

10 Йосс, Ж. Элементарная теория устойчивости и бифуркаций / Ж. Йосс, Д. Джозеф. – М. : Мир, 1983. – 301 с.

11 Кузнецов, А. П. Динамические системы и бифуркации / А. П. Кузнецов. – Саратов : Наука, 2015. – 168 с.

12 Kuznetsov, Yu. A. Elements of applied bifurcation theory / Yu. A. Kuznetsov. –New York : Springer-Verlag, 1998. – 591 p.

13 Ляпунов, А. М. Общая задача об устойчивости движения / А. М. Ляпунов. – М.–Л. : Гостехиздат, 1950. – 471 с.

14 Паташинский, А. З. Флуктуационная теория фазовых переходов / А. З. Паташинский, В. Л. Покровский. – М. : Наука. 1982. – 381 с.

15 Постнов, Д. Э. Бифуркации регулярных аттракторов : учеб. пособие / Д. Э. Постнов. – Саратов : Колледж, 1996. – 102 с.

17 Марсден, Д. Бифуркация рождения цикла и ее приложения : пер. с англ. / Д. Марсден, М. Мак-Кракен. – М., 1980. – 180 с.

*T. A. VLASIUK*

## **APPLICATION OF BIFURCATION ANALYSIS OF PASSENGER FLOWS IN THE ASSESSMENT OF THE INTERACTION OF DIFFERENT TRANSPORT MODES IN AN AGGLOMERATION**

Characteristics of the bifurcation analysis application in relation to the analysis of passenger flows in the interaction junctions of large cities are considered. Possible effects of a variety of factors of different nature are taken into account. With the onset of The author draws attention to the unpredictability of the transport processes when bifurcation takes place.

Получено 16.10.2018.

---

**ISSN 2664-5025. Проблемы перспективного развития  
железнодорожных станций и узлов. Гомель, 2019**

---

УДК 656.21:004.414.23

*А. К. ГОЛОВНИЧ*

*Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ)  
golovnich\_alex@mail.ru*

## **ФУНКЦИОНАЛЬНО-ПРОТОТИПИРУЮЩАЯ 3D-МОДЕЛЬ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СТАНЦИИ НА ОСНОВЕ ФИЗИКИ ПРОЦЕССОВ**

Исследуется возможность воспроизведения технологических процессов железнодорожной станции в динамической трехмерной модели в соответствии с физическими законами движения, соударения и трения объектов пути, подвижного состава и груза. Определяются критерии качества модельной реконструкции про-

цессов, обеспечивающих верифицируемое прототипирование операций обслуживания поездо-, вагоно-, пассажиро- и грузопотоков на станциях.

Технологические операции, выполняемые на железнодорожной станции с поездо- и вагонопотоками, основываются на физических процессах взаимодействия объектов подвижного состава и пути (движение с установленной скоростью, разгон, торможение в составе поезда, столкновение вагонов в подгорочном парке при роспуске с горки и др.). Повторяемость технологических операций позволяет рассматривать железнодорожные станции как эффективную площадку для результативного моделирования процессов замкнутого цикла. Полноценная имитация технологии работы станции может быть получена при воспроизведении исходных силовых воздействий, вынуждающих вагон скатываться с горки, груз отсыпаться в конусообразный профиль или перемещаться в подвижном составе при резком торможении поезда и т. д. Значения многих характерных параметров технологических операций (скорость скатывания отцепов с определенным количеством вагонов и весовыми параметрами, продолжительность разгрузки платформы со щебнем на повышенном пути, время торможения до полной остановки маневрового состава, движущегося с определенной скоростью) могут быть определены при решении стандартных физических задач с учетом особенностей транспортных процессов. В результате можно определять величины характеристик координатного положения объектов или внутреннего их состояния, что позволит по вычисляемым результатам через заданные промежутки времени реконструировать динамические процессы передвижения вагонов на станции, а также рассчитывать возникающие напряжения в рельсах и шпалах и др. Трехмерная инсталляция, как способ представления результатов расчета, обладает высокой эффективностью натурализации процессов, выражающаяся в реалистичности и наглядности образных форм станционных объектов, вовлеченных в технологические операции. Восприятие 3D-образов как псевдореальности обеспечивает в практической работе оперативному работнику психологический комфорт, способствующий уверенному управлению технологическими процессами и принятию правильных решений как адекватных реакций на возникающие ситуации, отождествляя модельные реконструкции с реальными прототипами.

Современные информационные технологии предоставляют достаточно совершенные программные среды, имитирующие действие различных физических законов. Игровая компьютерная индустрия реализует сложные алгоритмы, позволяющие визуально воспроизвести взаимодействия тел, их притяжение, столкновение и др. На программном уровне рассчитываются следствия соударения упругих тел, течения жидкостей, газов [1]. Конструирование физических явлений в информационных средах, подобных Unity,

осуществляется одновременно для большого числа объектов, что создает иллюзию массового притяжения тел в результате потери равновесия или внешнего воздействия, взаимодействий объектов при ударе, движения совокупности объектов по различной поверхности, соответствующей рельефу местности и др. [2]. При этом реалистичность внешнего вида и динамики модельных объектов оказывается настолько высокой, что возникает ощущение просмотра записанного на видеокамеру реального процесса.

Принципиальным является вопрос о внутреннем содержании симуляций действия физических сил тяготения, инерции, трения. Сложность и определенная неизвестность природы этих сил приводит к тому, что реконструкции наблюдаемых технологических эффектов требуют оценки достоверности их реализуемости. Для моделирования процессов на железнодорожной станции основным критерием качества визуального воспроизведения физических явлений должно быть определенное некоторой количественной мерой соответствие модельных и наблюдаемых в реальности следствий действия различных сил на протяжении некоторого времени реконструкции. Рассчитанные и действительные состояния виртуальных тел и их прототипов при одинаковых исходных позициях зависимых параметров должны совпадать с достаточной точностью (точка остановки модельного вагона на железнодорожном пути после погашения кинетической энергии сопротивлением движению должна быть такой же как в реальной ситуации; падение насыпного груза с конвейера в вагон через загрузочное устройство должно приводить к формированию конуса штабеля с углом естественного откоса, одинакового для модели и прототипа; скатывание подвижного состава по скоростному уклону горки без тормозящего действия замедлителей должно приводить в конкретной точке профиля к расчетной скорости модельного отцепа, равной скорости такого же отцепа для реальной горки и др.). Совпадение с заданной точностью сравниваемых состояний указывает на достаточную верифицируемость вычислительного эксперимента.

Оценочный критерий достоверности моделирования следует применять на некоторой временной последовательности состояний виртуальных объектов. В этом случае более длинные сравниваемые ряды будут компенсировать влияние случайных факторов фиксированных событий. Поэтому функционирование модельной станции можно ориентировать на действие систематических факторов, устойчиво проявляющихся на данном временном отрезке моделирования [3].

Интервал времени, охватывающий связную последовательность станционных операций, границы которого подлежат оценке качества моделирования по критерию согласования с прототипными процессами, целесообразно определить как технологический лаг модели станции (ТЛМС).

Величина ТЛМС выбирается таким образом, чтобы учитывалось влияние систематических факторов, а действие случайных составляющих взаимно компенсировалось и погашалось. ТЛМС не остается постоянным на протяжении всего периода моделирования работы станции. По-видимому, существуют некоторые условия, при которых возникают устойчивые ритмы ТЛМС, повторяющиеся от цикла к циклу функционирования станции и находящиеся в строгом соответствии с определенными реальными станционными событиями.

