

МОДЕЛЬ СБАЛАНСИРОВАННОГО ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ И ПРОВОЗНОЙ СПОСОБНОСТИ УЧАСТКОВ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

А. С. Туманин¹, Н. Г. Шабалин², А. И. Васекин³, Ж. М. Мороз⁴

¹ Красноярская железная дорога, начальник дороги, г. Красноярск

² д. тех.н., ОА НИАС, профессор, г. Москва

³ к. тех.н., ОА НИАС, доцент, г. Москва

⁴к. ф-мат. н., КрИЖТ ИрГУПС, доцент, г. Красноярск

Аннотация: Решение стоящих перед Восточным полигоном задач по увеличению пропускной и провозной способности в краткосрочной перспективе возможно за счет внедрения инновационных технологий организации движения поездов на уже существующей инфраструктуре. Представлена базовая модель, позволяющей определить точку технологического равновесия (E_i), которая показывает как с минимально возможными затратами (I) на действующей инфраструктуре (N) обеспечить выполнение планового объема перевозок (провозная способность $G \geq \Sigma p^s_{\text{план}}$). На примере Красноярской ж.д. выполнен анализ экономически обоснованных стратегий увеличения пропускной и провозной способности за счет повышения средней массы поезда или средней участковой скорости.

Ключевые слова: пропускная способность, провозная способность, Восточный полигон, моделирование, точка технологического равновесия

Abstract: Solving the problems facing the Eastern training ground to increase throughput and carrying capacity in the short term is possible through the introduction of innovative technologies for organizing train traffic on existing infrastructure. A basic model is presented that makes it possible to determine the point of technological equilibrium (E_i), which shows how to ensure the implementation of the planned volume of transportation (carrying capacity (G) $\geq \Sigma p^s_{\text{plan}}$). Using the example of the Krasnoyarsk Railway, an analysis of economically feasible strategies for increasing throughput and carrying capacity by increasing the weight of the train or sectional speed was carried out.

Key words: throughput, carrying capacity, Eastern range, modeling, technological equilibrium point.

Динамичный рост объемов перевозок в направлении Дальнего Востока требует увеличения пропускных и провозных способностей Восточного полигона. Объем импорта и экспорта растёт ежегодно, но уже сейчас БАМ и Транссиб работают на пределе пропускной способности [1]. Решение данного вопроса является актуальным в связи с поставленной в Правительственной программе по Восточному полигону задачи об увеличении объемов перевозок до 182 млн тн в 2025 году [2]. Поэтому достижение оптимального баланса между спросом (провозная способность - 182 млн тн к 2025 году) и предложением (пропускная способность - 129 пар поездов) является одной из ключевых задач развития ОАО «РЖД» на Восточном полигоне [3].

Решение этих ключевых проблем, в долгосрочной перспективе, зависит от объёма инвестиций, вложенных как в развития объектов станционной инфраструктуры, развёртывания автоблокировки с подвижными блок-участками, так и в усиление устройств энергоснабжения и путевого комплекса. В краткосрочной перспективе решение стоящих перед Восточным полигоном задач возможно за счет внедрения инновационных технологий организации движения поездов, что позволит значительно увеличить пропускную и провозную способности на уже существующей инфраструктуре с минимальным объемом инвестиций. Цель статьи - определить текущую точку технологического равновесия (E_i), и на этой основе однозначно установить существующие проблемы и выбрать стратегическое направление их преодоления, на примере Красноярской железной дороги.

Анализ работы Красноярской железной дороги за период 2007-2023 годы

Для решения поставленной задачи был проведен анализ эксплуатационных показателей работы Красноярской железной дороги за период 2007-2023 годы. Результаты проведенного анализа показывают, что на дороге, как и на Восточном полигоне в целом, с 2007 года проводилась направленная работа по увеличению средней массы поезда. Данные представлены на рисунке 1. Обращает на себя внимание тот факт, что одновременно с увеличением средней массы поезда (в 2013 г. - 3 980 т, в 2023 г. - 4 399 т) снизилась на **19%** средняя участковая скорость с **48,8** до **39,6** км/час. Снижение средней участковой скорости повлекло увеличение рабочего парка локомотивов. В тоже время отметим, что в 2007-2009 годах при дефиците локомотивного парка среднесуточная производительность локомотива была выше на **9%** чем в 2023 году (**2740** против **2502** тыс.т-км). Из графика видно, что резкое увеличение парка локомотивов на **113** ед (почти в 2 раза) за 16 лет со **124** ед в 2007 году до **237** ед в 2023 году привело к снижению средних значений участковой и технической скоростей за этот период.

