

УДК 656.21

## ПРИМЕНЕНИЕ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ В ИМИТАЦИОННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ОБЪЕКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Шепель А.С. (Санкт-Петербург)

Для качественной разработки комплекса общих технических и технологических решений по развитию объектов железнодорожной инфраструктуры используются инструменты имитационного моделирования [1,2]. Создано большое количество универсальных и специализированных систем моделирования работы транспорта, многие из которых успешно используются в России. Большинство систем имеют схожие возможности, наиболее часто упоминаемые и типичные: Arena, Anylogic, AwroraW, ИСУЖТ ТС, Enterprise Dynamics, Extendsim Pro, Flexsim, Simul8 Professional, Plant Simulation, OpenTrack, Villon, ИСТРА, ИМЕТРА и др. В их числе мультиагентные системы: NetLogo, VisualBots, REPASt, Smart Railways и др.; специализированные программные продукты: PASSER, PROGO, SOAP84, Synchro, ТЕРАС/Н ОSTOP, TRAN SYT-7F, TSDWIN, TS/PPDraft, SATURN, TransCad, EMME/2, TRIPS, DRACULA, PARAMICS, VISSIM, AIMSUN, PTV и др. Проблемы решаются на основе различных подходов в моделировании, однако всем необходимым требованиям для исследования проектов развития объектов железнодорожной инфраструктуры в законченном виде не отвечает ни один продукт [3]. Теоретически возможно учесть занятие каждого элемента объекта инфраструктуры, задать управляющие воздействия для распределения ресурсов, однако придется вручную прописывать в модели каждое использование ресурса, что усложняет и без того весьма трудоемкий процесс построения модели, требует повышенной внимательности, профессионализма и широкого спектра компетенций технологов. Важный аспект при создании имитационной модели заключается в том, что функциональные роли расчетного элемента в модели и в действительности должны совпадать [4]. Таким образом, методам имитационного моделирования работы железнодорожной инфраструктуры требуется структурирование и формализация процессов создания моделей, упрощение подготовки исходных данных.

Управляющие воздействия по решению конфликтов между операциями из-за занятости ресурсов оказывают долгосрочные влияния в течение всего периода моделирования. Формализация этих воздействий позволит уточнить влияние различных факторов на пропускную и перерабатывающие способности, «узкие места»; сократить продолжительность и трудозатраты на этапах отладки моделей и анализа результатов моделирования.

В имитационном моделировании решение конфликтов между операциями из-за занятости ресурсов обычно производится на основе:

1. Планирования (оптимизации расписания) [5]. Разрешение конфликтных ситуаций исходя из соотношений по показателям оценки потерь из-за невыполнения краевых условий и ограничений на неразрывность работ и максимизации гамильтониана, что в целом позволяет оптимизировать поток операций. Но потребует модифицировать алгоритмы планирования под каждый отдельный инфраструктурный

объект для возможности учета вариантности распределения ресурсов с учетом приоритизации транспортных потоков.

2. Алгоритмов на базе очереди событий (в частности бронирование ресурсов на основе приоритетов) [6-10].

Рассмотрим подробно результат применения алгоритмов на базе очереди событий. Для примера разберем простой пример на схеме *стрелочной горловины* [2] (рисунок 1) с  $n$  параллельными ходами и  $(n+1)$  подходами с каждой стороны по решению конфликта, где нужно определить задерживаемую операцию.

Входными параметрами будут являться:

–  $T$  (расписание транзактов операций);

$T = \{T_1; T_2; T_3; T_4\}, T_1 = 10:00; T_2 = 10:05; T_3 = 10:07; T_4 = 10:10;$

–  $P$  (приоритет операций);

$P = \{P_1; P_2; P_3; P_4\}, P_1 = 4; P_2 = 1; P_3 = 3; P_4 = 2;$

–  $t$  (продолжительность выполнения операции);

$t = \{t_1; t_2; t_3; t_4\}, t_1 = t_2 = t_3 = t_4 = 00:15;$

–  $K$  (корреспонденция передвижений операций).

$K = \{K_1; K_2; K_3; K_4\}, K_1 = \overrightarrow{Cc}, K_2 = \overrightarrow{Dd}, K_3 = \overrightarrow{Bb}, K_4 = \overrightarrow{Aa};$

На выходе ожидается:  $T'$  (модельное расписание выполнения операций).