Разработка имитирующего алгоритма реконструкции физических процессов на железнодорожной станции подразумевает построение некоторого механизма взаимодействия модельных тел, приводящих к адекватному действительности изменению их состояний, определяемых соответствующими признаками объектов. Например, модельный аналог вагона наделяется атрибутивным свойством массы, обеспечивающим его воздействие на верхнее строение пути и земляное полотно. Модельный груз благодаря этому атрибуту устремляется вниз при потере точки опоры (при открытии люка платформы или хоппера, поворота ковша грейфера при погрузке груза в полувагон, отрыве отцепа от надвигаемого на сортировочную горку состава). Таким образом, реконструкция физических процессов обеспечивает выполнение операций с поездами, вагонами и грузами на станциях. Определенная технологическая операция, выполняемая на железнодорожной станции, рассматривается как интегральная конструкция соответствующей последовательности физических процессов, в которые вовлечены станционные объекты. Результат физических эффектов действия различных внешних сил определяет достигаемое технологическое состояние станционных объектов (таблица 1).

Операции расформирования составов, указанные в таблице 1, складываются из ряда определенных физических процессов. Такие моделируемые технологические операции называются *трансфокусными*. Моделирование других операций основывается на процессах, не вызывающих изменений состояния пути или подвижного состава. Такие операции называются *контрафокусными* (например, операция раскредитования документов в товарной конторе). Трансфокусные операции могут быть *чистыми* (со слагаемыми их элементарными конструкциями только физического характера) и *смешанными* (некоторые их элементы могут относиться к контрафокусным). С другой стороны, контрафокусные операции также разделяются на *чистые* и *смешанные*.

Смешанные трансфокусные операции характеризуются преимущественным (75 % и более) содержанием процессных позиций, основанных на физике событий, в то время как смешанные контрафокусные операции охватывают 75 % и более технологических конструкций нефизического

плана. Общая классификация станционных процессов по признаку их физического содержания приведена на рисунке 1.

**Т а б л и ц а 1 – Последовательность взаимосвязанных физических процессов и технологических операций при обслуживании вагонопотоков, поступающих в переработку**

Технологические операции	Физические операции
1 Прием поезда на станцию	1.1 Перевод остялков стрелочных переводов по сигналу с пульта поста дежурного по станции в положение, разрешенное для маршрута приема поезда с перегона
	1.2 Изменение показания входного сигнала на разрешенное для приема поезда
	1.3 Движение поезда по пути приема благодаря тяге локомотива
	1.4 Торможение поезда с прижатием тормозных колодок к колесам вагонов
	1.5 Погашение кинетической энергии движения поезда до полной остановки
2 Отцепка и уборка поездного локомотива от прибывшего состава	2.1 Закрепление состава тормозными башмаками
	2.2 Разъединение сцепного оборудования и тормозных шлангов
	2.3 Перемещение локомотива от состава в ЛХ или на другой путь
3 Подача и прицепка маневрового локомотива	Перемещение маневрового локомотива на станции по маршруту подачи к составу
4 Надвиг состава на горку	Движение состава со скоростью надвига на противоклоне с преодолением сопротивления движению и накоплением потенциальной энергии поднимающегося до отметки горба горки состава
5 Расформирование состава	5.1 Преобразование накопленной потенциальной энергии в кинетическую энергию движения отцепов с потерей энергии на преодоление сопротивлений движению при роспуске состава с горки
	5.2 Торможение отцепов расформировываемого состава на вагонных замедлителях
	5.3 Соударение вагонов на путях сортировочного парка
	5.4 Остановка отцепа в сортировочном парке
6 Осаживание вагонов в сортировочном парке	6.1 Движение одиночного локомотива по маршруту осаживания
	6.2 Сцепка с вагонами и исключение «окна» при перемещении вагонов в парке локомотивом

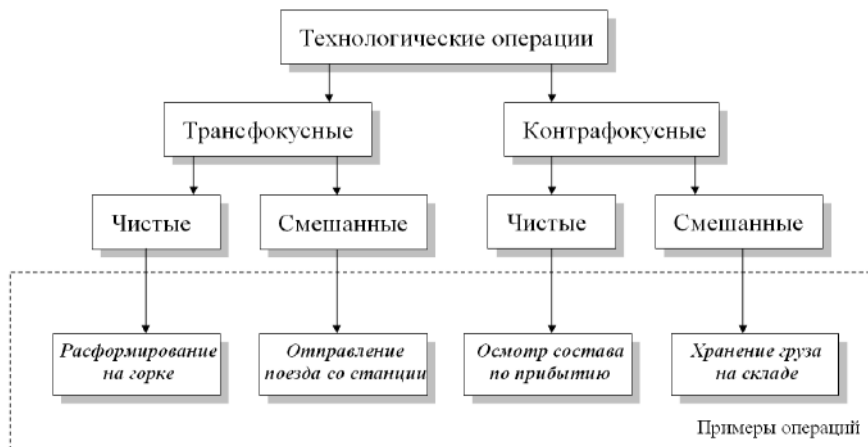


Рисунок 1 – Классификация технологических операций, моделируемых как результат действия физических и других процессов

Как уже отмечалось, при моделировании станционных процессов невозможно рассчитывать на результаты реконструкции движения вагонов, полностью совпадающие с реальными событиями. Использование аналитики расчетов позволит вычислять систематическую составляющую всех процессов, происходящих на станции и вносящих существенную долю в формирование цикличной динамики работы 3D-станции (возможно, до 70–75 % от всех воспроизводимых модельных реконструкций). Непосредственному моделированию подлежат не все возможные изменения состояния объектов, а только те, которые принимают участие в значимых для функционирования модели технологических станционных и существенных с точки зрения безопасности движения процессах (например, операции 1.3, 2.3, 3, 4, 5.1–5.4, 6.1 таблицы 1). При этом должен быть установлен порог детализации виртуального прототипирования, когда наряду с адекватным действительности развитием физических процессов на каких-то этапах происходит своеобразный «прыжок» через несколько состояний, которые не подлежат расчету (например, передача тягового усилия от энергетической установки локомотива через автосцепки вагонов и хребтовую балку на тележки, преодолевающие трения покоя или качения с контактирующим железнодорожным путем).

Однако воздействие подвижного состава на рельсошпальной решётку и земляное полотно порождает аналогичное по силе противодействие рельсов и шпал на колёса вагонов и локомотивов, приводящее к истиранию поверхности катания, появлению наплывов металла, ползунов, ударному влиянию на груз, его крепление и др. В модели предлагается принять условие актив-

ного влияния подвижного состава на путь, которое сопряжено с целью прототипирования работы железнодорожной станции, связанной с восстановлением содержательных образов инфраструктурных объектов, функционирующих в пространстве действия физических сил.

В принципе возможен модельный расчёт влияния, оказываемого железнодорожным путём на подвижной состав. По результатам расчета процессов движения подвижного состава по станционному пути могут определяться неупругие деформации, которые могут привести к увеличению вероятности выхода из строя определённого элемента конструкции или к опасному состоянию, несовместимому с дальнейшей эксплуатацией вагона без ремонта. Однако такой подход к моделированию процессов требует точных сведений о наличии повреждений на всех конструктивных опорных элементах кузова вагона, сцепных и тормозных устройств, текущем состоянии всех поверхностей трения подвижного состава. Поэтому в дальнейшем исследуются только процессы, связанные с воздействием исправного подвижного состава, не имеющего повреждений, на железнодорожный путь, способный к упругой деформации.

На первоначальных этапах разработки эксплуатационной модели станции можно реконструировать динамику только тех состояний, которые определяют реалистичность визуальных эффектов (например, перемещения вагонов). На следующих этапах модельному восстановлению подлежат некоторые внутренние состояния, например, расчет напряжений в рельсах и шпалах. Эти позиции рассматриваются как сложные и требующие использования особых подходов для достоверных реализаций состояний.