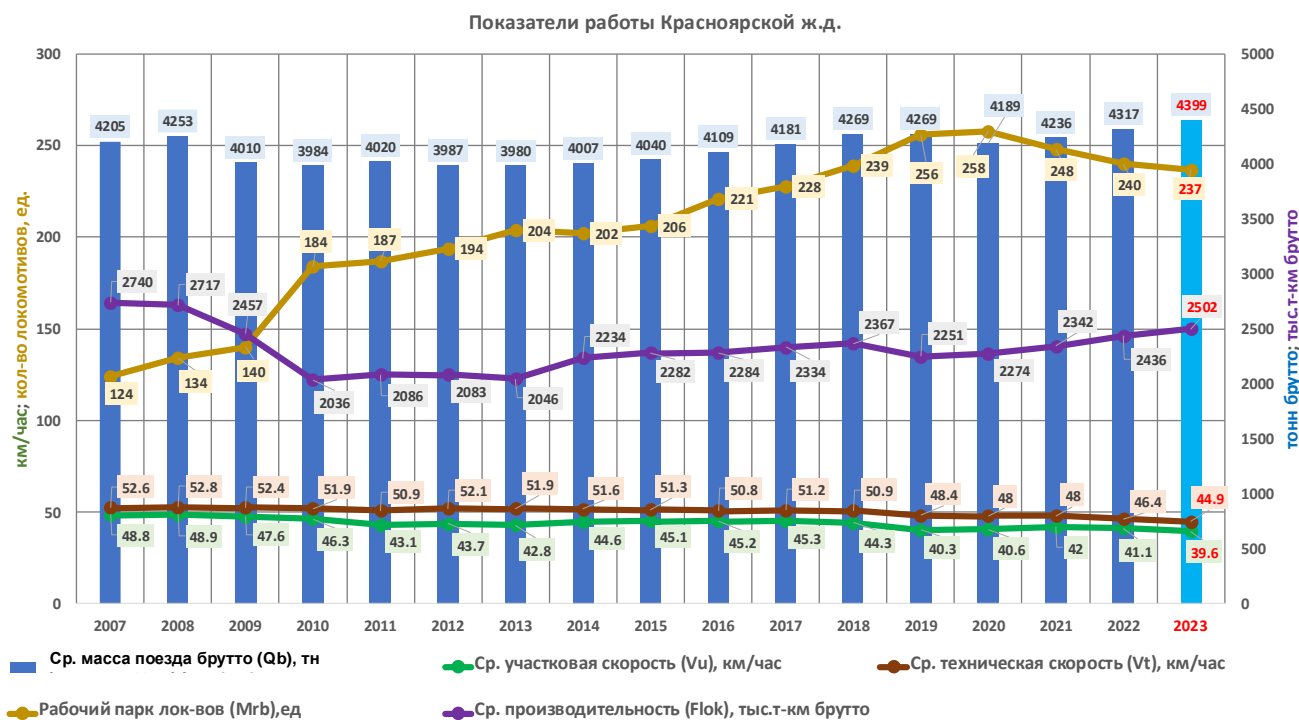


Рисунок 1 Основные показатели работы Красноярской железной дороги в период 2007-2023 года: средняя масса поезда брутто, тонн; средняя участковая скорость, км/ч; средняя

техническая скорость, км/ч; рабочий парк локомотивов, ед; средняя производительность локомотива, тыс.т-км брутто.

В 2023 году в соответствии с целевой программой (таблица 1) необходимо было обеспечить суммарную провозную способность $\Gamma \approx 173$ млн тн, а пропускную способность $N=101$ пару поездов.

Таблица 1 Целевые показатели модернизации ж.д. инфраструктуры Восточного полигона

Год:	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2030	2032
Показатель:								
Суммарная провозная способность (Γ), млн тн	132	144	144	158	173	182	210	270
Суммарная пропускная способность (N), пар поездов	95	101	101	101	101	129	≈ 144	≈ 185

По Красноярской железной дороге реальное выполнение составило **90** пар поездов от **101** запланированной (по участку Мариинск – Юрты $N \approx 70$ пар поездов, по участку Междуреченск – Тайшет $N \approx 20$ пар поездов). Таким образом дефицит составил **11** пар поездов. В текущем 2024 году суммарная провозная способность должна составить $\Gamma=182$ млн,тн, а пропускная $N =129$ пар поездов. В настоящее время динамика эксплуатационной работы 2023 года сохраняется. Таким образом можно сделать вывод, что при сохранении тенденции дефицит ежегодно будет возрастать.

