

УДК 656.21.001.2

Распределение локомотивов по железнодорожному узлу с помощью внедрения интеллектуальных систем планирования

С. Б. Сатторов, Ш. У. Саидивалиев, Р. Ш. Бозоров

Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан, 100069, Ташкент, ул. Темирийулчилар, 1

Для цитирования: Сатторов С. Б., Саидивалиев Ш. У., Бозоров Р. Ш. Распределение локомотивов по железнодорожному узлу с помощью внедрения интеллектуальных систем планирования // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 1. — С. 62–71. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-62-71

Аннотация

Цель: Рациональное использование локомотивов на железнодорожном узле для минимизации затрат, времени простоя и максимизации производительности, оптимизации работы локомотивного парка. В статье рассматривается математическая модель оптимизации оборота локомотивов, позволяющая найти баланс между доходами и затратами на эксплуатацию и обслуживание локомотивов. **Методы:** Оптимизация работы локомотивного парка рассматривается с методами линейного программирования и теории расписаний. **Результаты:** Было установлено, что минимизация времени простоя локомотивов и их максимальная загрузка требуют точного планирования маневровой работы и своевременного перемещения локомотивов на нужные участки. Для обеспечения баланса между маневровой работой и поездной работой важно правильно распределять локомотивы. Своевременная подача локомотивов к поездам для отправки требует координации действий диспетчеров. Приводит к минимизации времени, которое локомотивы проводят в ожидании новой работы, и максимизации времени в эксплуатации. **Практическая значимость:** Результаты работы имеют значение для эффективного управления эксплуатацией локомотивов на железнодорожном транспорте, что делает его более привлекательным для грузоотправителей и пассажиров.

Ключевые слова: Локомотивы, распределение, узлы, планирование, логистика, эффективность, прогнозирование, подвижной состав, управление, инфраструктура.

В условиях рыночной экономики железнодорожный транспорт сталкивается с необходимостью конкурировать с другими видами транспорта — автомобильным, воздушным и водным. Эффективное управление эксплуатацией локомотивов позволяет минимизировать затраты на перевозку, улучшить скорость и точность доставки, что делает его более привлекательным для грузоотправителей и пассажиров. В условиях растущего спроса на перевозки эффективное управление локомотивами позволяет увеличить количество поездов, проходящих через железнодорожные узлы и магистрали. Это, в свою очередь, способствует росту грузооборота и пассажиропотока, что положительно сказывается на развитии экономики [1–3].

Одной из основных проблем является недостаточное количество локомотивов или их высокий уровень износа, что приводит к перебоям в движении и увеличению времени на маневры. Старение парка локомотивов также вызывает рост эксплуатационных затрат и снижает надежность перевозок. Неправильное

планирование распределения локомотивов по направлениям и задачам на узле может привести к простоям подвижного состава, перегруженности отдельных участков и созданию узких мест в транспортной цепи. В больших узлах с высокой интенсивностью движения нередко возникают задержки в поездных операциях. Несогласованность между диспетчерами и машинистами, а также другие организационные проблемы могут увеличивать время на доставку грузов, что отрицательно влияет на общую эффективность узла [3–5].

На железной дороге для решения путей улучшения использования локомотивного парка, а также условий труда и отдыха локомотивных бригад используется автоматизированная система управления эксплуатацией локомотивов [6, 7]. Она значительно упрощает и оптимизирует управление эксплуатацией локомотивов и бригад, улучшая условия труда, сокращая издержки и повышая безопасность. Однако при этом она требует значительных вложений, качественной IT-инфраструктуры и гибкости в управлении, особенно в нестандартных ситуациях.

Основные задачи оптимизации распределения локомотивов:

1. Минимизация времени простоя локомотивов и их максимальная загрузка, что позволяет уменьшить эксплуатационные расходы и повысить производительность узла. Это требует точного планирования маневровой работы и своевременного перемещения локомотивов на нужные участки.

2. Обеспечение баланса между маневровой работой, связанной с формированием и расформированием составов, и поездной работой. Для этого важно правильно распределять локомотивы между этими операциями, чтобы избежать простоев на маневрах и обеспечить бесперебойное движение поездов по магистральным маршрутам.

3. Своевременная подача локомотивов к поездам для отправки. Это требует координации действий диспетчеров, которые управляют движением и расстановкой локомотивов, чтобы минимизировать время ожидания локомотива для загрузки или отправки.

4. Эффективный оборот локомотивов. Это включает минимизацию времени, которое локомотивы проводят в ожидании новой работы, и максимизацию времени в эксплуатации.

