



Верифицируемая структура технологических процессов в трёхмерных динамических моделях железнодорожных станций



Головнич Александр Константинович – Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь.*

Александр ГОЛОВНИЧ

Исследуются станционные технологические процессы, воспроизводимые на трёхмерной модели с позиции оценки достоверности их развития. Отождествляемые моделируемые и смоделированные процессы сопоставляются по конкретным сравнительным позициям. Эталонном служит фиксированный набор технологического ряда операций по обслуживанию вагонопотоков всех категорий на конкретной железнодорожной станции.

Для адекватности модельной реконструкции прототипу учитываются возникающие ожидания и простои подвижного состава, которые вводятся в модель как особые расщеплённые состояния основных пространственных локаций подвижного состава. В разрабатываемой модели станции вводится понятие «парафизические конструкции», которое включает любые невозможные по физическим канонам и нерациональные по технологическим требованиям состояния объектов путевого развития и подвижного состава. Логика программного контроля над подобными состояниями модельных структур основывается на анализе разрешённых позиций станционных объектов при выполнении эталонных технологи-

ческих операций. Замедление станционных операций может служить предвестником ожиданий или простоев.

Важным методологическим посылом для способа разработки динамической модели станции является формирование системы внутреннего программного анализа текущей ситуации, распознавания момента наступления парафизической ситуации и упреждения её с введением в нормальное русло штатного развития ситуации. Адаптирующий модуль информационной прототипирующей среды должен быть интеллектуальным агентом, обладающим развитыми свойствами генерации исключительных ситуаций на основе проведённых им сравнительных тестов, способностью формирования соответствующей базы знаний и её использования в процессе дальнейшей работы без какого-либо внешнего участия пользователей.

Цель исследования, изложенного в статье, связана с разработкой общих требований к динамической модели железнодорожной станции, функционирующей адекватно реальной технической системе, благодаря оценке достоверности репродуцированных станционных технологических процессов.

Ключевые слова: железная дорога, трёхмерное моделирование, железнодорожная станция, критерии достоверности модели.

*Информация об авторе:

Головнич Александр Константинович – доктор технических наук, профессор кафедры проектирования, строительства и эксплуатации транспортных объектов Белорусского государственного университета транспорта, Гомель, Беларусь, golovnich_alex@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 09.04.2020, принята к публикации 25.09.2020.

For the English text of the article please see p. 15.

ВВЕДЕНИЕ

Моделирование процессов обслуживания вагонопотоков на железнодорожной станции с трёхмерной визуализацией выполняемых технологических операций является эффективным направлением цифровизации управления транспортными потоками. Реализация алгоритмов функционирования модельных объектов, адекватных физике процессов взаимодействия пути и подвижного состава, а также требованиям технологии не только по внешней форме, но и по внутренним свойствам, позволит создать информационно-физическую модель станции [1; 2]. Так как в основе реконструктивных процессов изменения состояний модельных объектов лежит корректная интерпретация физических взаимодействий тел, то результатом всего процесса моделирования являются непротиворечивые следствия, адекватные реальным станционным событиям. Однако степень достоверности моделируемых состояний будет зависеть от точности воспроизведения влияющих внешних сил, порождаемых ими напряжений, давлений и усилий. При некорректных алгоритмах репликации условий работы существующих объектов модель формирует мир взаимодействующих реконструктивных образов, несколько отличный от следствий действия реальных физических законов и технологических требований регламентного функционирования технической системы. Подобная реконструкция реальности способна развиваться в динамике и функционировать с определёнными равновесными режимами моделированных процессов [3]. Однако неполнота и неточность алгоритмической репликации действительных процессов будут приводить к результатам моделирования, отличающимся от эталонных. Поэтому важно определить условия развёртывания модельной интерпретации процессов, приводящие к непротиворечивому, с точки зрения физики, и технологически корректному прототипированию станционных операций. Самодостаточность модели в этом отношении должна базироваться на информационных процедурах самотестирования состояний объектов, определяющих достоверность реконструктивных процессов на соответствующих сравнительных сопоставлениях.