$T' = \{T'_1; T'_2; T'_3; T'_4\}.$

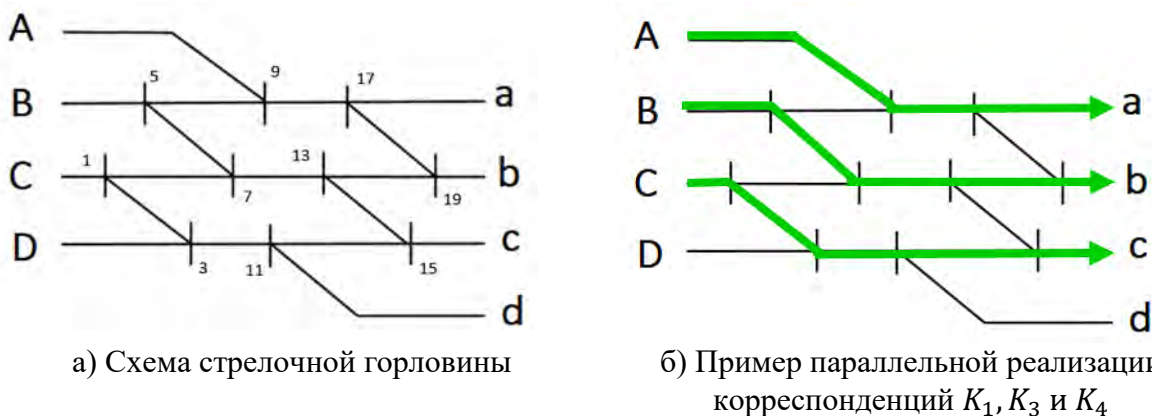


Рис. 1. Стрелочная горловина с тремя параллельными ходами и четырьмя подходами

Для упрощения рассматриваемой ситуации примем маршрутное размыкание секций. Следовательно, в интервал времени [10:00-10:15] возникает конфликтная ситуация по использованию ресурсов стрелочной горловины и необходимо определить операции для реализации и задержки. Стоит отметить возможность параллельной (без конфликта) реализации корреспонденций:  $K_1 || K_3 || K_4$  (рисунок 1.б);  $K_2 || K_3 || K_4$ ,  $K_1 || K_2 || K_4$ ,  $K_1 || K_2 || K_3$ . Логично было бы реализовать 3 наиболее высокоприоритетные операции при условии возможности параллельного выполнения по трем параллельным ходам и задержать наименее приоритетную операцию. Т.о. ожидаемый результат:

$T'_1 = 10:00; T'_3 = 10:07; T'_4 = 10:10; T'_2 = 10:15.$  Реализация второй операции произойдет в момент времени освобождения ресурсов из под первой операции (для упрощения ситуации не рассматривается время задания маршрута):  $T'_2 = T'_1 + t_1$ . Однако, алгоритмы на базе очереди событий дают иной результат.

При потоковом пропуске операций и сравнении их приоритетов:

Занимаем ресурсы под первую операцию – стрелки №№ 1,7,13,15 или №№ 1,3,11,15, затем под вторую – стрелки №№ 3,11 (возможно ищем другой вариант реализации операций во избежание пересечений по стрелкам №№ 3,11), после под третью – стрелки №№ 5,9,17,19. В момент времени 10:10 мы получим занятость требуемых ресурсов под четвертую операцию и не сможем ее реализовать.

При бронировании ресурсов под высокоприоритетные операции:

Занимаем ресурсы под первую операцию – стрелки №№ 1,7,13,15 или №№ 1,3,11,15, затем под третью – стрелки №№ 5,9,17,19 или №№ 5,7,13,19 (возможно ищем другой вариант реализации операций во избежание пересечений по стрелкам №№ 7,13), после под четвертую – стрелки №№ 9,17. Но если под первой операцией заняты стрелки №№ 1,7,13,15, под третью – стрелки №№ 5,9,17,19, то четвертая операция – задерживается. Данный нюанс относится к правилу задания маршрутов – для обеспечения максимальной параллельности передвижений, в эксплуатационной работе используется последний съезд из вариантных (тогда четвертую операцию всегда задерживаем), если это правило опустить, то в 50% можем получить реализацию первой операции по стрелкам №№ 1,3,11,15, третьей – №№ 5,7,13,19, четвертой – №№ 9,17. И тогда мы получим занятость требуемых ресурсов под вторую операцию и не сможем ее реализовать.