Проведенные исследования показывают, что можно выделить три основные группы физических процессов взаимодействия объектов, обеспечивающих выполнение станционных технологических операций.

1 Взаимодействия тягового подвижного состава и вагонов, результатами которых являются перемещения поездов, передач, подач и отдельных вагонов на главных, приемоотправочных, сортировочных, ходовых, соединительных, выставочных и погрузо-выгрузочных путях, а также самого тягового устройства.

2 Взаимодействия пути и подвижного состава, следствием которых являются множественные силовые воздействия на конструкции пути и земляного полотна.

3 Взаимодействия погрузо-выгрузочных устройств и груза, приводящие к перемещению груза из вагона в склад, из склада в вагон, из вагона в автомобиль, из автомобиля в вагон и оказывающие давление на пол вагона, покрытие склада и др. Особым случаем данной группы взаимодействий является модельная реконструкция процессов посадки и высадки пассажиров

при моделировании процессов с пассажирскими вагонами, дизель-поездами и мотор-вагонным подвижным составом.

Таким образом, указанные три группы физических процессов определяют взаимодействие модельных структур некоторых множеств **A** и **B**. Объекты множества **A** всегда активны и приводят к изменению положения или состояния объектов множества **B**. Объекты множеств **A** и **B** рассматриваются как сложные, состоящие из подмножеств (например,  $A_1$  – вагоны и  $A_2$  – грузы). Если активным физическим объектом взаимодействия множества **A** является вагон, то железнодорожный путь, как пассивный объект множества **B**, испытывает нагрузку от подвижного состава и изменяет свое состояние (смещается относительно первоначального положения в некотором направлении). Грузы как объекты подмножества  $B_2$  вследствие процессов перегрузки изменяют свое положение (в вагоне, складе, автомобиле) или свойства (разрушаясь при ударах, действии процессов слеживаемости, повышении температуры и др.). Таким образом, воспроизведение в модели целого ряда операций оказывается связанным с взаимодействием активных или пассивных объектов множеств **A** и **B**. Отсутствие движения объектов на станции указывает на то, что модельные конструкции объектов взаимодействующих множеств **A** и **B** находятся в равновесном состоянии (вагон на приемоотправочном пути), либо контакт объектов **A** и **B** отсутствует (выгрузочный путь не занят вагоном).

Пусть на пути сортировочного парка находится группа из двух груженых вагонов, которые необходимо подать на пункт местной работы и выгрузить из них груз в склад. Исходная позиция интерпретируется как равновесное состояние между двумя объектами множества: **A** (вагоны) и **B** (участок пути). Два вагона как объекты множества **A** – сложные, включающие вагоны и груз, находящийся в них. В совокупности они образуют активную составляющую, физически влияющую на путь и изменяющую состояние рельсошпальной решетки и верхнего строения пути на деформированное. С прицепкой маневрового локомотива и началом движения группы вагонов модельная псевдофизическая структура взаимодействующих объектов изменяется. Появляется новый активный объект **A** – локомотив, способный перемещать вагоны по железнодорожному пути. Вагоны перестают быть безусловно активными, продолжая оказывать действие на преодолеваемые участки станционных путей благодаря собственной массе и массе груза. Поэтому в процессе движения по пути вагоны следует рассматривать как двойственную активно-пассивную конструкцию  $A \leftrightarrow B$ . Дуальная структура вагонов не изменяется до момента их выгрузки на грузовом пункте. После установки локомотивом этих вагонов на грузовых фронтах действие локомотива как активного объекта прекращается и снова возникает модельная



схема с активным вагоном и пассивным выгрузочным путём. Выгрузка вагонов порождает физическую среду с новым активным объектом погрузо-выгрузочным механизмом, взаимодействующим с грузом и определяемым как пассивный объект. Пассивно-активная сфера совместного влияния вагона и груза в период выгрузки нестабильна и уменьшает свое воздействие на путь по мере сокращения массы груза в вагоне в процессе грузовой операции (рисунок 2).

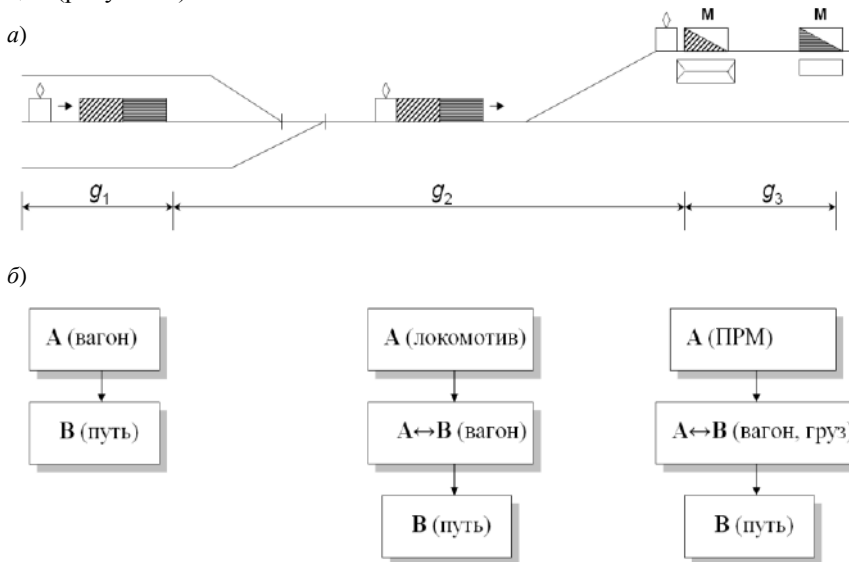


Рисунок 2 – Моделирование операции выгрузки двух вагонов:  
 а – схема перемещения; б – взаимодействие активных и пассивных объектов

Зоны действия ( $g_i$ ) определяют координатные положения ( $g_1, g_2$ ) и статусные состояния ( $g_3$ ) позиции модельных станционных объектов. Процесс выгрузки каждого из двух вагонов, установленных по конкретному фронту, характеризуется определенным статусным состоянием ( $g_{3i}$ ), указывающим на длительность операции, место перемещение груза, номер вагона выгрузки, получателя груза и др. Атрибутивные характеристики ( $g_i$ ) для зоны координатных перемещений и ( $g_{ij}$ ) для зоны состояний формируют динамическую среду изменения различных параметров вагонов и грузов. Поэтому данный интегральный параметр  $g$  следует рассматривать как базовую характеристику для моделирования динамики пространственно-временных изменений станционных объектов.

Второй пример модельного образа описания физических процессов связан с расформированием поезда на горке. Надвиг состава маневровым локомотивом определяет схему взаимодействия активного объекта (локо-

мотива), активно-пассивного объекта (вагона) и активно-пассивного объекта (пути, противуклон надвигной части которого способствует увеличению потенциальной энергии состава, поднимаемого на вершину горки с помощью локомотива). Дополнительное сопротивление движению компенсируется увеличением силы, передаваемой локомотивом, надвигающим состав на горку. На вершине горки активное действие локомотива завершается, и путь роспуска, располагаемый на уклоне, переходит в категорию активных объектов, выступая аналогом некоторого тягового устройства. На длине пути роспуска развиваются физические процессы, в которых железнодорожный путь выступает в качестве компонента двойного назначения. С одной стороны, путь роспуска рассматривается как активный физический элемент действия на отцепы, обеспечивая их движение. С другой стороны, путь испытывает влияние от подвижного состава из-за массы вагонов при их перемещении, ударов по стыкам и боковым воздействиям в кривых. Активный и пассивный механизмы физического влияния действуют одновременно. Благодаря запасу потенциальной энергии и наличию ненулевого уклона спускной части сортировочной горки отцепы движутся без локомотива. Поэтому подвижной состав, скатывающийся по пути роспуска, обладая запасом потенциальной энергии, имеет собственный внутренний тяговый эквивалент, позволяющий квалифицировать вагоны как частично активный элемент взаимодействия с путем (рисунок 3).