Целью излагаемого в статье исследования является формирование позиций сравнения модельных и прототипных технологических процессов работы железнодорожной станции с определением уровня допустимых отклонений от заявленного шаблона и корректировки информационной реконструкции при её выходе за пределы нормального функционирования станции. *Метод* системного анализа позволяет достичь поставленной цели благодаря применению входящих в него принципов единства, иерархии и модульного построения.

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ПОЗИЦИИ МОДЕЛИ И ПРОТОТИПА

При отсутствии контроля над происходящими модельными изменениями с течением времени возможно формирование событийного мира, всё менее похожего на прототипную реальность. Через некоторое время смоделированный (имитирующий реальный) и моделируемый (являющийся прототипом модельного) процессы будут различаться по определённым наблюдаемым и регистрируемым признакам. Например, моделирование операции расформирования поездов на сортировочной станции может приводить к появлению специфических визуальных эффектов, обусловленных неточной или неверной интерпретациями особенностей технологии роспуска составов (постоянно высокая скорость надвига обусловит постепенное увеличение скорости движения отцепов по спускной части горки с нагоном отцепов и, как следствие, приведёт к невозможности перевода стрелок для разделения групп вагонов по путям сортировочного парка; роспуск с горки отцепов, требующих осаживания, будет являться причиной соударения цистерн со взрывоопасными грузами, приводящего к сложно моделируемым аварийным состояниям; частый выход отцепов расформируемого состава в сортировочный парк с завышенными скоростями движения вагонов приведёт к повреждению грузов и вагонов с трудно реконструируемыми модельными состояниями).

Поэтому важно выделить позиции сравнения для технологических операций, в которых участвуют определённые объекты, что позволит сопоставить моделируемый и моделируемый процессы (рис. 1).



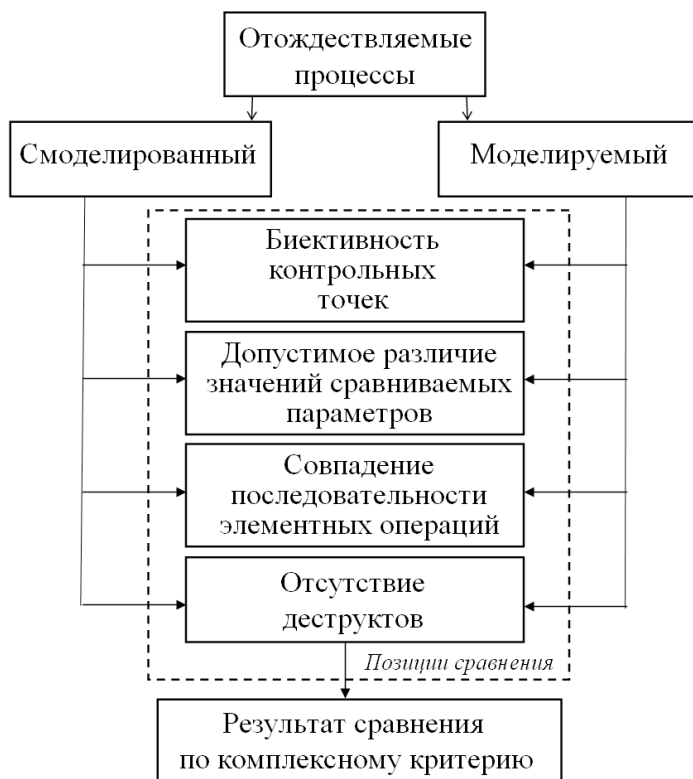


Рис. 1. Позиции сравнения модельного и реального процессов (схема автора).

Сопоставление предполагается проводить на основе эталона — некоторого заявленного технологического процесса обслуживания вагонопотоков реальной железнодорожной станции, с которым будет проводиться сравнение аналогичных модельных операций. Состояния модельных объектов, участвующих в таком технологическом процессе, можно контролировать по моментам отдельных завершённых операций (прибытия поезда на станцию, закрепления состава на путях парка приёма, выгрузки вагона).