Перемещение транзактов в очередь на поступление в транспортную систему влияет на образование следующих конфликтных ситуаций и может вызывать дополнительные простои операций на моделируемой инфраструктуре, что в свою очередь влияет на общую загрузку инфраструктуры, пропускную и перерабатывающую способности, а также на выработку мероприятий по развитию моделируемого объекта. При более динамичных условиях (без принятых упрощений) влияние на общую загрузку инфраструктуры сильнее.

Таким образом, алгоритмы на базе очереди событий при многовариантных пересечениях (трех и более) операций по используемым ресурсам дают ошибочные результаты, которые при плотном транспортном потоке оказывают долгосрочные влияния в течение всего периода моделирования на порядок выполнения операций, их простои и задержки.

Для нивелирования ошибок, связанных с обработкой транзактов по алгоритмам на базе очереди событий, формализуем макро-алгоритм распределения транзактов из предварительного расписания в итоговое расписание в транспортной системе (рисунок 2а).

**Блок 1-2** – Создание Предварительного Расписания (ПР) – хранит информацию о текущей операции и её первичных потомках в каждой категории:

$$\{\text{name}(i), T_t^i; \text{name}(i+1), T_t^{i+1}; \dots\}.$$

$T_t^i$  – Время транзакта – предварительное время транзакта на обработку операции. Сортировка значений в предварительном расписании по критериям в порядке убывания степени важности:

- Для моделирования при потоковом пропуске операций и сравнении их приоритетов: 1.  $T_t^i$  – min; 2. Приоритет – max;
- Для моделирования при бронировании ресурсов под высокоприоритетные операции: 1. Приоритет – max. 2.  $T_t^i$  – min.

**Блок 3** – Выбор Операции.

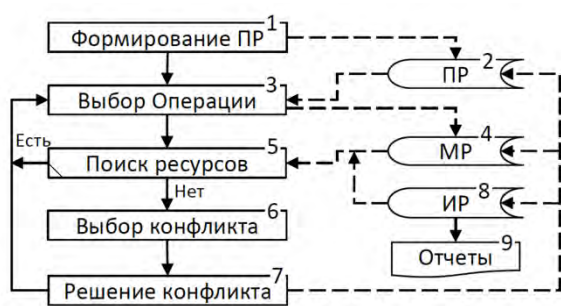
Выбор первого значения из ПР и перенос в **блок 4** – Модельное Расписание (МР)

**Блок 5** – Поиск ресурсов для операции.

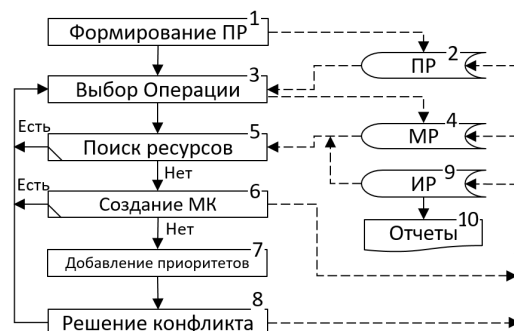
Определение вариантных ресурсов. Расчет продолжительности занятия ресурсов в операции. В интервал требуемой занятости ресурса – ресурс свободен или не требует обязательной свободности? Да – Выбор варианта со свободными ресурсами для операции – **Переход к блоку 3**. Нет – **Переход к блоку 6**.

**Блок 6** – Выбор конфликтующих операций. Приоритет текущей операции среди пересекающихся –наименьший? Да – Определение наименьшего времени освобождения требуемых ресурсов – **Переход к блоку 7**. Нет – Выбор пересечения с наименее приоритетной операцией – **Переход к блоку 7**.