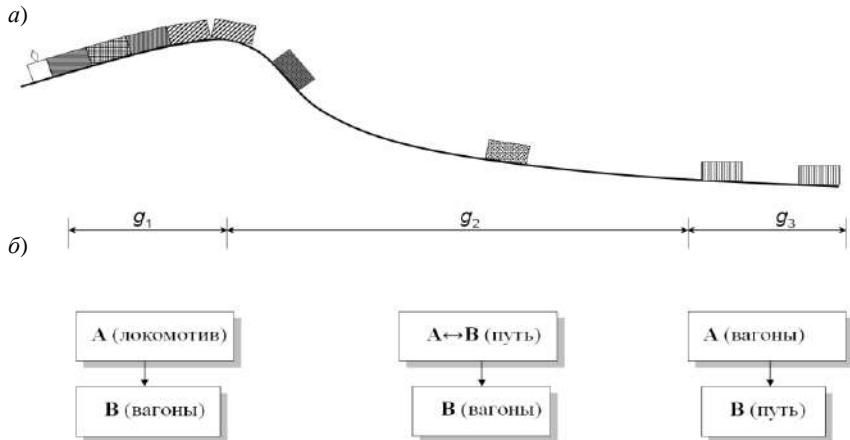


Рисунок 3 – Моделирование операции расформирования:

*a* – схема перемещения; *б* – взаимодействие активных и пассивных объектов

Таким образом, вагоны, локомотивы и железнодорожный путь тесно связаны физическим взаимодействием, в котором контактирующие объекты меняются активной и пассивной ролями в процессе выполнения последова-

тельности процессов, формирующих некоторую технологическую операцию. Приоритетная позиция некоторого объекта определяется действием внешних факторов, образующих общий сценарий развития событий на железнодорожной станции. Существующая норма исполнения технологии, регламент проведения операций устанавливают правила функционирования отдельных объектов, наделяют их соответствующими свойствами, проявляющимися в конкретный и достаточно фиксированный интервал времени. Эти свойства определяют в модели уровень активности или пассивности объекта при взаимодействии с окружением.

На основе конкретных примеров, приведенных на рисунках 2 и 3, предлагается общая модельная схема конструирования технологических операций как набор связанных физических процессов (таблица 2).

Выражения

$$(A_i^S + A_{2j}^S) \rightarrow B_{1k}^S, A_3^S \rightarrow B_{1m}^S$$

указывают на то, что  $i$ -й статичный (индекс  $S$ ) груженный вагон находится на  $k$ -м участке  $B_1^S$  пути, а локомотив  $A_3^S$  воздействует на  $m$ -й участок пути. Рассматривается последовательность операций взаимодействия вагонов и локомотива, приводящих к перемещению вагона на железнодорожном пути (рисунок 4, а).



Рисунок 4 – Положение вагонов и локомотива:

а – обособленное; б – в движении локомотива к вагонам; в – соединенное


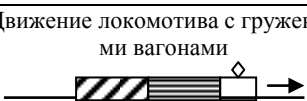
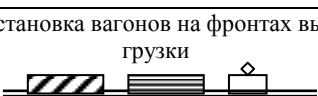
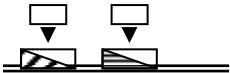
Движение локомотива к двум груженным вагонам, определяется формальной записью  $A_3^D \rightarrow B_{ij}^D$ . Локомотив не взаимодействует с вагонами, а только перемещается от исходного положения на  $V_i$ -м пути до  $j$ -й точки. Покоящийся локомотив со сцепленным составом подачи определяется как группа

$$(A_1^S + A_2^S + A_3^S) \rightarrow B_{1k}^S.$$

Таким образом, все модельные операции переводятся в соответствующие процедурные записи, в основе которых лежат модельные правила, адекватные реальным станционным.

Операнд «+» указывает на сцепленное состояние вагонов и локомотива в одном составе, а также на нахождение груза в вагоне. Операнд « $\rightarrow$ » определяет воздействие, которое оказывает активный объект на пассивный в состоянии покоя  $B_{ij}^S$  или в движении  $B_{ij}^D$ . При стоянке вагона статичное действие на путь осуществляется только в координатно позиционированных точках контакта колеса с рельсом.

Т а б л и ц а 2 – Формализация технологических операций на станции

Объекты множеств			Элементарная операция и визуальная реконструкция	Физические процессы	Формальные выражения процессов
А	А↔В	В			
Вагоны, груз		Путь	<p>Два вагона на пути</p> 	Давление вагонов и массы груза на рельсошпальную решетку и верхнее строение пути	$(A_1^S + A_2^S) \rightarrow B_{1i}^S$
Локомотив		Путь	<p>Локомотив движется по пути</p> 	Давление от локомотива на рельсошпальную решетку и верхнее строение пути	$A_3^D \rightarrow B_{1j}^D$
Вагоны, локомотив, груз		Путь	<p>Сцепление локомотива с гружеными вагонами</p> 	Давление груженых вагонов и локомотива на рельсошпальную решетку и верхнее строение пути	$(A_1^S + A_2^S + A_3^S) \rightarrow B_{1k}^S$
Локомотив	Вагоны, груз	Путь	<p>Движение локомотива с гружеными вагонами</p> 	Динамическое давление от груженых вагонов и локомотива на путь	$(A_1^D + A_2^D + A_3^D) \rightarrow B_{1k}^D$
Локомотив	Вагоны, груз	Путь	<p>Установка вагонов на фронтах выгрузки</p> 	Давление груженых вагонов и локомотива на различные участки пути	$(A_{11}^S + A_{21}^S)_i \rightarrow B_{1n}^S$ $(A_{12}^S + A_{22}^S)_i \rightarrow B_{1p}^S$
ПРМ	Вагоны	Груз, путь	<p>Выгрузка грузов из вагонов ПРМ</p> 	Уменьшающееся давление на путь по мере выгрузки вагонов	$A_3^S \rightarrow B_{1z}^S$ $A_{41}^D \rightarrow B_{21}^D$ $A_{42}^D \rightarrow B_{22}^D$ $A_{11}^S \rightarrow B_{1n}^S$ $A_{12}^S \rightarrow B_{1c}^S$

Модельная реконструкция данного физического процесса связывается с расчётом усилий, передаваемых вагоном через тележки на 8 опорных точек пути (для четырехосного вагона). В результате моделирующих расчётов можно сформировать объемное поле напряжений участка пути, проникающее через рельсошпальную решетку в земляное полотно. При значительном давлении возникают и нарастают деформационные процессы, имеющие обратимый или необратимый характер. Пятна контакта колес одного вагона с рельсами позволяют зафиксировать его координатное положение на станционном пути в состоянии покоя подвижного состава или перемещения вагонов. В каждый конкретный момент времени, кратный кванту расчётных процедур, воздействие на участок пути определяется в пространственно-временном поле положений и состояния взаимодействующих объектов пути и подвижного состава. Это значит, что по результатам расчетов на некоторый момент времени развертывания модели формируется блок данных координат положения вагонов и локомотивов, величин давления на рельсошпальную решётку и верхнее строение пути, а также возникающих упругих деформаций, которые полностью гасятся после снятия нагрузки либо приводят к различным изъянам области взаимодействия (сколы и трещины рельсов и шпал, просадки балластной призмы и верхнего строения пути).