Модельное состояние всегда фиксируется как статичный кадр некоторой исполненной операции. Этот кадр стабильно сохраняется в неизменном виде в течение определённого времени, диктуемого технологическим процессом обслуживания вагонопотоков. Такая временная задержка наблюдается в реальных процессах и связана с ожиданием выполнения следующей операции (например, для состава в парке отправления — нитки графика отправления поезда на перегон; для выгруженного вагона — маневрового локомотива с целью уборки с грузового фрон-

та). В этом случае наступает определённый перерыв в смене состояний объектов, которые в предыдущих фазах переходили в другие пространственные позиции, связанные с перемещением подвижного состава по путям, деформацией верхнего строения под действием веса вагона или напряжения в рельсах из-за ударного воздействия по стыкам.

При отождествлении процессов важно обеспечить выполнение условия биективности (однозначности) исходных сравнительных позиций для реальных и модельных объектов. В этом случае могут возникнуть определённые сложности, связанные с несопоставимостью достигнутых состояний. Например, операция расформирования поездов на сортировочной станции начинается с надвига состава на горку после прицепки маневрового локомотива. Но координатные положения точек сцепления локомотивов в парке приёма для реальной и модельной ситуаций не совпадают из-за предыдущих неточностей учёта различных факторов, повлиявших на оценку скорости модельных объектов. Однако если величина различия в положениях

точек локомотива реконструируемого образца и прототипа не превышает пределов разброса этих значений по различным поездкам с одинаковым количеством вагонов, принимаемым на станцию, и путям приёмоотправочного парка с соразмерной длиной, то можно считать, что исходные позиции тождественны. При этом координатные положения локомотива модели при таком различии являются контрольной точкой для дальнейшей привязки результатов моделирования.

Различными по позициям сравнения для модели и эталона могут оказаться значения таких важных расчётных характеристик, как скорость движения отцепов при скатывании с горки, время погрузки вагонов на грузовом терминале, продолжительность передвижения локомотивов по маршрутам подачи к составу и др. В этом случае также необходимо оценивать модельные отклонения и принимать решение о допустимых колебаниях результатов репликации технологических процессов в пределах зоны вариабельности.

Важной позицией сравнения является совпадение последовательности элементарных операций для моделированного и моделируемого процессов. Например, после погрузки вагона-зерновоза требуется проведение операции взвешивания, которая в зависимости от конструкции вагонных весов выполняется различными способами: накатыванием локомотивом вагона на весы с расцепкой или без неё, с остановкой на весах или в движении. В модельном представлении взвешивание вагона может быть определено одной обобщённой схемой перемещения подвижного состава через весы с суммарным временем, равным технологическому для полного цикла выполнения данной операции. При моделировании такой и подобных ей операций возникает вопрос о степени детализации соответствующего процесса, отражающего существенные связи с прототипной технологией. Поэтому в модели допустима свёртка незначимых операций, которая приводит, в конечном итоге, к увеличению длительности некоторой интегрирующей схемы, включающей в себя скрываемые от визуализации микрооперации без потери качества проектирования и достигаемых целей моделирования.

Если модельная технологическая операция выполняется с нарушениями физики процессов или требований технологии, то может возникнуть событие, именуемое «деструктом». При моделировании работы железнодорожной станции деструктивными следует считать состояния, приводящие к:

- появлению парафизических конструкций, не наблюдаемых в реальном мире (например, длительный отрыв колёс подвижного состава от опорной плоскости движения; погрузка насыпного груза в вагон с углом откоса, резко отличным от естественного);
- выполнению операций с характеристиками, запрещёнными технологическими требованиями (скорости движения отцепов на спускной части горки более 30 км/ч; время слива нефтепродуктов из цистерны 10 ч; высота штабеля металлопроката в складе 5 м);
- нарушению норм безопасности движения (неплотное прилегание остряка к рамному рельсу стрелочного перевода; ложная свобода пути; развал груза на открытом подвижном составе);
- негативным последствиям нарушения норм безопасности (сход или столкновение подвижного состава).