**Блок 7** – Решение конфликта. Корректируется время транзакта для менее приоритетной операции по **правилам эксплуатационной работы в системе** (выработка решений о непроизводительном простое, разделении маршрута или изменении времени подвода к транспортной системе). Решение передается в ПР (транзакты потомков в предварительном расписании корректируются) в соответствующей сортировке положению. Наиболее приоритетная операция передается в итоговое расписание (ИР). Если в ИР передана последняя операция – формируются отчеты. Из МР операции исключаются.



а) Макро-алгоритм на базе очереди событий.



б) Макро-алгоритм с учетом создания МК.

Рис. 2. Макро-алгоритмы распределения транзактов из предварительного расписания в итоговое расписание в транспортной системе (станция/узел)

Ошибки, связанные с распределением транзактов, возникают на этапе выбора конфликтов при обработке вариантных и параллельных операций. Для учета многообразия конфигураций реализации операций добавим глубокую проверку решения конфликтов – создание матрицы конфликтов (МК). На рисунке 2б приведен макро-алгоритм распределения транзактов из предварительного расписания в итоговое расписание, на рисунке 3 – пример раскрытия макро-блока МК.

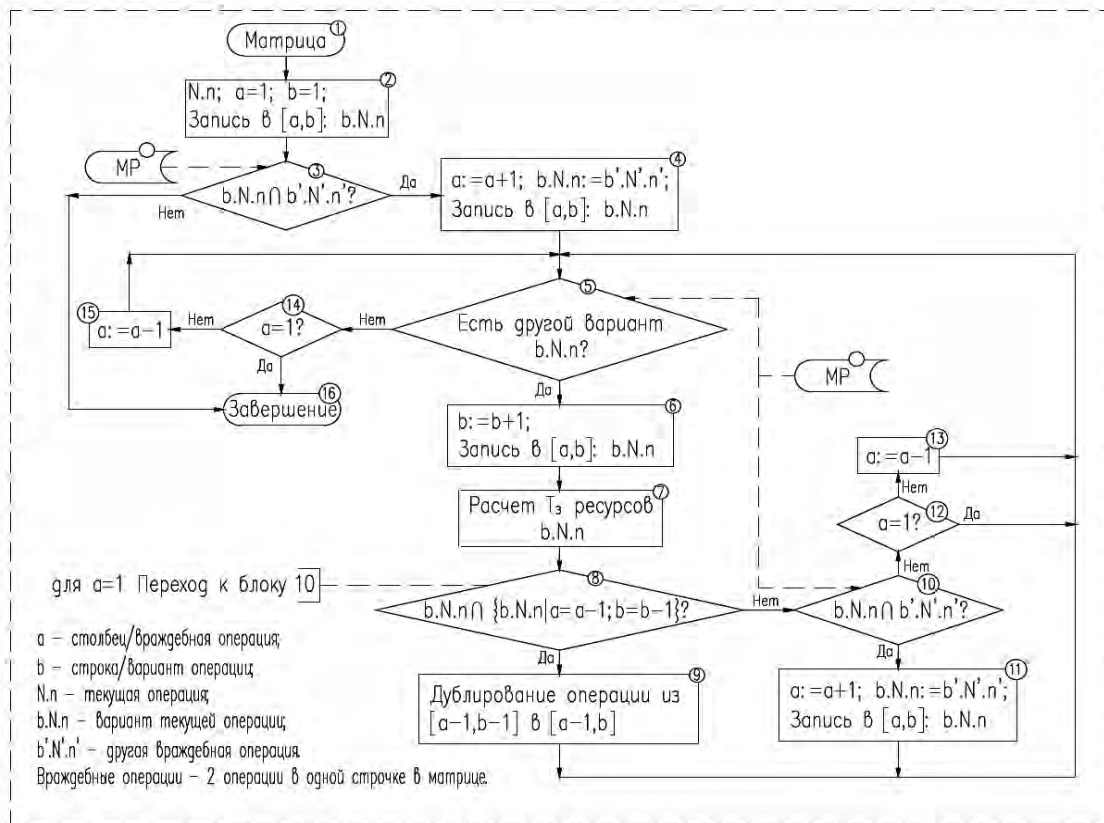


Рис. 3. Детализация макро-блока «Создание МК»

Имитационные эксперименты с глубокой проверкой решения конфликтов по сравнению с алгоритмами на базе очереди событий показывают более достоверные результаты. В результате пропуск поездо- и вагонопотоков по железнодорожной инфраструктуре в модели оказывается аналогичным работе квалифицированного персонала службы движения, однако при использовании глубокой проверки различных вариантов решения конфликтов возникает осложнение в виде **значительного увеличения продолжительности реализации экспериментов** по сравнению с моделированием на базе очереди событий (**в десятки раз**). При этом стоит отметить, что на простом примере в 50% случаев алгоритмы бронирования справлялись с задачей на том же уровне, что алгоритмы глубокой проверки. Эксперименты проводились в «Имитационном комплексе исследования развития железнодорожных станций и линий» [11].