Операции а и в (см. рисунок 4) рассматриваются как основные (технологические). Выполнение промежуточной операции б формирует состав, способный перемещаться по станционному пути, но данная операция не приводит к изменению характеристик объектов (локомотива, вагонов и грузов в них). Модельное воспроизведение трехмерного образа операции б достаточно сложное и требует значительных вычислительных средств. В процессе выполнения этой операции происходит сцепление автосцепок первого вагона и локомотива, погашение остаточной энергии движения массой инерции прицепляемого состава с возможным откатом всей динамической системы до полного торможения локомотивом. Ее реконструкция в данной модели станции не производится, так как поставленная задача связана с прототипированием только технологических, эксплуатационных аспектов работы станции, продуцирующих реалистичную, но не глубоко детализированную схему происходящих физических процессов. Таких «физически-нетехнологических» операций оказывается некоторое множество, которое включается в перечень трансфокусных, полностью определяемых механическими и электромагнитными взаимодействиями элементов конструкций подвижного состава и пути (разъединение и соединение тормозной магистрали, управление стрелочными переводами и сигналами в ЭЦ, работа замедлителей на горке, опробывание автотормозов, торможение вагонов, нарастание скорости движения за счет силы тяги

локомотива и др.). Данные операции будем называть компрессивными, указывая тем самым на сжатый вид их в последующей визуальной 3D-реконструкции. В технологической модели станции они реализуются в одномоментном исполнении, в течение одного кванта времени расчетных процессов (разъединение тормозной магистрали состава, перевод стрелок, сцепление локомотива с вагоном) или за некоторый достаточно упрощенно рассчитываемый период развития процесса (торможение, разгон). Первая категория относится к жестким компрессивным, вторая – к мягким компрессивным процессам. Реализация мягких компрессивных операций требует разработки особых алгоритмов учета взаимодействия объектов в условиях возникающих деформаций, влияния остаточных напряжений, взаимокорреляции гармоник воздействия волновых фронтов в твердых и газообразных телах и др.

Жесткие компрессивные операции в модельном исполнении рассматриваются как фоновые преобразования 3D-инсталляции станции, выполняемые одновременно с текущим физическим процессом, который формирует некоторую технологическую операцию. Например, сцепление локомотива с составом в модели производится при соприкосновении зон нахождения локомотива и вагона. Каждая из этих зон ограничивается плоскостями, проходящими через оси автосцепок соответственно локомотива и вагона. Если плоскости границ зон локомотива и вагона на расчетный момент времени отстоят друг от друга менее, чем на некоторое  $\epsilon_{\min}$ , то программно идентифицируется сцепление автосцепок.

Многие компрессивные операции характеризуются более продолжительными итерациями сложных физических процессов. Примером такой операции является разгон поезда при отправлении со станции в течение некоторого времени  $n\tau_{\text{кв}}$ , где  $n$  – количество расчетных квантов состояния объектов модели при отправлении поезда,  $\tau_{\text{кв}}$  – продолжительность модельного состояния. Полагаем, что модельная станция функционирует только в границах пространства раздельного пункта. Поэтому отправляемый на перегон поезд некоторым образом исчезает из 3D-реконструкции после пересечения знака «Граница станции». После ухода со станции модельный поезд становится элементом информационной базы отправленных поездов. Аналогично прибывающий на станцию поезд появляется как станционный объект, замедляющий скорость своего движения в течение аналогичного промежутка времени  $m\tau_{\text{кв}}$ . Следует отметить, что в общем случае  $n \neq m$ , так как продолжительности разгона и замедления зависят от длины маршрута движения поезда по станции, скорости, с которой поезд проходит границу пространства станции, характера движения (поездным или маневровым порядком, вагонами или локомотивами вперед и др.).

Рассматривается возможность *полной мягкой компрессионной операции*, реализуемой наряду с частичной формой, рассмотренной выше. В этом случае разгон и замедление составов реконструируются без программного усе­чения, которые оказываются актуальными для маневровых передвижений (перестановка вагонов из парка в другой парк станции, перемещение локо­мотивов по станции). Полные мягкие компрессионные операции могут обеспечиваться сложными модельными алгоритмами разгона и торможения вагонов, связанными с жёсткими компрессионными операциями (сцепления движущегося локомотива с вагонами, снижение скорости локомотива при преодолении инерционного сопротивления стоящих вагонов и последующее нарастание скорости движения всего состава).

Если в аналитической записи формальной операции отсутствует элемент  $\rightarrow T_j^D$ , то координатное положение вагона и воздействие на путь подвижного состава не определяются, что позволяет реализовать визуальную  $V$ -модель станции, которая может использоваться в презентационных целях, наглядно отражая все процессы, происходящие на станции без расчета воздействий модельных тел (вагонов, локомотивов, грузов) на информационные образы же­лезнодорожного пути. При определении влияния подвижного состава на путь формируется расчетно-визуальная  $RV$ -модель, которая представляет собой структурную реконструкцию функционирующей железнодорожной станции, позволяющую отслеживать определенные ситуации, наступающие в конкрет­ных взаимодействиях станционных объектов. Результаты регистрации вели­чин параметров могут использоваться для коррекции дальнейшего развития модельных процессов, что обеспечит практику работы важным статистиче­ским материалом, который поможет диагностировать наступление критиче­ских ситуаций и упреждать их благодаря своевременным оперативным и тех­ническим мерам.

При необходимости реализации какой-либо модели станции следует использовать такой алгоритм ее создания, который позволил бы в зависимости от требуемой задачи (воспроизведение простых эффектов движения или глубокого анализа динамики происходящих процессов на станции) репро­дуцировать  $V$ - или  $RV$ -модель.

Математическое описание технологических процессов железнодорож­ной станции связывается с аналитическим представлением перемещения ва­гонов по станционным путям, а также грузов в вагонах, объектах хранения и транспортирования. Моделируемый станционный объект наделяется ат­рибутами, которые могут изменяться по величине при взаимодействии с другими объектами. Выделяются три множества моделируемых объектов, способных изменять свое состояние:

1 Подвижной состав ( $P$ ).

1.1 Вагоны различного типа, обеспечивающие перевозку грузов или пассажиров ( $P_1$ ).

1.2 Локомотивы, перемещающие вагоны по станции ( $P_2$ ).

1.3 Погрузо-разгрузочные машины, обеспечивающие передачу груза из вагона в склад, из склада в вагон, из вагона на автомобиль, из склада на автомобиль, из автомобиля в вагон ( $P_3$ ).

2 Станционные пути ( $T$ ).

3 Груз ( $G$ ).

Каждое множество этих объектов характеризуется определенным набором константных и переменных характеристик.

$$P_1^{\text{const}} \subset (\text{type}, \text{os}, M_T, L, Gr),$$

где  $\text{type}$  – тип вагона;  $\text{os}$  – осьность вагона;  $M_T$  – масса тары;  $L$  – длина вагона по осям автосцепки, м;  $Gr$  – грузоподъемность вагона.

$$P_1^{\text{var}} \subset (M_g, v),$$

где  $M_g$  – масса груза в вагоне;  $v$  – скорость движения вагона.

$$P_2^{\text{const}} \subset (\text{type}, \text{Numb}),$$

где  $\text{type}$  – тип локомотива,  $\text{Numb}$  – номер локомотива.

$$P_2^{\text{var}} \subset (v, \text{Char}_R),$$

где  $v$  – скорость движения;  $\text{Char}_R$  – характер работы (поездная, маневровая).

$$P_3^{\text{const}} \subset (\text{type\_Mashine}, \text{Gruz\_Mashine}),$$

где  $\text{Type\_Mashine}$  – тип погрузо-разгрузочной машины;  $\text{Gruz\_Mashine}$  – грузоподъемность ПРМ.

$$P_3^{\text{var}} \subset (x_i, y_i, z_i),$$

где  $x_i, y_i, z_i$  – координаты контрольных точек текущего положения ПРМ,

$$T^{\text{const}} \subset (\text{type}_r, \text{type}_b),$$

где  $\text{type}_r$  – тип рельса;  $\text{type}_b$  – тип балластной призмы.

$$T^{\text{var}} \subset (N, x_i, y_i, z_i, R_{i(\text{пл})}, R_{i(\text{пр})}, I_i, F_i, B),$$

где  $N$  – число координатно позиционированных поименованных контрольных точек;  $x_i, y_i, z_i$  – координаты точек;  $R_{i(\text{пл})}$  – радиусы кривых в плане  $i$ -й точки;  $R_{i(\text{пр})}$  – радиусы кривых в профиле  $i$ -й точки;  $I_i$  – уклон  $i$ -й точки;  $F_i$  – внутреннее напряжение в  $i$ -й точке;  $B$  – балльность пути.

$$G^{\text{const}} \subset (N_M),$$

где  $N_M$  – наименование груза;  $Gab$  – габарит погрузки груза

$$G^{\text{var}} \subset (M_T, S_T, Gab),$$

где  $M_T$  – масса груза;  $S_T$  – состояние груза.