Следует отметить, что моделирование технологических операций с опасными состояниями обладает широким потенциалом некорректного развития и завершения реконструируемых процессов. Однако эти возможности специфичны и связаны с разработкой особых катастрофных моделей, в которых подобные состояния являются разрешёнными [4].

Таким образом, сопоставление смоделированного и моделируемого процессов по соответствующим позициям сравнения (см. рис. 1) позволит контролировать развитие модели в пределах определённого диапазона допустимых отклонений от типового технологического процесса.

Такой модельный подход заимствуется из реальных технических систем, где дальнейшее развитие процесса предопределяется конкретными целями достижения необходимого состояния. Если на момент завершения некоторой операции диагностируется значительное отклонение контрольного параметра, то соответствующим



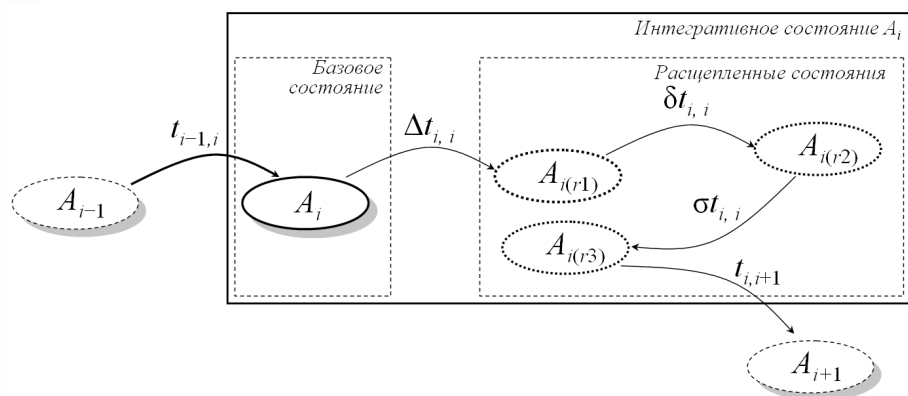


Рис. 2. Связь базового и расщеплённых состояний (схема автора).

ресурсным обеспечением системы будут приняты меры, приводящие к нормализованному значению контрольного параметра на момент завершения следующей операции. Например, при значительном превышении времени нахождения местного вагона на железнодорожной станции будут предприняты меры для ускорения подачи подвижного состава на пункты погрузки-выгрузки.

Подобное воздействие на динамику развития процессов позволяет также исправлять линии тренда модельных событий в сторону соответствия наблюдаемым следствиям действия законов физики и требованиям технологии при некорректном описании процессов.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ СТАНЦИИ С УЧЁТОМ ОЖИДАНИЙ И ПРОСТОЕВ

Пусть O_i — элементная операция, выполняемая на станции (например, закрепление состава на пути парка приёма); $t_{i-1,i}$ — время перехода в данное состояние; O_{i+1} — следующая элементная операция, наступающая через некоторый промежуток времени $t_{i,i+1}$ (для приводимого примера — это время раскрепления состава). Кроме длительности основного времени перехода в новое состояние, в модель вводятся возможные дополнительные ожидания $\Delta t_{i,i}$, связанные с производством других операций, обуславливающих O_{i+1} (например, передвижение маневрового локомотива под состав, освобождение маршрута выхода с парка приёма на горку). Кроме того, начало выполнения O_{i+1} может быть задержано на время $\delta t_{i,i}$, обеспечивающее полу-

чение некоторого системного эффекта (например, ожидание подачи маневрового локомотива в парк приёма из-за необходимости работы этого локомотива в сортировочном парке для формирования поезда), а также связанное с непроизводительным простоем $\sigma t_{i,i}$, который для реальных железнодорожных станций является, как правило, следствием действия человеческого фактора. Таким образом, длительность перехода в новое состояние объекта железнодорожной станции определяется необходимым технологическим временем и возможными дополнительными ожиданиями:

$$t_{\text{пер}(i+1)} = t_{i,i+1} (+ \Delta t_{i,i}) (+ \delta t_{i,i}) (+ \sigma t_{i,i}).$$

Как правило, нормальное развитие процесса требует новых переходов без каких-либо временных задержек ($t_{\text{пер}(i+1)} = t_{i,i+1}$).

