90
9	Соколов	180
10	Петров	60

при увеличенной интенсивности движения возникает ситуация нехватки свободных путей в связи с ограничением, вызванным 15-минутным нормативом на оборот поездов [14].

В материалах статьи был описан разработанный алгоритм рационального формирования графика оборота локомотивных бригад. Ключевым условием при распределении локомотивных бригад в графике оборота является минимизация времени простоя локомотивной бригады в ожидании нитки поезда. Суммарное время работы бригады должно стре-

миться к общему времени смены. Для соблюдения данного условия время оборота локомотивной бригады должно стремиться к минимально допустимому значению, установленному в качестве нормативного на рассматриваемой станции с зонным путем или оборотным тупиком.

Также в ходе подготовки статьи были разработаны фрагменты графика движения поездов в пиковый и непикуный периоды с применением вышеописанного алгоритма разработки графика оборота локомотивных бригад.

Литература

1. Разработка единой технологии работы пригородных участков с различными межпоездными интервалами / С. П. Вакуленко, Д. Ю. Роменский, К. А. Калинин, А. Д. Ершов. - Текст : непосредственный // Интеллектуальные транспортные системы : материалы III Международной научно-практической конференции, Москва, 30 мая 2024 года. - Москва : Российский университет транспорта (МИИТ), 2024. - С. 63-70. - DOI 10.30932/9785002446094-2024-63-70. - EDN NLMYQL.
2. Роменский, Д. Ю. Пригородно-городские железнодорожные пассажирские перевозки на диаметральных маршрутах крупных транспортных узлов (на примере Московского транспортного узла) : специальность 05.22.08 «Управление процессами перевозок» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Роменский Дмитрий Юрьевич. - Москва, 2021. - 240 с. - EDN QQNZBC. - Текст : непосредственный
3. Биленко, Г. М. График оборота локомотивов как основа графика движения грузовых поездов / Г. М. Биленко, В. С. Волков. - Текст : непосредственный // Наука и техника транспорта. - 2016. - № 2. - С. 79-86. - EDN WADHKN;
4. Роменский, Д. Ю. Разработка принципов формирования клиентоориентированного графика движения поездов в пригородно-городских пассажирских перевозках / Д. Ю. Роменский, К. А. Калинин, М. В. Кулалаева. - Текст : непосредственный // Интеллектуальные транспортные системы: материалы II Международной научно-практической конференции, Москва, 25 мая 2023 года. - Москва : Российский университет транспорта, 2023. - С. 330-337. - DOI 10.30932/9785002182794-2023-330-337. - EDN FQMKBX.
5. Бакин, А. А. Алгоритм построения графика движения поездов с тактовым расписанием движения пригородных поездов / А. А. Бакин. - Текст : непосредственный // Кочневские чтения - 2023: современная теория и практика эксплуатационной работы железных дорог: труды II-й Международной научно-практической конференции, Москва, 19-20 апреля 2023 года. - Москва: Российский университет транспорта (МИИТ), 2023. - С. 316-321. - EDN FOESWA.
6. Вакуленко, С. П. Тактовые графики движения поездов на участках с интенсивным пассажирским движением на примере Московского железнодорожного узла / С. П. Вакуленко, Д. Ю. Роменский, А. В. Колин. - Текст : непосредственный // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. - 2020. - № 9. - С. 3-7. - DOI 10.36535/023619142020091. - EDN PEWJAD.
7. Воротников, С. Л. Учет современных требований при составлении графика оборота пригородных электропоездов / С. Л. Воротников, Е. А. Сидорова. - Текст : непосредственный // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции. - 2009. - Т. 1, № 4. - С. 29-30. - EDN OIEETF.
8. Козлов, П. А. Оптимизация оборота составов по обеспечению ниток графика пригородного движения / П. А. Козлов, Е. В. Копылова. - Текст : непосредственный // Наука и техника транспорта. - 2020. - № 2. - С. 68-73. - EDN RRDXXA.
9. Бакин, А. А. Метод разработки тактового графика движения пригородных поездов: специальность 05.22.08 «Управление процессами перевозок» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Бакин Алексей Алексеевич. - Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта», 2024. - 24 с. - EDN JPDWUA. - Текст : непосредственный.
10. Организация пригородных железнодорожных перевозок: Транспортные средства. Эксплуатация железных дорог / Ю. О. Пазойский, С. П. Вакуленко, А. В. Колин [и др.] ; Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте. - Москва : Федеральное государственное бюджетное учреждение дополнительного профессионального образования «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2015. - 270 с. - ISBN 978-5-89035-816-5. - EDN RMGERU. - Текст : непосредственный.
11. Управление качеством графика движения поездов в железнодорожных узлах с интенсивным пригородным движением / С. П. Вакуленко, Д. Ю. Роменский, К. А. Калинин, М. В. Лукинская. - Текст : непосредственный // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. - 2024. - № 5. - С. 30-40. - DOI 10.36535/0236-1914-2024-05-5. - EDN CGPSTN.
12. Власова, Н. В. Автоматизация графика движения поездов на железнодорожном транспорте с целью аккумуляции перевозочного процесса / Н. В. Власова, Н. Д. Купцова. - Текст : непосредственный //

Ресурсосбережение и экология: агропромышленный комплекс, проектирование и строительство : сборник научных статей Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, магистров и бакалавров, Курск, 24 ноября 2023 года. - Курск: ЗАО «Университетская книга», 2023. - С. 493-496. - EDN HPXHNC.

13. Ерофеев, А. А. Система автоматизированного проектирования графика движения поездов : учебно-методическое пособие / А. А. Ерофеев, Е. А. Ерофеева ; Министерство образования Республики Беларусь, Белорусский государственный университет транспорта. - Гомель : учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», 2012. - 150 с. - ISBN 978-985-554-022-0. — EDN YRFIZN. - Текст : непосредственный.

14. Гильманов, И. А. Анализ эффективности работы локомотивных бригад на железной дороге / И. А. Гильманов, О. И. Залогова. - Текст : непосредственный // Молодая наука Сибири. - 2019. - № 4 (6). - С. 5-11. - EDN LQBMZE.