Рациональное использование локомотивов на железнодорожном узле для минимизации затрат, времени простоя и максимизации производительности, оптимизации работы локомотивного парка рассматривается с методами линейного программирования и теории расписаний. Рассмотрим основные переменные и параметры, влияющие на задачу рационального использования локомотивов:

Переменные:

L_i — количество локомотивов, выделенных для маршрута i ;

T_{ij} — время в пути локомотива i на маршруте j ;

P_i — производительность локомотива i (измеряется в тонно-километрах);

C_i — затраты на эксплуатацию локомотива i (включая топливо, техническое обслуживание и амортизацию);

D_i — время простоя локомотива i ;

v_i — скорость локомотива i .

Минимизировать общие затраты на эксплуатацию локомотивов при обеспечении требуемого объема перевозок и минимизации простоев:

$$\sum_{i=1}^n (C_i \cdot L_i + \alpha \cdot D_i) \rightarrow \min,$$

где α — весовой коэффициент, определяющий влияние времени простоя на общие затраты;

n — общее количество локомотивов.

Ограничения:

1. Каждый маршрут должен быть обслужен таким количеством локомотивов, чтобы суммарная производительность удовлетворяла потребности в перевозках:

$$\sum_{i=1}^n P_i L_i \geq P_{\min},$$

где P_{\min} — минимальная требуемая производительность для обеспечения грузооборота на узле.

2. Время движения по маршруту и время простоя локомотивов не должно превышать установленного лимита, чтобы обеспечить выполнение расписания:

$$T_{ij} + D_i \leq T_{\max},$$

где T_{\max} — максимально допустимое время на маршрут и простои.

3. Количество локомотивов, задействованных на узле, ограничено наличием парка:

$$\sum_{i=1}^n L_i \leq L_{\text{об}},$$

где $L_{\text{об}}$ — общее количество локомотивов на узле.

4. Скорость локомотивов должна соответствовать допустимым значениям для различных маршрутов:

$$v_i \geq v_{\min},$$

где v_{\min} — минимальная допустимая скорость.

Для решения данной задачи можно использовать такие методы оптимизации, как:

– линейное программирование (Simplex метод);

– модели сетевого планирования (алгоритмы потока на сети);

– генетические алгоритмы для поиска глобального оптимума при сложных системах ограничений.

Чтобы устранить ограниченность горизонта планирования и повысить точность расчетов, далее можно интегрировать линейное программирование с динамическим и нелинейным программированием, машинным обучением и имитационным моделированием. Такой гибридный подход даст возможность адаптировать планы под меняющиеся условия, делать точные прогнозы и учитывать стохастические колебания спроса и состояния путей, а также повысит устойчивость и точность решений.

Синхронизация маневровой и поездной работы на железнодорожном узле является важной задачей для обеспечения эффективного и бесперебойного движения поездов, оптимизации использования путей и локомотивов, а также минимизации простоев. Для решения этой задачи можно использовать модели теории расписаний и оптимизации, которые включают в себя учет ограничений по времени, ресурсам и пропускной способности.

Основные переменные и параметры:

M_i — количество маневровых операций i ;

T_{mi} — время выполнения маневровой операции i ;

N_i — количество поездных операций i ;

T_{ni} — время выполнения поездной операции i ;

R_m — ресурсы (например, локомотивы, пути) для выполнения маневровых операций;

R_n — ресурсы для выполнения поездных операций;

C_i — пропускная способность узла;

τ_i — время ожидания перед началом операции i .

Минимизировать время простоя локомотивов и вагонов на узле, а также общее время выполнения маневровых и поездных операций при учете ограничений по ресурсам и пропускной способности:

$$\sum_{i=1}^n (T_{mi} + \tau_{mi} + T_{ni} + \tau_{ni}) \rightarrow \min,$$

где τ_{mi} и τ_{ni} — время ожидания выполнения маневровых и поездных операций соответственно.

Ограничения:

1. Одновременно можно задействовать ограниченное количество ресурсов для выполнения маневровых и поездных операций, и они не должны конфликтовать:

$$\sum_{i=1}^n R_m M_i + \sum_{i=1}^n R_n N_i \leq R_{об},$$

где $R_{об}$ — общее количество доступных ресурсов (например, количество локомотивов или путей).

2. Пропускная способность узла ограничивает количество маневровых и поездных операций, которые могут быть выполнены одновременно:

$$\sum_{i=1}^n (M_i + N_i) \leq C_i,$$

где C_i — максимальное количество операций, которое может быть выполнено на узле в единицу времени.