Базовая модель повышения эффективности процесса перевозок

Как было отмечено выше в краткосрочной перспективе для изменения ситуации, до завершения инвестиционных программ, есть только один способ - внедрение инновационных технологических решений в области организации движения поездов. Очевидно, что стратегия на увеличение только средней массы поезда ограничена потенциальными возможностями инфраструктуры, тягового энергоснабжения, подвижного состава и локомотивного парка.

Определить оптимальные, экономически обоснованные сценарии управления объектами и процессами для выполнения в 2030 году целевого задания провозной способности $\Gamma=210$ млн тн и пропускной $N \approx 144$ пары поездов, можно, но для этого предлагается определить базовую модель повышения процесса перевозок. На рисунке 2 представлена базовая модель повышения эффективности процесса перевозок. Ключевым результатом имитационного моделирования является определение точки технологического равновесия (E_i), которую можно определить как – возможность на действующей инфраструктуре (N) выполнить плановый объём перевозок ($\Gamma \geq \Sigma p_{план}^s$) с минимальными затратами ($npu I \rightarrow min$)

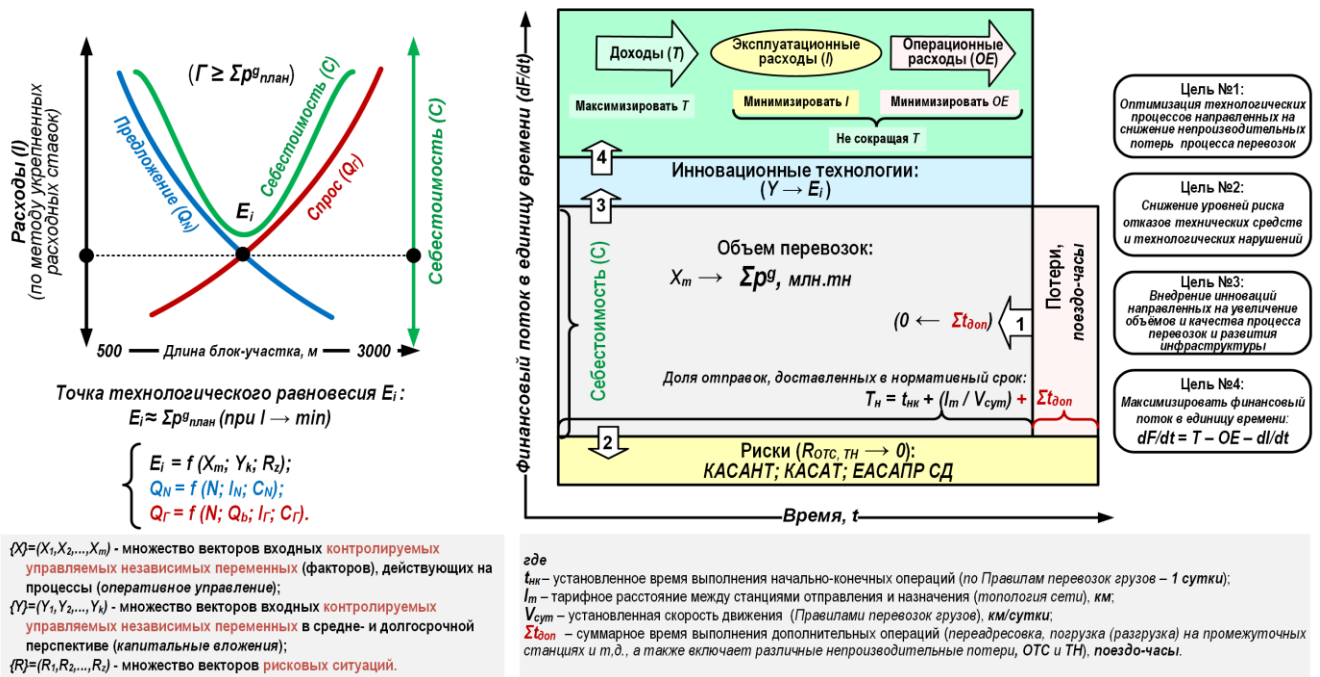


Рисунок 2. Базовая модель повышения эффективности процесса перевозок.

При нахождении E_i будет возможно с минимальными затратами (I) обеспечить провозную способность ($\Gamma \geq \Sigma p^g_{план}$) на действующей инфраструктуре (N), а значит выполнить плановый объём перевозок ($\Sigma p^g_{план}$). Говоря рыночным языком сбалансировать спрос (провозная способность) и предложение (пропускная способность).