На конкретном примере рассмотрим модельную интерпретацию технологического процесса обслуживания грузового поезда, поступающего на станцию в переработку. Пусть в парк приема участковой станции прибывает состав из 50 вагонов в расформирование. Прием данного поезда на приемо-отправочный путь определяется формальной записью

$$\left( \sum_{i=1}^{50} P_{1i}^D + P_2^D \right) \rightarrow T_j^D.$$

При этом следует обратить внимание на то, что используется литерация описания состояний активных и пассивных объектов с заменой символики на конкретные атрибутивные конструкции (вместо общих **A** и **B** применяются соответствующие *P* и *T*). Индекс «*D*» сохраняется как указатель на динамику процесса приема поезда и перемещение его по главному и приемо-отправочному путям.

Согласно установленной технологии работы станции сортировочный листок определяет разбиение состава на отцепы, которое производится посредством расцепки вагонов и разъединения тормозной магистрали в парке приема с проведением соответствующих операций работниками ПТО и ПКО.

$$\sum_{j=1 \vee 2 \vee 3 \dots}^k P_{ij}^S = \sum_{i=1}^{50} P_{1i}^S.$$

Данная процедура в модельном исполнении представляется жесткой компрессивной операцией, выполняемой сразу после отцепки поездного локомотива от состава. Для большей реалистичности в модель может быть введена соответствующая задержка времени, имитирующая подготовку и выполнение расцепки поезда согласно назначениям вагонов. Подобные задержки в развитии модели называются *лонгирующими*.

Подача и прицепка маневрового локомотива осуществляется при наличии условий свободности маневрового локомотива, выполняющего расформирование составов, а также отсутствия враждебности по маршруту подачи локомотива от места его нахождения на путь расположения состава с последующим движением вагонами вперед по пути роспуска. Поэтому в модель функционирования станции между основными технологическими операциями вставляются *контраструктивные* фрагменты интервалов времени, интерпретируемые в реальных условиях как ожидания выполнения операций. Их длительность рассчитывается по результатам взаимодействия с другими станционными объектами.

Роспуск состава осуществляется через горку (модельная реконструкция *G*) или на вытяжном пути (модельная реконструкция *W*). В обоих случаях требуется определенная модельная «накачка энергией» спускаемого состава посредством либо надвига на горку с обеспечением вагонам необходимого

запаса потенциальной энергии, превращаемого в кинетическую энергию скатывания с горки, либо разгона состава локомотивом, прямо передающего вагонам энергию движения, которая после резкого торможения локомотива способствует отрыву отцепов от состава. Модельные реконструкции  $G$  и  $W$  приводят к одному результату, заключающемуся в том, что после завершения расформирования все вагоны состава размещаются на соответствующих путях сортировочного парка.

Перемещение вагонов по путям станции оказывает давление и ударное воздействие на верхнее строение пути. Динамика этих процессов для разрабатываемой модели существенна только для оценки деформируемых состояний пути, имеющих неупругий характер. Изменение координатного положения самой колеи из-за продольных и поперечных сдвигов, разрушения металлических и железобетонных частей решётки фиксируется по контрольным точкам и хранится в информационной базе модели. Таким образом, энергия, сообщаемая расформировываемому составу при надвиге на горку  $E_{над}$  соотносится с энергией ускоренного движения локомотива с составом на вытяжном пути  $E_{выт}$ . В количественном отношении  $E_{над}$  и  $E_{выт}$  могут различаться, так как в модельной реконструкции  $G$  потребуется меньше энергии для докатывания отцепов до расчетных точек сортировочных путей, чем в модельной реконструкции  $W$  (без учета затрат энергии на осаживание в модельной реконструкции  $G$ ). Соответствующие воздействия на путь обоих способов расформирования также могут различаться. Мягкое движение состава по подвижной части горки с постоянной скоростью надвига обеспечивает недеформируемое влияние подвижного состава на план и профиль соответствующего участка пути. В то же время резко ускоренное и замедляемое движения состава при расформировании поезда на вытяжном пути создает условия для множественных негативных воздействий на рельсошпальную решётку. Постоянные разнонаправленные силы способствуют образованию различных дефектов пути, существенных с точки зрения безопасности движения.

В модельной реконструкции станции все расчётные процедуры разделяются на координатные (оценка месторасположения объекта в процессе выполнения операции) и статусные (оценка состояния объекта в процессе взаимодействия с другими станционными объектами) (см. рисунок 3). Если вагоны располагаются на данном пути и перемещаются в его пределах (исключение – окна в сортировочном парке, сборка в подачу после завершения грузовых операций), то регистрируется изменения положения его координат с передачей нагрузки на другой участок пути  $T_{лк}$ . Фиксация координатного положения вагона позволяет указать точки приложения силы его воздействия на станционный путь. Поэтому распределение нагрузки на путь рассматривается как линейная структура пятен контакта колеса с рельсом вдоль полотна дороги.

Координатное положение вагона на пути можно определить как проекцию точки центра его тяжести на ось пути. Такая схема называется *точечной*. При смещенном относительно продольной или поперечной осей вагона положении груза точечная привязка укажет на реперную отметку вне оси пути, что влечет за собой расчёт неравномерной нагрузки на рельсовые нити колеи пути. *Пространственная привязка* определяет матрицу координат контрольных точек по всей конструкции вагона или локомотива. Расчёт нагрузки на путь от подвижного состава требует использования только пространственной привязки с определением позиций пятен контакта колеса с рельсом.

Ключевыми элементами, указывающими на изменение координатного положения объектов, являются:

- одиночный локомотив в движении  $P_2^D$ ;
- локомотив с вагонами в движении  $P_2^D + P_1^D$ ;
- погрузо-разгрузочный механизм, перемещающий груз  $P_3^D$ .

Композиционные конструктивы взаимодействия модельных объектов позволяют реконструировать соответствующие технологические операции. Например, разъединение вагонов в составе можно представить как

$$P_2^D \wedge \sum_{i=1}^m P_{li}^D - P_{1k}^D - P_{1(k+1)}^D.$$

Данная запись указывает на отцепку отдельно  $k$ -го и  $(k+1)$ -го вагонов.

Следует отметить, что формализованная операция

$$P_2^D \wedge \sum_{i=1}^m P_{li}^D - (P_{1k}^D + P_{1(k+1)}^D)$$

определяет другой результат, при котором  $k$ -й и  $(k+1)$ -й вагоны сцеплены друг с другом. Поэтому данная операция не дистрибутивна.