3. Время выполнения операций должно быть согласовано, чтобы избежать конфликтов и простоев:

$$T_{mi} + \tau_{mi} \leq T_{ni} + \tau_{ni},$$

где T_{mi} — время выполнения маневровой операции, а T_{ni} — время выполнения поездной операции.

4. Операции должны быть выполнены в соответствии с графиком прибытия и отправления поездов:

$$T_{mi} \geq S_{mi}, \quad T_{ni} \geq S_{ni},$$

где S_{mi} и S_{ni} — запланированное время для выполнения маневровых и магистральных операций.

Решение может быть найдено с помощью линейного программирования, учитывающего все ограничения и зависимости между операциями.

Своевременная подача локомотивов на железнодорожном узле — это важная задача для обеспечения бесперебойного движения составов и оптимизации грузооборота. Она включает в себя координацию подачи локомотивов к поездам для выполнения маневровых и поездных операций с минимальными задержками. Для данной задачи можно использовать модели теории расписаний и методы оптимизации.

Основные переменные и параметры:

L_i — локомотив i ;

T_{di} — время подачи локомотива L_i на место отправления;

T_{si} — запланированное время подачи локомотива L_i ;

W_i — весовая функция опоздания или ожидания локомотива i ;

D_i — задержка подачи локомотива i (разница между фактическим и запланированным временем);

P_i — время простоя локомотива i перед назначенной задачей;

C_i — эксплуатационные затраты на работу локомотива i ;

R_i — производительность локомотива i (в тонно-километрах).

Минимизировать задержку подачи локомотивов и эксплуатационные затраты при обеспечении своевременной подачи к запланированным операциям:

$$\sum_{i=1}^n (W_i D_i + C_i) \rightarrow \min,$$

где $D_i = \max(0, T_{di} - T_{si})$ — задержка подачи локомотива, если T_{di} превышает запланированное время подачи T_{si} .

Ограничения:

1. Локомотивы должны быть доступны для подачи в указанные временные интервалы:

$$T_{di} \geq T_{дост i},$$

где $T_{дост i}$ — время, когда локомотив i становится доступен для выполнения задачи.

2. Общее количество локомотивов, задействованных в конкретный момент времени, не должно превышать доступное количество локомотивов на узле:

$$\sum_{i=1}^n L_i \leq L_{об},$$

где $L_{об}$ — общее количество доступных локомотивов на узле.

3. Время простоя локомотивов до подачи должно быть минимизировано:

$$P_i \leq P_{\max},$$

где P_{\max} — максимально допустимое время простоя перед операцией.

4. Локомотивы должны подаваться к поездам в соответствии с графиком отправления, с минимальными отклонениями:

$$T_{di} \leq T_{si} + \epsilon,$$

где ϵ — допустимая задержка подачи локомотива.

С помощью линейного программирования можно найти оптимальные моменты подачи локомотивов T_{di} , которые удовлетворяют всем ограничениям и минимизируют затраты и задержки.

Оптимизация оборота локомотивов на железнодорожном узле — это задача, направленная на минимизацию простоев, сокращение затрат на эксплуатацию и техническое обслуживание, а также улучшение общей эффективности использования локомотивного парка. Для этой задачи можно использовать методы линейного программирования и теории расписаний.

Основные параметры и переменные:

L_i — локомотив i ;

$T_{об i}$ — время оборота локомотива i (время от начала одной поездки до возвращения для следующей);

$T_{техоб i}$ — время, необходимое для технического обслуживания локомотива i ;

$T_{прос i}$ — время простоя локомотива i между рейсами;

C_i — эксплуатационные затраты на локомотив i за один оборот;

n_i — количество оборотов локомотива i за период;

R_i — доход, полученный за оборот локомотива i ;

N — общее количество доступных локомотивов на узле.

Цель состоит в том, чтобы минимизировать общие затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание, а также минимизировать время простоя, при этом обеспечивая максимальный оборот локомотивов:

$$\sum_{i=1}^N (R_i n_i) - \sum_{i=1}^N (C_i + T_{\text{обс}i}) \rightarrow \max,$$

где R_i — доход от использования локомотива;

C_i — эксплуатационные затраты;

$T_{\text{обс}i}$ — время на обслуживание.

Ограничения:

1. Время оборота локомотива включает время на поездку, техническое обслуживание и возможные простои:

$$T_{\text{об}i} = T_{\text{ход}i} + T_{\text{техобс}i} + T_{\text{прос}i},$$

где $T_{\text{ход}i}$ — время поездки локомотива i .

2. Общее количество локомотивов не должно превышать доступное количество на узле:

$$\sum_{i=1}^N L_i \leq N,$$

где N — общее количество локомотивов.