Цели, к которым должна стремиться система для принятия адекватных управленческих решений в оперативном, кратко-, средне-, и долгосрочном периодах можно сформулировать следующим образом.

Цель №1: Оптимизация технологических процессов направленных на снижение непроизводительных потерь процесса перевозок ($\Sigma t_{доп} \rightarrow 0$).

Цель №2: Снижение уровней риска отказов технических средств и технологических нарушений ($R_{отс, тн} \rightarrow 0$).

Цель №3: Внедрение инноваций направленных на увеличение объемов и качества процесса перевозок и развития инфраструктуры.

Цель №4: Увеличение финансового потока в единицу времени (dF/dt).

Плановый объём перевозок, скорость и срок доставки грузов являются важнейшими показателями, по которым оценивается качество работы железнодорожного транспорта. За невыполнение сроков доставки грузов ОАО «РЖД» несет не только материальную ответственность перед грузополучателями, но и теряет существенную часть доходов (T) из-за потери погрузочных ресурсов. Процесс управления, направленный на комплексное снижение времени выполнения дополнительных операций и потерь поездо-часов ($\Sigma t_{доп} \rightarrow 0$), оказывает положительное влияние на увеличение коэффициента надежности ($R_{отс, тн} \rightarrow 0$), использования наличной пропускной способности и увеличения количества отправок, доставленных в нормативный срок (T_n). Контроль времени выполнения дополнительных операций и потерь

поездо-часов ($\Sigma t_{дон}$) должен проводиться по всем этапам технологического процесса и на всем маршруте следования грузового поезда от станции отправления до станции назначения.

На рисунке 3 представлен график определения экономически обоснованной точки технологического равновесия (график построен по данным 2023 года). Исходными данными являются провозная способность $\Gamma=173$ млн тн, средняя масса поезда брутто $Q_b = 4399$ тн, средняя участковая скорость $V_u \approx 40$ км/час.

Фактическая точка технологического равновесия ($E_{40}^{ФАКТ}$) соответствует провозной способности $\Gamma \approx 97$ млн тн, для «перехода» в плановую точку ($E_{40}^{ПЛАН}$) необходимо выбрать соответствующую стратегию. Рассмотрим три возможных стратегии:

Первая (Y_k), капитальные вложения, направленные на сокращение длины блок-участков с 2300 м до гарантированного тормозного пути;

Вторая (X_m), оперативное управление, направленное на увеличение средней участковой скорости (V_u) с 40 км/ч и более в зависимости от тяговых расчетов на конкретных участках железных дорог;

Третья (X_m), увеличение средней массы поезда Q_b с 4399 тн до возможностей инфраструктуры и перспективных технологий, например, увеличение в графике движения количества виртуально соединённых поездов.