Объединение в состав всех  $n$  вагонов из состава расформированного поезда ( $n < m$ ) на данном сортировочном пути определяет модельная операция осаживания

$$(P_2^D + \sum_{i=1}^n P_{li}^D) \rightarrow T_{1j}^D.$$

Операция сцепления (в модельном представлении – суммирования) может быть выполнена только в движении, поэтому использование индекса «D» излишне и представленная выше операция может быть записана как

$$(P_2 + \sum_{i=1}^n P_{li}) \rightarrow T_{1j}.$$

Различие операндов «+» и «^» заключается в том, что первый указывает на соединение (сцепление) объектов, а второй – на выполнение операции в текущем состоянии (сцепленном или разъединенном виде).

Роспуск с горки в модельном исполнении рассматривается как повторяющаяся операция скатывания отцепов на пути сортировочного парка при непрерывном надвиге сокращающегося по величине состава.

$$(P_2 \rightarrow T_{1k} \wedge \underset{\substack{x \\ k \\ i=1, \\ j=1}}{\text{Rep}}((P_{1i} \rightarrow T_{1j}) - P_{1i}).$$

Особенностью данной операции является различие участков путей, занимаемых локомотивом ( $T_{1k}$ ), и отцепами вагонов ( $T_{1j}$ ).

Если расформирование производится на вытяжном пути, то при изолированных толчках для данной модельной реконструкции

$$\underset{\substack{x \\ k \\ i=1, \\ j=1}}{\text{Rep}}[(P_2 \rightarrow T_{1i})_j \wedge (P_{1i} \rightarrow T_{1j}) - P_{1i}].$$

$T_{1k}$ -й участок пути в формальной реконструкции рассматривается как совокупный маршрут движения от начальной до конечной точки. В качестве граничных позиций маршрута могут быть:

- перегон с  $M$ -го направления ( $Per M$ );
- $i$ -й путь парка ( $T_i^{ПО}, T_i^{СП}, T_i^{ПП}, \dots$ );
- $i$ -й погрузо-выгрузочный путь терминала или конкретного подъездного пути ( $T_i^{\text{терм}}, T_i^{\text{комбинат}}, \dots$ );
- точка, отстоящая на определенном расстоянии от начальной на  $i$ -м вытяжном, сортировочном или другом пути

$$(T_i^{ПО} + 250, T_i^{\text{ВЫП1}} + 75, T_i^{\text{ПП2}} - 60, \dots).$$

Конкретная точка граничной позиции пути определяется по возможному месту установок вагона в начале данного пути. Запись

$$P_2 \wedge \sum_{i=1}^{20} P_{1i} \rightarrow (T_2^{\text{ПП}}, T_{10}^{\text{СП}} + 260)$$

указывает на операцию перемещения 20 вагонов со второго пути парка приема на путь 10 сортировочного парка с движением по данному пути на расстояние 260 м.

Если, например, требуется из состава поезда 50 вагонов, находящихся в парке приема, подать под выгрузку вагон с номером 26473826 на путь 6 грузового станционного терминала с перемещением по нему на 75 м, то соответствующая система модельных операций представляется в виде

$$\begin{cases} P_2 + \sum_{i=1}^{50} P_{1i} - P_1^{26473826}; \\ P_2 \wedge P_1^{26473826} \rightarrow (T_2^{\text{пп}}, T_6^{\text{терм}} + 75). \end{cases}$$

Если данный вагон подается после сборки остальных вагонов, то система операций выглядит как

$$\begin{cases} P_2 \wedge \sum_{i=1}^{50} P_{1i} - P_1^{26473826}; \\ P_2 + P_1^{26473826} \rightarrow (T_2^{\text{пп}}, T_6^{\text{терм}} + 75). \end{cases}$$

Необходимо обратить внимание на то, что

$$P_2 \wedge \sum_{i=1}^{50} P_{1i} - P_1^{26473826}$$

является интегральной операцией, так как требуемый вагон может находиться не последним в составе (например, 25-м), и в таком случае возникнет необходимость выполнения дополнительных маневровых операций на пути 2 парка приема с занятием другого пути.

$$\begin{cases} P_2 \wedge \sum_{i=1}^{50} P_{1i} - \sum_{j=1}^{25} P_{1j} (T_2^{\text{пп}}, T_3^{\text{пп}}); \\ P_2 \wedge \sum_{i=1}^{25} P_{1i} - P_1^{26473826}; \\ P_2 \wedge \sum_{j=1}^{24} P_{1j} \rightarrow (T_3^{\text{пп}}, T_2^{\text{пп}}); \\ P_2 - \sum_{j=1}^{24} P_{1j} \rightarrow T_2^{\text{пп}}; \\ P_2 \rightarrow (T_2^{\text{пп}}, T_3^{\text{пп}} + 24 \cdot 15) + P_1^{26473826}. \end{cases}$$

Первое выражение системы определяет операцию отцепки 25 вагонов и перестановки их на путь 3 парка приема. Второе уравнение идентифицирует операцию отцепки на пути 3 ПП от группы из 25 вагонов требуемого вагона с номером 26473826. Третье уравнение указывает на перестановку 24 вагонов с пути 3 на путь 2 ПП. Четвертое уравнение определяет перемещение одиночного локомотива с пути 2 на путь 3 ПП. Расстояние  $24 \times 15$  м проходит локомотив по пути 3 до места нахождения требуемого вагона с его прицепкой.

Таким образом, появляющиеся промежуточные трансфинитные модельные операции реконструируют целый ряд маневровых передвижений, сопутствующих выполнению основной операции. Подобные трансфинитные операции могут производиться на нескольких уровнях детализации

технологических процессов. Например, указанная выше система трансфинитных операций может быть детализирована описанием передвижений в горловинах с занятием маршрутов соответствующих стрелочных переводов (вторая гармоника трансфинитных операций). При этом элементы операции второй гармоники «вплетаются» в отдельные позиции первой, так как выполнение каждого маневрового передвижения по перестановке вагонов на путях парка приема связано с занятием горловины. Для воспроизведения трансфинитных операций второй гармоники, приведенных в рассматриваемой выше системе, требуется формализовать топологию горловины парка приема (рисунок 5).

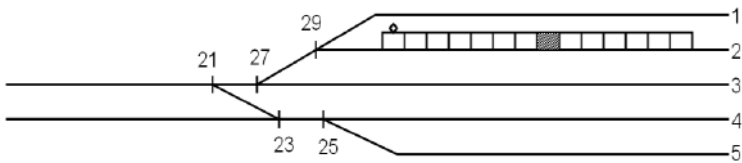


Рисунок 5 – Схема горловины парка приема и начального положения состава расформировываемого поезда

Выполнение группы из пяти трансфинитных операций связано с реализацией полурейсов вытягивания группы из 25 вагонов с пути 2 через стрелки 29, 27 и осаживания через стрелку 27 после ее перевода на маршрут пути 3.

$$PR1^+ : P_2 \wedge \sum_{i=1}^{25} P_{1i} \rightarrow (STR(29,27));$$

$$PR2^- : P_2 \wedge \sum_{i=1}^{25} P_{1i} \rightarrow (STR(27)).$$

Указанные операции предваряют префиксные коды  $PR1^+$  и  $PR2^-$ , определяющие номер полурейса и движение локомотивом вперед (+) или вагонами вперед (-). Префиксный код рассматривается как метка, указывающая на повторяющуюся в дальнейшем операцию, которую можно не воспроизводить полностью, а лишь обозначать ее соответствующим образом. Поэтому все операции в модели должны быть поименованы.

В модели станции могут использоваться префиксные коды, указывающие на характер выполняемых операций: ускоряющие (*accel*), замедляющие (*decel*), статические (*static*) и устойчиво динамические (*const dynamic*). В данном случае префиксный код указывает на характер физического процесса, выраженный как формальная операция, следующая за позицией префиксного кода. Префикс ускорения *accel* продуцирует динамику операций, выполняемых на участке разгона подвижного состава. Например, перестановка вагонов на путях станции производится от точки *A* до точки *B* с возрастающей скоростью, изменение которой зависит от длины полурейса и количества переставляемых вагонов (рисунок 6).