Любое состояние объекта характеризуется определённым набором атрибутов. Переход объекта в новое состояние сопровождается изменением этих характеристик. Время нахождения в данном состоянии является основным атрибутом объекта. В определённых случаях объект, находясь в данном состоянии, может претерпевать атрибутивные изменения. Например, закреплённый подвижной состав в парке приёма станции подвергается техническим и коммерческим операциям, оставаясь при этом в одном и том же пространственном положении.

Переход в новое состояние рассматривается как выполнение следующей в технологическом цикле операции и возникает в результате некоторого внешнего воз-

действия на объект, приводящего к изменению его положения. При отсутствии такого воздействия объект находится в ожидании следующей операции. В этом состоянии у данного объекта изменяются некоторые его свойства (в частности, общая продолжительность пребывания в достигнутом состоянии). Поэтому ожидание рассматривается как условный переход в квазисостояние, близкое к текущему, несущественно изменённому. В этом случае происходит своеобразное расщепление достигнутого состояния A_i на ряд $A_{i(r)}$ (рис. 2).

Для приведённого на рис. 2 примера нахождения состава в парке приёма станции (базовое состояние) возможен переход к ряду расщеплённых состояний, не приводящих к изменению пространственного положения при следующих воздействиях:

- $\Delta t_{i,i}$ — выполнении операции технического осмотра вагонов во время нахождения состава в парке приёма в закреплённом башмаками состоянии. В результате осуществляется переход в некоторое расщеплённое состояние $A_{i(r1)}$;
- $\delta t_{i,i}$ — подаче маневрового локомотива после осаживания вагонов в сортировочном парке, обуславливающего ожидание состава в парке приёма с переходом в другое, связанное с базовым, расщеплённое состояние $A_{i(r2)}$;
- $\sigma t_{i,i}$ — непроизводительных потерях времени, связанных с другими причинами (например, выходом из строя системы моделирования по опасному отказу), возникших после завершения операции технического осмотра и способствовавших переходу из $A_{i(r2)}$ в другое расщеплённое состояние $A_{i(r3)}$.

Подобные расщеплённые состояния $A_{i(r)}$ являются формами существования интегративного базового A_i и, по сути, представляют собой позиции, качественно не отличающиеся от породившего их базового состояния и находящиеся в области его тяготения, так как характеризуются незначительно изменённым набором атрибутивных параметров. Поэтому все квазисостояния $A_{i(r)}$ одного A_i рассматриваются как функционально связанные с ним, образующие группу энергетических гармоник, которые становятся стартовыми при переходе к новому состоянию A_{i+1} (для

примера на рис. 2 — это расформирование через операцию $t_{i,i+1}$ надвига состава на горку).

Таким образом, ожидания и простои также являются операциями, так как приводят к изменению свойств объекта, увеличивая время его нахождения в данном состоянии. Все типы операций обусловлены технологическим процессом и способствуют достижению основных целевых установок функционирования технической системы (безопасность перевозочного процесса, сохранность грузов и подвижного состава, качественное обеспечение запросов потребителей транспортных услуг и др.). В этом отношении ожидания и простои выполняют важную системную функцию целесообразного взаимодействия технологической общности объектов, выравнивая скорости проведения отдельных операций со взаимосвязанными результатами, сводимыми к одному времени их наступления. Система стремится к наиболее эффективному достижению цели с минимальными затратами ресурсов. Поэтому ожидания — это системная мера экономного использования всех станционных ресурсов, позволяющая получить результат с минимальными общими затратами.