3. Локомотивы должны проходить техническое обслуживание через определенные интервалы времени или после определенного количества оборотов:

$$T_{\text{техобс}i} \leq T_{\text{макс техобс}},$$

где $T_{\text{макс техобс}}$ — максимально допустимое время между техническими обслуживаниями.

4. Время простоя локомотива между рейсами должно быть минимизировано:

$$T_{\text{прос}i} \leq T_{\text{макс прос}},$$

где $T_{\text{макс прос}}$ — максимально допустимое время простоя локомотива.

5. Доход от использования локомотивов должен превышать расходы на их эксплуатацию:

$$R_i n_i \geq C_i + T_{\text{техобс}i},$$

для каждого локомотива i .

Заключение

Традиционно локомотивные плечи позволяют поддерживать регулярные графики работы локомотивов и бригад, что критично для больших расстояний и сложных маршрутов. Однако фиксированные плечи зачастую не учитывают изменяющиеся потребности в узлах, где скопление локомотивов может создать заторы или дефицит. Интеграция системы планирования с существующей моделью на основе локомотивных плеч создает гибридный подход: локомотивные плечи остаются основой, но их использование становится более гибким и эффективным. Она позволяет получать и анализировать оперативные данные для оптимизации работы локомотивного парка, улучшая распределение локомотивов и сокращая затраты.

Математическая модель оптимизации оборота локомотивов позволяет найти баланс между доходами и затратами на эксплуатацию и обслуживание, минимизировать простои и увеличить производительность локомотивного парка на железнодорожных узлах.

Таким образом, оптимизация распределения локомотивов на железнодорожном узле играет ключевую роль в повышении эффективности всей транспортной системы, улучшая работу узлов и обеспечивая бесперебойные перевозки грузов и пассажиров.

Необходимо внедрение интеллектуальных систем планирования, которые могут оптимизировать распределение локомотивов по участкам узла с учетом текущего спроса на грузовые и пассажирские перевозки, а также состояния путей и локомотивов. Эти системы позволят заранее предсказывать потребности в локомотивах и оптимизировать их использование. В следующих исследованиях будет рассматриваться разработка методики для интеграции модели с текущими системами планирования на реальном полигоне или с использованием симуляционных данных.

Список источников

1. Сатторов С. Б. Исследование способа размещения технических станций / С. Б. Сатторов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. — 2017. — № 4. — С. 463–468.
2. Сатторов С. Б. Обоснование размещения технических станций в зависимости от числа полурейсов / С. Б. Сатторов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. — 2018. — № 2. — С. 239–246.
3. Сатторов С. Б. Вопросы развития железнодорожной линии Ахангаран-Тукимачи-Сырдарьинская / С. Б. Сатторов, А. Г. Котенко, В. Л. Белозеров // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2019. — Т. 16. — № 3. — С. 439–448.
4. Ерофеев А. А. Интеллектуальная система автоматического управления технической станцией / А. А. Ерофеев // Транспорт России: проблемы и перспективы — 2020: материалы Юбилейной Междунар. науч.-практ. конф. — СПб., 2020. — С. 92–96.
5. Ерофеев А. А. Принципы формирования управляющих решений в интеллектуальной системе управления перевозочным процессом / А. А. Ерофеев, А. Ф. Бородин // Проблемы

безопасности на транспорте: материалы XI Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. / Под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. — Гомель: БелГУТ, 2021. — С. 11–14.

6. Михеева Т. И. Модели транспортных потоков в интеллектуальных транспортных системах / Т. И. Михеева, С. В. Михеев, И. Г. Богданова // Современные проблемы науки и образования. — 2013. — № 6. — С. 216.

7. Жанказиев С. В. Интеллектуальные транспортные системы: учеб. пособие / С.В. Жанказиев. — М.: МАДИ, 2016. — 120 с.

Дата поступления: 14.10.2024

Решение о публикации: 14.12.2024

Контактная информация:

САТТОРОВ Самандар Бахтиерович — канд. техн. наук, доц.; satorovsamandar100@gmail.com

САИДИВАЛИЕВ Шухрат Умарходжаевич — канд. техн. наук, доц.; shuxratxoja@mail.ru

БОЗОРОВ Рамазон Шамилович — канд. техн. наук; ramazon-bozorov@mail.ru

Dispatching Locomotives Across a Railway Junction Using the Intelligent Planning System

S. B. Sattorov, Sh. U. Saidivaliev, R. Sh. Bozorov

Tashkent State Transport University, 1, Temiryo'Ichilar Str., Tashkent, 100069, Republic of Uzbekistan