**Задача:** сократить ошибки алгоритмов на базе очереди событий, продолжительность реализации экспериментов, провести валидацию имитационной модели.

**Решение:** адаптивная система управления на базе совокупности различных алгоритмов моделирования.

**До моделирования.** Построение имитационной модели на данном этапе рассматривается в соответствии с рекомендациями А. Лоу [12]: формулировка задач; сбор данных и создание концептуальной модели. Отдельно стоит отметить, что на данном этапе происходит сбор данных о рабочих характеристиках (выходных), о существующем объекте инфраструктуры для последующей валидации имитационной модели.

**1 этап.** Моделирование 30 суток по алгоритмам на базе очереди событий: потоковый пропуск операций и сравнении их приоритетов (укрупненная проверка враждебности – далее УП), бронирование ресурсов под высокоприоритетные операции (далее – БР).

Результат:

– Отчетная информация по итогам моделирования:

- загрузка инфраструктуры и обслуживающих устройств (с разложением по виду загрузки);
- продолжительность обработки, задержки и простои поездо- и вагонопотоков;
- «узкие места» инфраструктуры и технологического процесса;
- занятость технических средств (локомотивы, бригады, грузовые устройства и др.);
- количество срабатываний системы железнодорожной автоматики и телемеханики.

– Математическое ожидание продолжительности занятия ресурсов.

**2 Этап.** Моделирование отдельных суток с учетом глубокой проверки конфликтов.

Из моделирования по первому этапу выбираются сутки с максимальным количеством поступивших транзактов. Далее сутки моделируются с учетом создания МК и выводятся результаты по загрузке инфраструктуры и обслуживающих устройств. После корректируются параметры регулятора адаптивного управления для нахождения варианта с минимальной загрузкой для заданного объема эксплуатационной работы.

Параметры регулятора адаптивного управления

– задание глубины моделирования (от 0 до 720 мин) позволяет учитывать планирование эксплуатационной работы диспетчером;

– опциональный выбор ресурсов (ОВР) – позволяет управлять загрузкой ресурсов в режиме реального времени для увеличения или снижения загрузки отдельных элементов системы;

– перерасчет продолжительности реализации маршрутов по станционным горловинам – учитывает отклонения в продолжительности выполнения операции при изменении структуры маршрутов;

– разделение маршрутов, полурейсы в стрелочных горловинах – отдельные параметры, которые учитывают «диспетчерские приёмы».

На данном этапе производится валидация концептуальной модели. Структурированный просмотр концептуальной модели в присутствии Заказчика, руководителя проекта, аналитика и эксперта. По итогам моделирования второго этапа создается базовая модель (БМ), которая хранит данные о итоговом расписании транзактов, распределении ресурсов и продолжительности их занятия.

**3 Этап.** Сравнение результатов и задание параметров регулятора адаптивной системы по алгоритмам УП и БР.

Определение отклонений в БМ от математического ожидания продолжительности занятия ресурсов, полученного на первом этапе. Настройка ОВР для моделирования по алгоритмам УП и БР путем повышения внутреннего приоритета на использование вариантных ресурсов в соответствии с БМ.