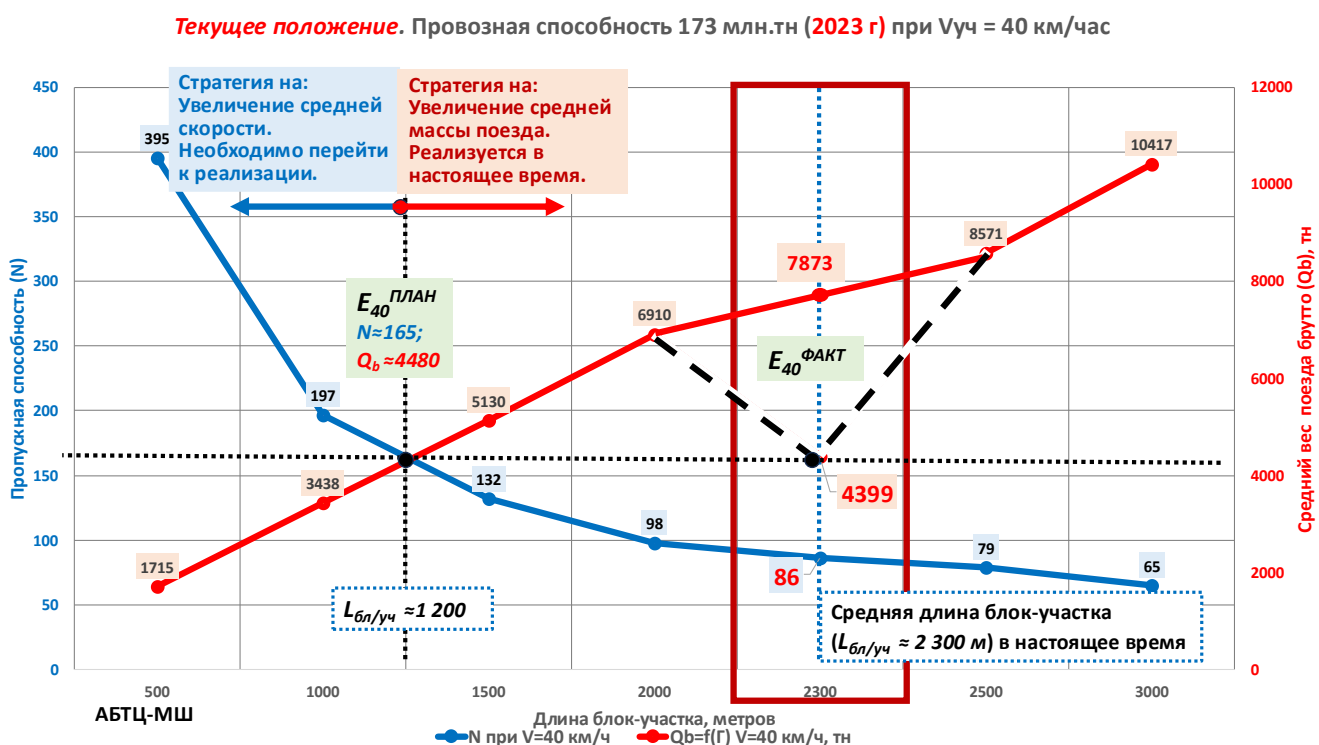


Рисунок 3. Зависимость пропускной способности (N) от длины блок-участка ($L_{бл/уч}$, м синяя линия) при $V_{уч} = 40$ км/ч. Зависимость средней массы поезда брутто (Q_b - красная линия) от пропускной способности (N) и планового задания ($\Gamma \geq \Sigma p_{план}^g = 173$ млн тн).

Анализ предложенных стратегий показывает, что реализация первой стратегии требует значительных инвестиций и значительного времени завершения строительства. Реализация второй стратегии ограничена максимально возможной средней участковой скоростью $V_u \lesssim 55$

км/ч. Реализация третьей стратегии ограничена возможностями инфраструктуры, тягового энергоснабжения и подвижного состава, но также надо отметить, что она противоречит второй стратегии.

Реализация стратегий, направленных на увеличение средней скорости движения и средней массы поезда, связана как с увеличением, так и с уменьшением затрат на их осуществление. Для оценочных расчетов затрат на планируемые мероприятия, при проведении в дальнейшем имитационного моделирования, наиболее подходит метод укрупнённых расходных ставок, что позволяет выбрать экономически оптимальный вариант сценариев развития ситуаций и управленческих решений.

Расчет затрат по методу «Укрупнённых расходных ставок» применяется для оценки эксплуатационной деятельности дорог в текущих или перспективных условиях. Для этого методом единичных расходных ставок по особым формулам рассчитывают расходы, приходящиеся на единицу эксплуатационной работы, например, 1 поезд-км, 1 поезд-час, 1 техническая единица и т.п. Умножив данные расходы (укрупненные расходные ставки) на величину соответствующих измерителей, приходящихся на заданный объем работы, получают расходы, связанные с измерителем в конкретных условиях.

Более подробно распределение расходов на реализацию второй и третьей стратегии показаны на Рисунке 4.

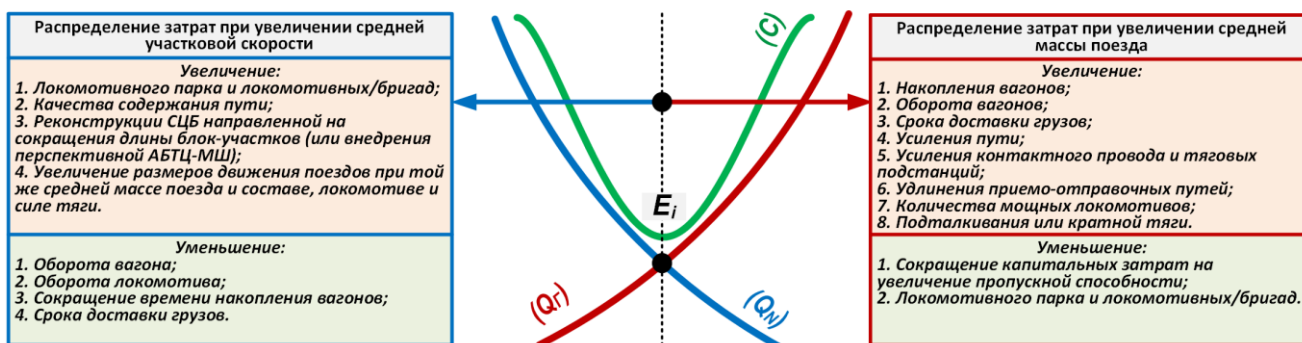


Рисунок 4 Стратегии повышения пропускной и провозной способности за счет увеличения средней участковой скорости (синяя линия) или увеличения средней массы поезда (красная линия).