For citation: Sattorov S. B., Saidivaliev Sh. U., Bozorov R. Sh. Dispatching Locomotives Across a Railway Junction Using the Intelligent Planning System. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 1, pp. 62–71. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-62-71

Summary

Purpose: The effective use of locomotives at a railway junction to minimize costs and downtime and maximize the locomotive fleet productivity and efficiency. This paper describes a mathematical model for optimizing locomotive turnover, which will allow finding a balance between revenues and costs of operating and servicing locomotives. **Methods:** Optimization of locomotive fleet operation is considered with the methods for linear programming and locomotive scheduling theory. **Results:** Minimizing the downtime of locomotives and their maximum loading will require accurate planning of shunting work and timely movement of locomotives to the desired sections. To ensure a balance between shunting work and train operation, it is important to allocate locomotives appropriately. Timely delivery of locomotives to trains for dispatch requires dispatchers' coordinated actions. This will lead to minimizing the locomotive downtime and maximizing the time in operation. **Practical significance:** The results of the work are important for the effective management of locomotive operation in railway transportation, which makes it more attractive for both shippers and passengers.

Keywords: Locomotives, distribution, junctions, planning, logistics, efficiency, forecasting, rolling stock, management, infrastructure.

References

1. Sattorov S. B. Issledovanie sposoba razmeshcheniya tekhnicheskikh stantsiy [Study of the method of placement of technical stations]. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo*

universiteta [Scientific and Technical Bulletin of Bryansk State University]. 2017, Iss. 4, pp. 463–468. (In Russian)

2. Sattorov S. B. Obosnovanie razmeshcheniya tekhnicheskikh stantsiy v zavisimosti ot chisla polureysov [Justification of the placement of technical stations depending on the number of semi-trip]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta* [Scientific and Technical Bulletin of Bryansk State University]. 2018, Iss. 2, pp. 239–246. (In Russian)

3. Sattorov S. B., Kotenko A. G., Belozеров V. L. Voprosy razvitiya zheleznodorozhnoy linii Akhangaran-Tukimachi-Syrdar'inskaya [Development issues of the Akhangaran-Tukimachi-Syrdarya railway line]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the St. Petersburg University of Railway Engineering]. 2019, vol. 16, Iss. 3, pp. 439–448. (In Russian)

4. Erofeev A. A. Intellektual'naya sistema avtomaticheskogo upravleniya tekhnicheskoy stantsiey [Intelligent automatic control system for a technical station]. *Transport Rossii: problemy i perspektivy — 2020: vaterialy Yubileynoy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Transport of Russia: Problems and Prospects — 2020: materials of the Jubilee Int. scientific-practical. conf.]. St. Petersburg, 2020, pp. 92–96. (In Russian)

5. Erofeev A. A., Borodin A. F. Printsipy formirovaniya upravlyayushchikh resheniy v intellektual'noy sisteme upravleniya perevozhnym protsessom [Principles of forming control decisions in an intelligent control system for the transportation process]. *Problemy bezopasnosti na transporte: materialy XI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.: v 2 ch. Ch. 1. M-vo transp. i kommunikatsiy Resp. Belarus', Bel. zh. d., Belarus. gos. un-t transp. Pod obshch. red. Yu. I. Kulazhenko* [Problems of safety in transport: Proceedings of the XI Int. scientific-practical. conf.: in 2 parts. Part 1. Ministry of Transport and Communications of the Republic of Belarus, Belarusian Railways, Belarusian State University of Transport. Under the general editorship of ed. Yu. I. Kulazhenko]. Gomel': BelGUT Publ., 2021, pp. 11–14. (In Russian)

6. Mikheeva T. I., Mikheev S. V., Bogdanova I. G. Modeli transportnykh potokov v intellektual'nykh transportnykh sistemakh [Models of traffic flows in intelligent transport systems]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education]. 2013, Iss. 6, p. 216. (In Russian)

7. Zhankaziev S. V. *Intellektual'nye transportnye sistemy: ucheb. posobie* [Intelligent transport systems: textbook]. Moscow: MADI Publ., 2016, 120 p. (In Russian)

Received: October 14, 2024

Accepted: December 14, 2024

Author's information:

Samandar B. SATTOROV — PhD in Engineering, Associate Professor;
sattorovsamandar100@gmail.com

Shukhrat U. SAIDIVALIEV — PhD in Engineering, Associate Professor; shukratxoja@mail.ru

Ramazon Sh. BOZOROV — PhD in Engineering; ramazon-bozorov@mail.ru