**4 Этап.** Моделирование по алгоритмам УП, БР с новыми параметрами регулятора адаптивной системы.

Моделирование на 30 суток производится в следующих конфигурациях:

1. УП-БМ (алгоритм моделирования – УП; при переходе транзактов из ПР в МР происходит сверка с БМ);
2. БР-БМ (алгоритм моделирования – БР; при переходе транзактов из ПР в МР происходит сверка с БМ);
3. БР-ОВР (алгоритм моделирования – БР; вариантное использование ресурсов происходит в пользу настроек ОВР);
4. УП-ОВР (алгоритм моделирования – УП; вариантное использование ресурсов происходит в пользу настроек ОВР);
5. УП-БМ-ОВР (алгоритм моделирования – УП; при переходе транзактов из ПР в МР происходит сверка с БМ; вариантное использование ресурсов происходит в пользу настроек ОВР);
6. БР-БМ-ОВР (алгоритм моделирования – БР; при переходе транзактов из ПР в МР происходит сверка с БМ; вариантное использование ресурсов происходит в пользу настроек ОВР).

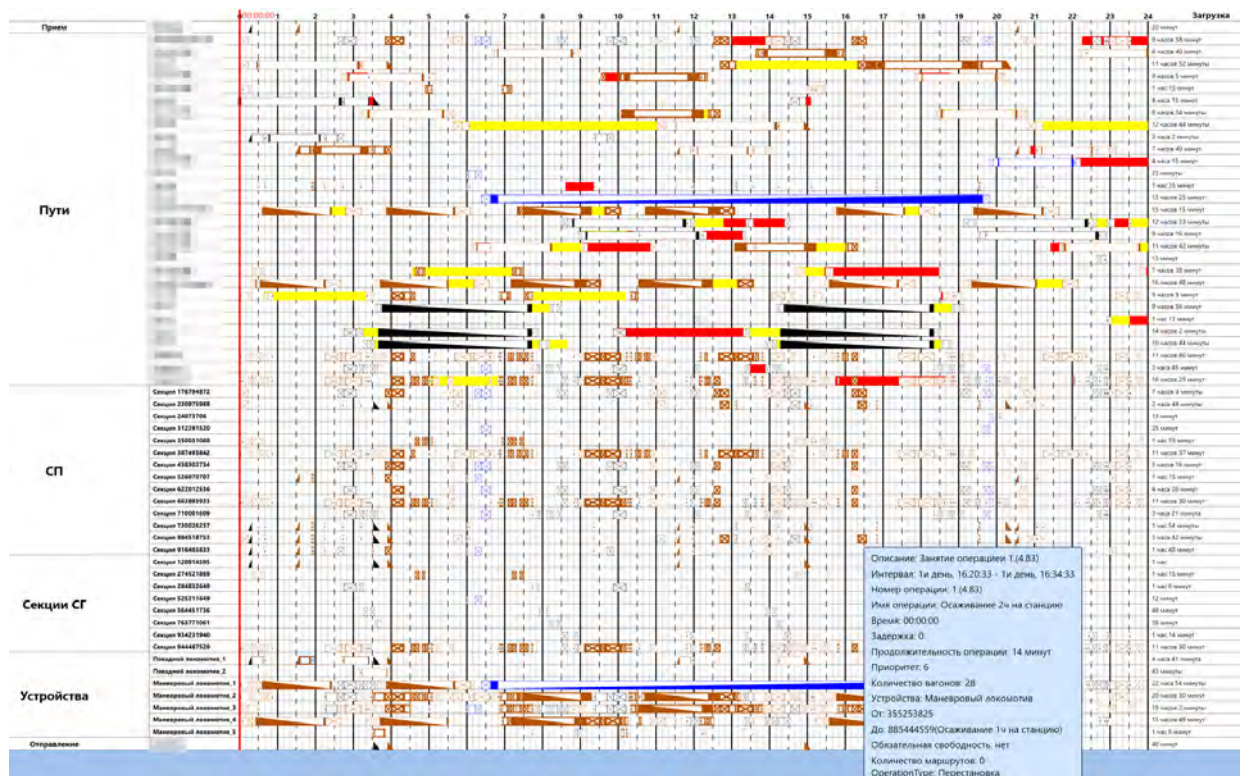
Таким образом, получаются отчетные данные по восьми конфигурациям имитационной модели (с учетом первоначальных экспериментов по алгоритмам УП и БР), которые характеризуют многообразие целевых состояний объекта моделирования, резервы мощности инфраструктуры для погашения внутрисуточной неравномерности движения поездов, глубину прогнозирования эксплуатационной работы с квалифицированным управлением.