Необходимо отметить, что реализация второй стратегии (X_m) - оперативное управление, направленное на увеличение средней участковой скорости, приведет к увеличению затрат на: локомотивный парк и локомотивные бригады; качество содержания пути; реконструкцию СЦБ для уменьшения длины блок-участков; увеличение размеров движения поездов при той же средней массе поезда и составе, локомотиве и силе тяги. Но при этом произойдет уменьшение затрат на: оборот вагона; оборот локомотива; сокращение времени накопления вагонов; срок доставки грузов.

Реализация третьей стратегии (X_m) – увеличение средней массе поезда, приведет к увеличению затрат на: увеличение количества мощных локомотивов, накопление вагонов, оборот вагонов; срока доставки грузов; усиление пути, усиление контактного провода и тяговых подстанций; удлинение приёмно-отправочных станционных путей. Но при этом

произойдет уменьшение затрат на: локомотивный парк и локомотивные бригады. А в целом приведет к некоторому сокращению капитальных затрат на увеличение пропускной способности.

Вывод: в сложившейся ситуации необходимо в первую очередь разрабатывать «точечные» технологические решения, например, вождение виртуально соединённых поездов, применение частично-пакетного графика и другие, во-вторую очередь параллельно, исходя из местных условий и возможностей, в различных пропорциях реализовывать все три стратегии.

Использование имитационного моделирования для решения задач повышения пропускной и провозной способности

Цели моделирования, заключаются в определении плановых состояний равновесия (E_i), к которым должна стремиться система для принятия адекватных управленческих решений в оперативном, кратко-, средне- и долгосрочном периодах.

Модель нужна для того, чтобы понять, как устроены конкретные объекты (ЦФТО, ЦД, ЦТ, ЦДИ, ТрансЭнерго), какие внутренние технологические связи, технические характеристики, перспективы развития и взаимодействия с окружающей средой влияют на плановое состояние (E_i). Также модель поможет определить оптимальные сценарии управления объектами или процессами при заданных целях и критериях. Модель поможет спрогнозировать прямые и косвенные последствия реализации управленческих решений на объект и плановое состояние (E_i). На рисунке 5 представлена модель как инструмент исследования.