Префикс замедления *decel* определяет характер производства операции на станции от точки *C* до точки *D* с уменьшением скорости. Время в пути состава с постоянной скоростью от точки *B* до точки *C* фиксируется префиксом устойчиво динамического движения *const dynamic*.

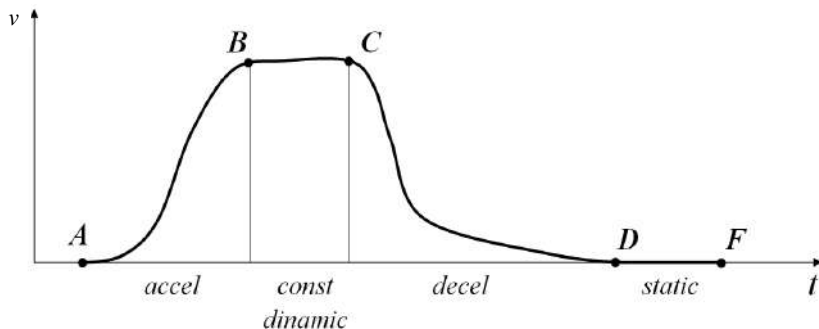


Рисунок 6 – Префиксная кривая выполнения операции на станции

Префикс покоя состава *static* определяет время стоянки от точки *D* до точки *F*.

Полная префиксная кривая характеризует процесс выполнения некоторой технологической операции (от точки *A* до точки *F*), включая все префиксные стадии. При этом последовательность

$$accel \rightarrow const\ dynamic \rightarrow decel \rightarrow static$$

называется *полной префиксной структурой*.

Процессная структура *static* может варьироваться в различной связи с другими префиксами. Например,

$$static \rightarrow accel \rightarrow const\ dynamic \rightarrow decel \rightarrow static$$

определяет позицию, когда выполнение некоторой операции сопровождается ожиданием начала движения. Подобная схема называется *расширенной префиксной структурой*.

$$accel \rightarrow const\ dynamic \rightarrow decel$$

исключает ожидания и интерпретируется как *сокращенная префиксная структура*. Возможны другие сложные варианты выполнения маневровых операций с рядом повторяющихся префиксных позиций (рисунок 7).

Выбор конкретной схемы выполнения технологической операции, сопровождающейся движением состава с переменной скоростью, осуществляется на основе анализа текущего состояния путей, занятых подвижным составом, свободы маневровых локомотивов, наличия параллельных маршрутов в горловинах и в парках и др.

Таким образом, все модельные технологические операции на шкале времени можно рассматривать как последовательность определенных инструкций, периодически повторяющихся в гармониках различных порядков (рисунок 8).

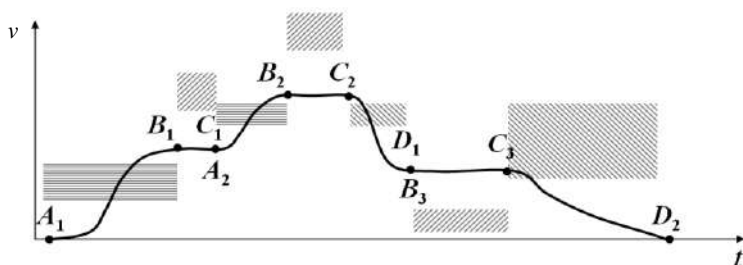


Рисунок 7 – Сложная префиксная кривая выполнения технологических операций на станции

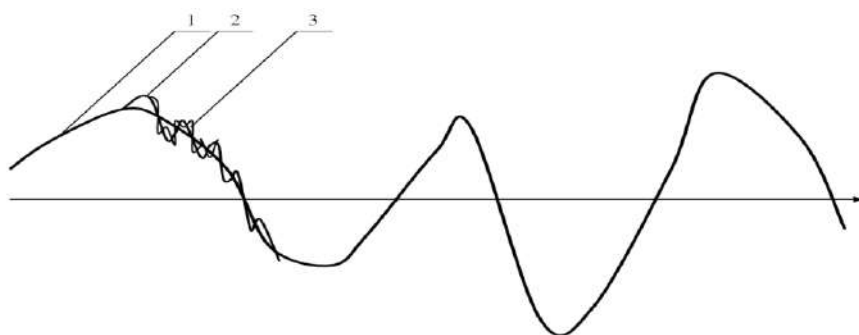


Рисунок 8 – Гармоническая структура модельного образа функционирующей железнодорожной станции с выделением:

1 – основного ряда операций; 2 – первой гармоники; 3 – второй гармоники

При этом наблюдается нестрогая периодичность с определенным нарушением длительности фаз, так как реальные технологические операции на станции повторяются с разбросом величин характерных параметров. Поэтому гармоническая структура модельного процесса имеет некоторую асимметричность.

Влияние гармоник рассматривается как действия менее значимых факторов. На периодическое влияние основного ряда операций накладываются другие объективные условия, которые можно оценивать как имеющие вероятностное происхождение. Учет причинно-следственных обстоятельств действия сложных сопутствующих позиций (особенностей путевого развития парков и горловин, плана и профиля путей) позволит точнее настраи-



вать работу модели. Многоуровневая гармоническая структура станции позволяет формировать различные модельные решения в зависимости от требуемой точности, прогнозных и других оценок.

Модельная операция – это некоторое имитирующее воздействие на станционные объекты, приводящее к изменению их состояний. Данное воздействие носит относительно завершённый характер и связывается с определенной технологической операцией или ее частью, которую можно обозначить соответствующим именем. Например, перестановка состава с пути парка приема в сортировочный определяется как

$$P_2 \wedge \sum_{i=1}^{20} P_{1i} \rightarrow (T_2^{\text{ПП}}, T_3^{\text{СП}}) = \text{MoveTrain}(m, \text{adr1}, \text{ard2}),$$

где *MoveTrain* – модельная инструкция, рассматривается как именованная операция с характеризующими параметрами; *m* – число вагонов в составе; *ard1*, *adr2* – начальная и конечная позиции состава до и после выполнения данной операции.

Следует отметить, что модельная операция *MoveTrain()* содержит определенное количество трансфинитных операций. Формирование множества именованных основных и трансфинитных операций позволит воспроизводить технологию работы станции с визуализацией корректных физических состояний объектов в 3D-представлении.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Система моделирования движения жидкости и газа FlowVision. ОКП 50 3000. Технические условия [Электронный ресурс]. – М. : ИЦ ПС ФГУП «ОКБМ». – 22 с. – Режим доступа : <http://docplayer.ru/36995299-Sistema-modelirovaniya-dvizheniya-zhidkosti-i-ga-za-flowvision.html>. – Дата доступа : 10.07.2018.

2 Торн, А. Основы анимации в Unity / А. Торн. – М. : ДМК, 2016. – 176 с.

3 Головнич, А. К. Верификация динамической модели физических процессов виртуальных объектов технической системы / А. К. Головнич // Информационные технологии и системы : материалы Междунар. науч. конференции. – Минск : БГУИР, 2015. – С. 46–47.

*A. K. GOLOVNICH*

#### FUNCTIONAL-PROTOTYPING 3D MODEL OF A RAILWAY STATION ON THE BASIS OF PROCESS PHYSICS

The possibility to reproduce technological processes at the railway station in a dynamic three-dimensional model is investigated in accordance with the physical laws of motion, collision and friction of track facilities, rolling stock and cargo. The criteria for the quality of the model reconstruction of processes that provide verified prototyping for the maintenance of train, car, passenger and cargo traffic at stations are determined.

Получено 15.12.2018.