На данном этапе подразумевается валидация имитационной модели. Сравниваются выходные данные имитационной модели с соответствующими выходными данными реального объекта транспортной инфраструктуры. После выбирается конфигурация имитационной модели для дальнейшего исследования или прорабатываются мероприятия по установлению соответствия работы реального объекта транспортной инфраструктуры к имитационной модели (ниже приведен пример).

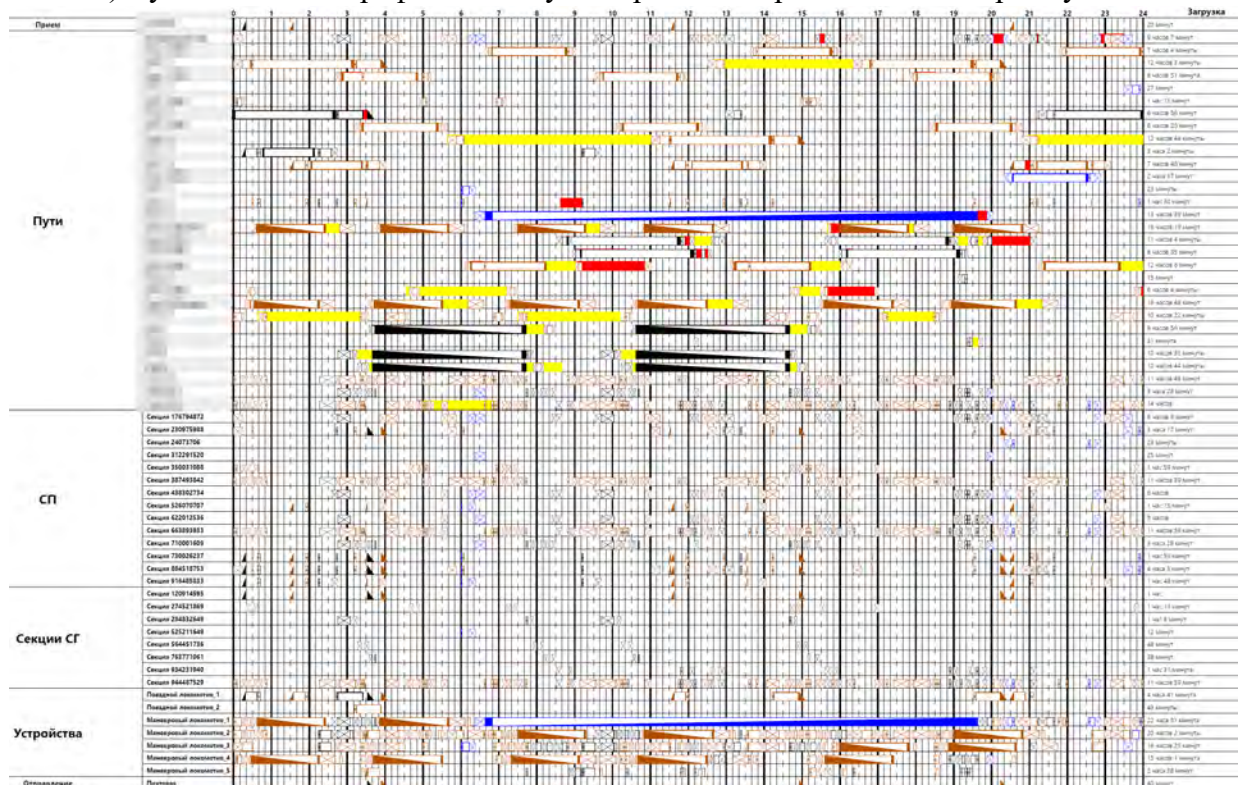
В рассматриваемой ситуации валидация имитационной модели понимается, как процесс свертывания многообразия целевых состояний объекта моделирования до практического применения.

**5 Этап.** Проводится проверка гипотез развития объекта транспортной инфраструктуры в виде дополнительных имитационных экспериментов. После чего разрабатываются технико-технологические решения.