Ожидания отличаются от простоев привязкой к технологической целесообразности. При ожиданиях переход к следующей операции задерживается по соображениям общей экономии средств на выполнение всей цепи операций соответствующего процесса. Простои имеют место в работе реальной системы и сопряжены, как правило, с ошибками лиц, принимающих решения. В модели станции простои могут рассматриваться как программная возможность остановки таймера для решения задач, выходящих за пределы реконструктивных целей (например, анализ достигнутого состояния модели для оценки эффективности алгоритма её работы или остановка функционирования модели по причине программного сбоя).

Из всех возможных переходов (операций) можно выделить три типа:

- безусловно переводящие объект в другое пространственное состояние (уборка вагонов с подъездного пути после выгрузки) (тип А);
- фиксирующие данное пространственное состояние для проведения иных регла-



Таблица 1

Связь операций, атрибутов и состояний объектов станции (составлена автором)

Типы операций	Характер изменения:	
	атрибутов	состояния
A	изменяются все	изменяется
B	изменяются некоторые	не изменяется
C	увеличивается время нахождения в текущем состоянии	не изменяется

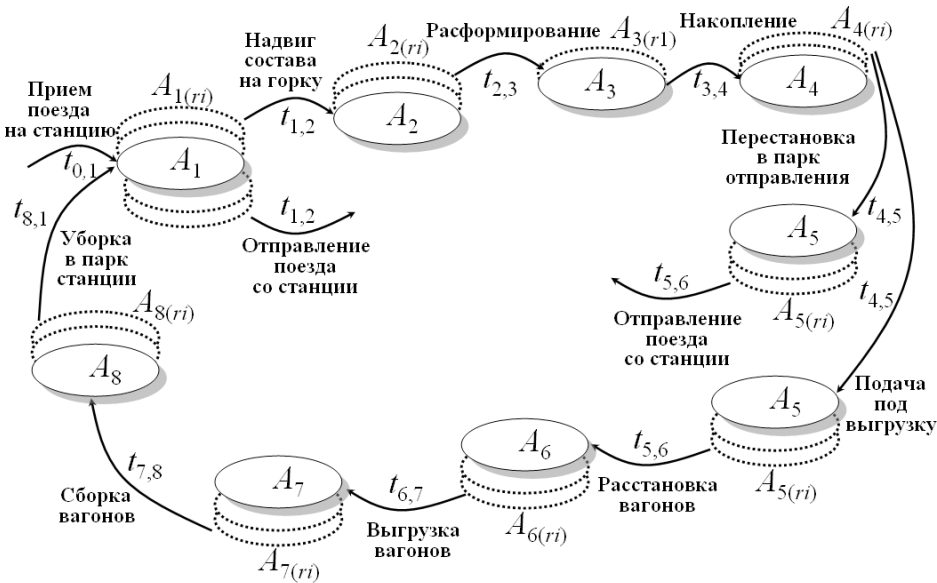


Рис. 3. Структура модельных операций репродуцируемой участковой станции (составлено автором).

ментных операций (осмотр состава в техническом и коммерческом отношении после закрепления на путях парка приёма, расцепка вагонов с надвигом на сортировочную горку) (тип B);

- задерживающие достигнутое состояние (ожидания и простои подвижного состава) (тип C).

Характеристика указанных операций приведена в табл. 1.

МОДЕЛЬНАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА СТАНЦИИ

Определим технологические операции, выполняемые на железнодорожной станции и подлежащие модельной реконструкции. Сводный обобщённый перечень этих операций включает те, что приводят к изменению пространственного положения единиц подвижного состава:

- приём (отправление) поезда (передачи) на станцию;

- отцепка (прицепка) вагонов от состава (передачи, подачи);
- расформирование состава (передачи, подачи);
- накопление состава поезда (передачи, подачи) на пути сортировочного (сортировочно-отправочного) парка;
- подача (уборка, перестановка) состава (передачи группы, вагона);
- погрузка (выгрузка, перегрузка) подачи (вагона);
- расстановка (сборка, формирование) подачи (передачи, состава).

Из этих операций можно сформировать необходимый перечень технологического конструктива объектов модельного пространства. Пусть для модели участковой станции реализуется граф состояний и переходов, отображённый на рис. 3.