Синтез имитационной модели на основе системного подхода

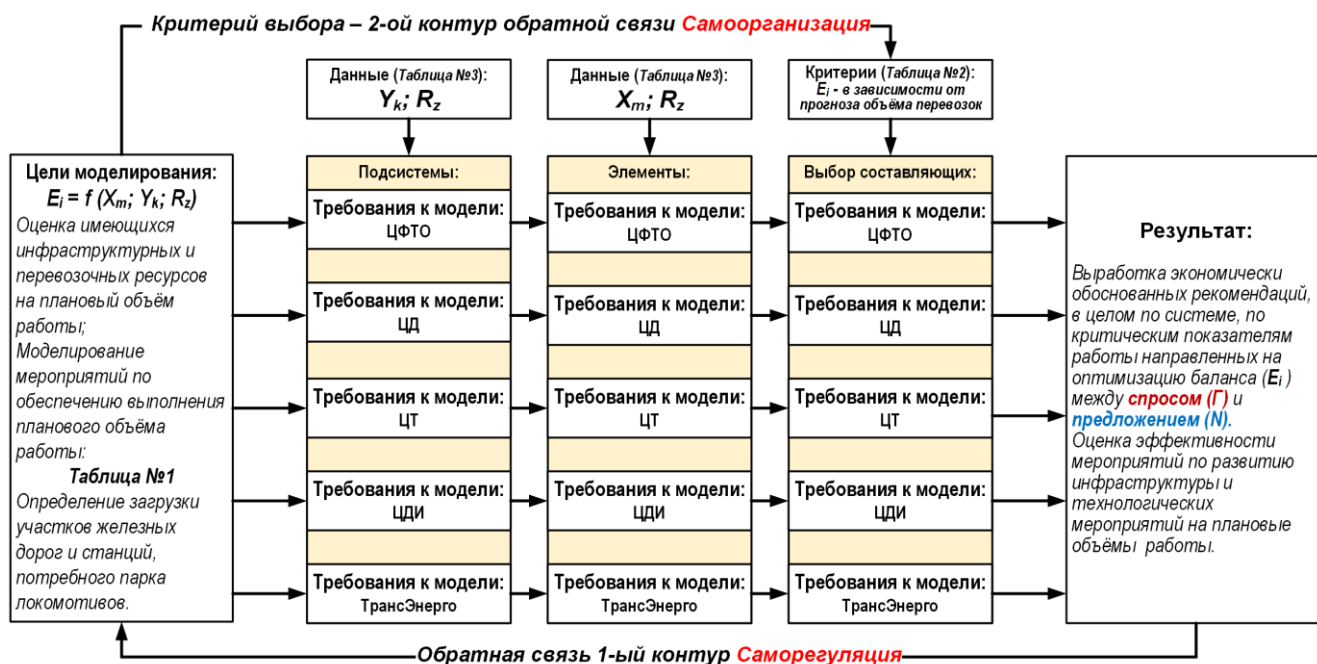


Рисунок 5 Синтез имитационной модели на основе системного подхода

Данная модель позволяет на основе регулирования исходными параметрами Y_k, X_m, R_z , представленными в таблицах 2 и 3, прогнозировать поведение системы. Результатом

моделирования должна быть выработка экономически обоснованных рекомендаций, в целом по системе с учетом критических показателей работы, направленных на оптимизацию баланса E_i между спросом и предложением.

При составлении модели должны быть отражены отдельные стороны функционирования системы, направленные на решение поставленной целевой установки.

Таблица №2 «Критерии выбора»

Подсистемы:	ЦФТО	ЦД	ЦТ	ЦДИ	ТрансЭнерго
Критерий выбора:	Прогноз объемов перевозок в кратко – и среднесрочной перспективе	Технологические мероприятия по реализации плановой провозной способности	Обеспечение плановой провозной способности локомотивами и л/бригадами	Обеспечение плановой пропускной способности на объем перевозок	Обеспечение плановой провозной способности тяговым энергоснабжением
Показатель результативности (KRI):	прогноз / факт $k_{цфто} \leq 0,95$	план / факт $k_{цд} \leq 0,95$	план / факт $k_{цт} \leq 0,95$	план / факт $k_{цди} \leq 0,91$	план / факт $k_{цэ} \leq 0,95$
В Главный критерий (<i>классически</i>) входят 4 составляющие: результат, качество, время, ресурсы . Решающими факторами должны быть первые два. Тогда как время и ресурсы (<i>материальные, финансовые, кадровые</i>) становятся функционально зависимыми от результата и качества.					

Таблица №3 «Контролируемые и не контролируемые данные»

Подсистемы:	ЦФТО	ЦД	ЦТ	ЦДИ	ТрансЭнерго
Данные:					
X_m Контролируемые и оперативно управляемые показатели	План перевозок; $\sum p^g$ - перевезено грузов, тыс.тн; $\sum u_{gr}$ - погрузка, вагонов; Выручка от грузовых перевозок, тыс.руб.	План формирования; Техническое нормирование; График движения; $\sum (pl)_b; Q_b; F_{lok}; S_{lok}; \sum MS; \sum M_{rb}; V_i; V_u; V_m; F_w; S_w; T_w; \sum u; t_{ir}; \sum nt_{dv}$	Процент неисправных локомотивов по видам тяги; Процент вождения поездов в режиме автоведения; $F_{lok}; S_{lok}; \sum t_{dv}^{lok}; \sum t_{st}^{lok}; V_i^{lok}; V_u^{lok}; \sum M_{rb}$	V_u - Предупреждения об ограничении скорости по состоянию пути; Балловая оценка пути; Оценка качества технического обслуживания устройств сигнализации и связи, балы; $\sum n^g s$ - Пробег грузовых вагонов, общий, тыс. вагоно-км;	V_t - Предупреждения об ограничении скорости по состоянию тягового энергоснабжения; Балловая оценка устройств энергоснабжения
Коэффициенты готовности технических средств					
Единичные расходные ставки приходящиеся на измеритель эксплуатационной работы					
Y_k Контролируемые и управляемые показатели только в средне и долгосрочной перспективе	Объем предоставляемых услуг	Инфраструктурные ограничения станций	Типы и характеристики локомотивного парка; Оборудование локомотивного парка перспективными устройствами связи и автоматики; Тяговые расчеты	План и профиль пути; Внедрение перспективных систем интервального регулирования;	Типы и характеристики тяговых подстанций и контактного провода; Тяговые расчеты
Нормативные и законодательные ограничения					
R_z - риски	КАСАТ; КАСАНТ; ЕАСАПР; Форс мажорные обстоятельства				