На рисунке 4 представлены два суточных плана-графика работы железнодорожного пути необщего пользования. Суточник на рисунке 5а получен при моделировании по алгоритму УП, на рисунке 5б – по алгоритму БМ-БР. В результате применения разработанной адаптивной системы управления снижены простои вагонов на 30%. При этом алгоритмы с более сложной конфигурацией на рассматриваемом объекте инфраструктуры не внесли оптимизационной составляющей, что связано со структурой топологии объекта (ручное управление стрелками и сигналами в горловине пути необщего пользования; менее трех возможных параллельных передвижений). При этом моделирование по алгоритму УП показало наиболее валидные результаты по отношению к существующей эксплуатационной работе, что означало необходимость разработки мероприятия по изменению технологии работы станции с целью снижения простоев. Анализ результатов выявил необходимость использования дополнительного буфера на инфраструктуре перед погрузкой для снижения простоев из-за «узкого места» в стрелочной горловине.



а) Суточный план график на 30 сутки при моделировании по алгоритму УП



б) Суточный план график на 30 сутки при моделировании по алгоритму БМ-БР  
 Условные обозначения: красным и желтым цветом – непроизводительные и производительные простои соответственно, прочие фигуры – операции технологического процесса.

Рис. 4. Интерактивные суточные план графики работы пути необщего пользования в «Имитационном комплексе исследования развития железнодорожных станций и линий»



**Заключение:**

Валидация имитационной модели рассматривается, как процесс свертывания многообразий целевых состояний объекта моделирования до практического применения. Моделирование с подключением предложенной адаптивной системы управления позволяет определить резервы мощности инфраструктуры для погашения внутрисуточной неравномерности движения поездов; глубину прогнозирования эксплуатационной работы с квалифицированным управлением; уточнить влияние различных факторов на пропускную и перерабатывающие способности, «узкие места»; сократить продолжительность и трудозатраты на этапах отладки моделей и анализа результатов моделирования.

Использование предложенной адаптивной системы управления объектам инфраструктуры железнодорожного транспорта позволит повысить качество практического применения цифровых двойников.

**Литература:**

1. **Козлов П.А., Слободянюк И.Г.** Имитационная экспертиза проектов развития транспортной инфраструктуры // Современные реалии, тренды и инновации в управлении бизнес-процессами на транспорте: науч.-пр. конф. – М: МГУПС (МИИТ), 2014. – С.242-244.
2. **Шепель А.С.** Совершенствование методов обоснования схем станционных горловин // Дис. ... канд. техн. наук. – СПб: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2019. – 205 с.
3. Методика проведения исследований проектов развития железнодорожных станций и линий с определением "узких мест", влияния на пропускные и перерабатывающие способности, рациональной технологии и прогнозируемых эксплуатационных показателей с использованием аппарата математического моделирования: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 9 января 2018 г. № 2/р.
4. **Козлов П.А.** Оптимизация развития транспортных узлов и полигонов на основе имитационного моделирования // Бюллетень ученого совета АО "ИЭРТ". – 2023. – № 8-2. – С. 30-40.
5. **Калинин В. Н., Соколов Б. В.** Динамическая модель и алгоритм оптимального планирования комплекса работ с запретами на прерывание // Автомат. и телемех. – 1987, выпуск 1. – С. 106–114.
6. **Richard M. Fujimoto.** Distributed Simulation Systems // In Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference S. Chick, P. J. Sánchez, D. Ferrin, and D. J. Morrice, eds. – pp. 124-134.
7. **Марков Д.С., Лыков А.А.** Метод формализации имитационных моделей технологических процессов в хозяйстве автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2012. – №1 (30).
8. **Булавский П.Е., Марков Д.С., Соколов В.Б.** Метод динамического порционного моделирования сложных систем массового обслуживания // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2015. – №2 (43).
9. **Лукьянец С.В., Кривальцевич Д.В.** Имитационное моделирование сложных систем // Доклады БГУИР. – 2011. – №3 (57).
10. **Томашевский В.Н., Е Жданова.Г.** Имитационное моделирование в среде GPSS. – М.: Бестселлер, 2003. – 416 с.

11. **Преснов В.А., Шепель А.С., Костин Д.С., Ушаков И.С.** Имитационный комплекс исследования развития железнодорожных станций и линий // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022614820, 28.03.2022. Заявка № 2022613986 от 21.03.2022.

12. **Law A.M., McComas M.G.** How to build valid and credible simulation models // Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference. – 2001. – pp. 22–29.