Приведённый граф состояний объектов подвижного состава позволяет моделировать технологические процессы обслуживания различных категорий вагонопото-

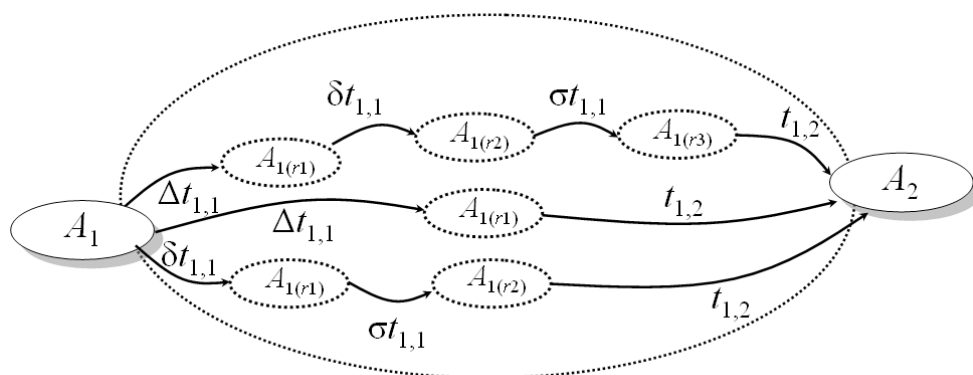


Рис. 4. Связь состояний A_1 и A_2 через $A_{1(r)}$ (составлено автором).

ков: транзитного без переработки ($t_{0,1} \rightarrow A_1 \rightarrow t_{1,2}$), с переработкой ($t_{0,1} \rightarrow A_1, \dots, A_5 \rightarrow t_{5,6}$) и местного ($t_{0,1} \rightarrow A_1, \dots, A_8 \rightarrow t_{8,1}$). Любое базовое состояние A_i переходит в A_{i+1} через целый ряд расщеплённых состояний $A_{i(r)}$, обусловленных различными ожиданиями. Количество расщеплённых состояний различается для разных базовых позиций A_i . Например, при расформировании состава на горке может быть остановка роспуска (одно расщеплённое состояние $A_{3(r1)}$), которая приводит к ожиданию и соответствующему увеличению времени нахождения в данном состоянии. В других случаях возникают ожидания из-за влияния целого ряда причин различного характера, обуславливающих формирование спектра расщеплённых состояний, наследующих друг другу (рис. 4).

На рис. 4 показаны три возможных варианта связных расщеплённых квазисостояний перехода из A_1 в A_2 .

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ

Перед выполнением последующей операции O_{i+1} происходит проверка соответствия достигнутого состояния объектов, заявленных к участию в данной операции, требованиям технологического процесса. Развитие модельной реконструкции соотносится с текущим эксплуатационным положением (загрузкой элементов станционных подсистем, графиком подхода и отправления поездов, планированием местной работы). Если в момент модельного времени t_k переходы в новые состояния ожидаются по несколь-

ким технологическим операциям с различными станционными объектами, то рассчитывается значение соответствующей оценочной функции потерь от ожиданий по всем вариантам распределения наличных ресурсов между заявленными операциями. В перечне распределяемых ресурсов: маневровые локомотивы, вагоны, пути парков, станционные маршруты передвижения, погрузо-выгрузочные пункты, нитки графика отправления поездов со станции. В результате сравнения различных вариантов перехода к новому состоянию A_{i+1} определяется наиболее эффективный по минимуму затрат вариант с формированием соответствующего набора квазисостояний $A_{i(r)}$, содержащих ожидания из множества $\{\Delta t_{i,i}, \delta t_{i,i}, \sigma t_{i,i}\}$. Подобный расчёт выполняется для всех объектов станции, переходящих в новые состояния на момент времени развёртывания модельной ситуации t_k .

Достоверность прототипирования оценивается расчётным значением индекса через шкалу признаков, указывающих на вероятность выхода моделированных процессов за границы разрешённых допустимых требований. При превышении значений такой вероятности вырабатывается комплекс стимулирующих воздействий, исправляющих следствия влияния факторов, которые способны некорректно определить последующие модельные состояния.