Системный подход к построению имитационной модели использует принцип от общего к частному. Основой модели является цель, то есть понимание для чего нужна модель. Формирование абстракций нескольких уровней (в данной модели достаточно 3-ёх) является вторым шагом. Построение модели начинается с формулировки главной цели моделирования – нахождения точка технологического равновесия:

$$E_i = f(X_m; Y_k; R_z)$$

$$E_i \approx \Sigma p_{\text{план}}^g (\text{при } I \rightarrow \text{min})$$

Затем на основе фактических исходных данных, ограничений (нормативных и законодательных) и цели функционирования формируются требования к модели на всех уровнях управления. На базе требований осуществляется, после некоторого количества «прогонов» с тестовыми показателями, выбор вариантов достижения поставленной цели удовлетворяющей принятым критериям.

Наличие в модели двух контуров обратной связи позволяют получить системе следующие свойства. Возможность проверки результатов работы имитационной модели на соответствие полученного набора показателей исходной цели – это саморегуляция (первый контур обратной связи). Целенаправленное изменение модели до возможно более полного совпадения целевых показателей с очередным экспериментом – это самоорганизация (второй контур обратной связи, включающий память о реакциях модели на сделанные изменения).

Также построение модели позволяет прогнозировать свойства и поведение объектов как внутри компании, так и на внешнем окружении. Это так называемая прогнозирующая роль модели. Управляющей ролью является возможность управлять объектами, отбирая наилучшие воздействия путём испытания их на модели.

Заключение

Полученные результаты показали, что для увеличения пропускной и провозной способности Восточного полигона в краткосрочной перспективе в первую очередь надо разрабатывать «точечные» технологические решения, например, вождение виртуально соединённых поездов, применение частично-пакетного графика и параллельно, исходя из местных условий и возможностей, в различных пропорциях реализовывать все три стратегии, приведенные выше.

Список литературы

1. Перевозчики рассказали об оперативном решении логистических проблем на Восточном полигоне / ИА «ТАСС» // ОАО «РЖД» : [официальный сайт] URL: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=207132> (дата обращения: 10.12.2023).
2. Провозная способность Восточного полигона по итогам 2022 года // ОАО «РЖД» : [официальный сайт] URL: <https://company.rzd.ru/ru/9397/page/104069?id=280126> (дата обращения: 10.12.2023).
3. Восточный полигон – Транссиб и БАМ : перспективы развития в 2023-2024 гг. // ОАО «РЖД» : [официальный сайт] URL: <https://cargo.rzd.ru/ru/9787/page/103290?id=19722#main-header> (дата обращения: 10.12.2023).
4. Васекин, А. И. Новые технологии в бизнес-модели "цифровая железная дорога" / А. И. Васекин, Ж. М. Мороз // Цифровизация транспорта и образования: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 125-летию

железнодорожного образования в Сибири, Красноярск, 09–11 октября 2019 года. – Красноярск: Красноярский институт железнодорожного транспорта - филиал ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», 2019. – С. 317-323. – EDN YVIGUL.

5. На Восточном полигоне объем контейнерного импорта обогнал экспорт в 2,2 раза : Также за восемь месяцев 2023 года удалось сэкономить более 1 млрд рублей и дополнительно провезти почти 5 млн тонн грузов / ИА «ТАСС» // Информационное агентство ТАСС : [официальный сайт] URL: <https://tass.ru/ekonomika/18718095> (дата обращения: 10.12.2023).
6. Розенберг, Е. Н. Цифровая железная дорога - путь в будущее / Е. Н. Розенберг // Железнодорожный транспорт. – 2017. – № 4. – С. 36-41. – EDN YPTUFB.
7. Розенберг, Е. Н. О стратегии развития цифровой железной дороги / Е. Н. Розенберг, В. В. Батраев // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО РЖД. – 2018. – № 1. – С. 9-27. – EDN YSLALA.
8. Рыжаков, С. А. Система интервального регулирования движения поездов / С. А. Рыжаков // Молодежная наука : Труды XXV Международной студенческой научно-практической конференции, Красноярск, 22–24 апреля 2021 года. Том 5. – Красноярск: Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», 2021. – С. 115-119. – EDN CGWTYF.