Шкала признаков, ответственных за развитие процесса данной операции, а также являющихся и потенциальными источниками ошибочной модельной интерпре-

тации, формируется по всем событиям, происходящим с объектами в течение указанной операции. Таким образом, следующая операция проводится в модели после оценки соответствия достигнутых состояний объектов требованиям, заявленным в признаках соответствующей шкалы.

Следует отметить, что не все операции, выполняемые на станции, рассматриваются как потенциально моделируемые. В перечень реконструктивных технологических операций 3D-станции (см. рис. 3) не входят параструктивные, которые сложно моделировать, и их исключение из репродуктивной инсталляции не приводит к потере качества натурализации технологических процессов. Параструктивные операции включают классифицированный ранее тип В фиксирующих операций и некоторые другие (взвешивание вагонов, оформление и передача документов между подразделениями станции, ремонт подвижного состава). Визуализация данных операций в модели связана с воссозданием аватарных образов технического персонала, вовлекаемого в станционные процессы. Эти алгоритмически трудоёмкие компьютерные процедуры определяют в основном общий реалистичный фон трёхмерной динамической модели станции. Детализация модели в направлении визуальной реконструкции процессов, основанных на параструктивных операциях, развивает прототипирующую среду с глубокими причинно-следственными связями объектов. По мнению автора, это уровень структурного расслоения модельных конструктивов с формированием надтехнологических процессных композиций, выходящих за пределы факторных вариаций (например, определение уровня профессиональной подготовки юзерпик-аналога конкретного работника службы технического персонала). Таким образом, представляется возможность создания паратехнологических моделей с целеполагаемыми стимулами систем объектов, обладающими мотивационными и поведенческими свойствами, присущими социоориентированным информационным системам.

ВЫВОДЫ

Таким образом, можно сформировать информационную среду моделирования

станционных технологических операций с визуализацией в трёхмерном представлении всех пространственных изменений, связанных с передвижением подвижного состава по путям парков станции. Выполнение каждой последующей технологической операции предваряется анализом достигнутого состояния и построением плана дальнейшей работы посредством нахождения рационального варианта использования наличных ресурсов, распределяемых между планируемыми операциями. Такой компьютерный диспетчер соразмеряет темпы исполняемых операций с достижением максимального результата, выражаемого некоторой функцией потерь, приводящей к дополнительным ожиданиям при выполнении технологических операций.

Кроме технологических ожиданий в модель станции вводится непроизводительный простой $\sigma t_{i,i}$, который в реальных условиях работы станции интерпретируется как результат непродуктивной работы управляющего персонала, обладающего недостаточной квалификацией, или связан с другими качествами. В информационном аналоге прототипируемой станции этот компонент пока не имеет привязки к определённой модельной ситуации, но в дальнейшем, возможно, будет задействован для формирования более эффективной и, вместе с тем, более приближённой к реальности динамической модели железнодорожной станции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Головнич А. К. Адаптивные алгоритмы реконструкции технологических процессов на трёхмерных моделях технических систем // Проблемы физики, математики и техники. ГГУ, Гомель. — 2017. — № 4 (33). — С. 89–95. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30781075>. Доступ 09.04.2020.
2. Головнич А. К. Особенности экспериментов на процессной модели станции // Мир транспорта. — 2017. — № 2. — С. 32–37. [Электронный ресурс]: <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/view/1150/1426>. Доступ 09.04.2020.
3. Головнич А. К. Функционально-прототипирующая 3D-модель железнодорожной станции на основе физики процессов / Проблемы перспективного развития железнодорожных станций и узлов // Межвуз. сб. тр. Гомель, БелГУТ. — 2019. — С. 15–39. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41239020>. Доступ 09.04.2020.
4. Головнич А. К. Концептуальные основы разработки трёхмерных компьютерных моделей железнодорожных станций: Монография. — Гомель, БелГУТ, 2019. — 199 с. ●