

УДК 656.21:53.072:004.9

А. К. ГОЛОВНИЧ

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель
golovnich_alex@mail.ru*

КОГЕРЕНТНОСТЬ ПРОЦЕССОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СТАНЦИИ И ЕЕ ПРОТОТИПА

Исследуются возможности достоверного моделирования динамических процессов на железнодорожной станции с оценкой состояния прототипированных объектов по некоторому шаблону натурального эксперимента. Условием верификации модели является сходимость значений координатного положения модельных и реальных вагонов на станционном пути в заданное время. Рассматриваются основные требования к реализации когерентных моделей, имеющих структуру, изоморфную реальному образу.

Моделирование динамических процессов сложных технических систем формирует обособленную пространственно-временную локацию виртуальной симуляции, развивающейся в соответствии с определёнными модельными правилами, имитирующими физические процессы. Эти правила рассматриваются как причины изменения состояний модельных объектов.

Однако подобные алгоритмические правила лишь приближенно описывают действие природных законов окружающего мира. Состояния объектов реальной технической системы изменяются в результате коррелированного воздействия многих внешних и внутренних факторов теплового, электромагнитного, гравитационного и другого характера. Модельная реконструкция способна учитывать воздействие сил определенного значимого порядка влияния на объекты, непосредственно соприкасающиеся друг с другом или находящиеся в зоне рассчитываемого контакта. Прочие, как правило, относятся к случайным воздействиям и могут учитываться в виде некоторой поправочной величины. Поэтому важно, чтобы модельные объекты повторяли состояния своих прототипов, чего можно достичь при идентичных условиях протекания процессов модели и реальной системы. Для этого по мере развития модельного эксперимента его результаты должны сопоставляться с аналогичными прототипными процессами реальной системы. По результатам оценки состояний объектов модели и реальности ожидаются различные взаимные отклонения (рисунок 1).

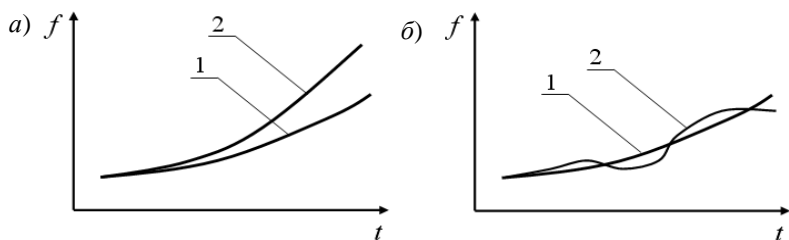


Рисунок 1 – Фазовые кривые состояний объектов реальной (1) и модельной (2) систем: а – дивергирующие, б – диспергирующие

Однако следует отметить, что убедительный эксперимент для проверки адекватности алгоритмических правил, имитирующих действие реальных физических законов, подготовить и провести достаточно сложно. Если определить некоторый эталонный процесс, например, для конкретной железнодорожной станции провести видеосъемку технологических операций приёма и расформирования поезда с фиксацией всех начальных состояний объектов станционной инфраструктуры и подвижного состава (в том числе и их дефектов, ветровой нагрузки, электромагнитных излучений, тяговых усилий поездных и маневровых локомотивов) и реализовать их в модели, то сравнение пространственных позиций объектов прототипа и информационной имитации позволит построить соответствующие фазовые кривые и определить их тип. Рассогласования позиций будут наблюдаться по причине неполного или некорректного учёта влияния множества взаимоскоррелируемых воздействий. При этом можно ожидать, что фазовые кривые координатного положения модельных объектов будут соответствовать графику рисунка 1, а, так как алгоритмические правила содержат расчётные процедуры определения величин сопротивления движению вагонов без учёта возникающих трений в многочисленных сочленениях элементов конструкции подвижного состава, без влияния трудно регистрируемых дефектов пути и вагонов, возможных форс-мажорных обстоятельств, которые имеют место в реальных условиях эксплуатации железнодорожных станций. В результате расчётные сопротивления движению модельных объектов оказываются меньше, а соответствующие перемещения вагонов – больше, с фиксацией положения вагонов дальше от исходных точек начала движения по сравнению с прототипными аналогами.

Благодаря возможности многократного воспроизведения модельные операции могут повторяться с соответствующей корректировкой в расчётах величин сопротивлений движению вагонов, добавляя неучтенные потери на работу сил сопротивления поправочными коэффициентами, что в конечном итоге может привести к совпадению или близким значениям фазовых модельной 2 и прототипной 1 кривых. Поэтому соответствующие корректировочные меры позволяют изменить *дивергирующие* (см. рисунок 1, а) на *диспергирующие* (см. рисунок 1, б) графики сопоставляемых фазовых кривых.

В этом случае состояния модельных объектов определённым образом повторяют состояния своих прототипов, распределяясь в некотором допустимом множестве незначительно различающихся состояний от основного идентифицирующего, которым обладает реальный объект. Если кривая 1 на рисунке 1, б является целеполагаемой, то состояния объектов модели должны изменяться таким образом, чтобы характеризующая их фазовая кривая 2 «нализывалась» на первую, определённым образом обвивая её. Формирование подобной взаимодействующей структуры кривых, описывающих указанные процессы с тяготеющей конфигурацией кривой 2 к кривой 1, называется *имбрейсингом* (embracing). Embrace-конфигурация определяется внутренней связностью кривых, исключающих отклонение модельной кривой от прототипной более чем на некоторые значения лимитной области.

Проверка сходимости параметрических позиций модели и реальности (MR-позиций) выполняется по определённым ключевым состояниям объектов. Например, для моделирования процесса приёма и расформирования поезда на станции выделяем следующие операции:

- подготовки маршрута для приёма поезда (O_1);
- приёма поезда на путь приемоотправочного парка (O_2);
- закрепления состава на пути (O_3);
- отцепки поездного локомотива (O_4);
- уборки локомотива в депо (O_5);
- подачи маневрового локомотива (O_6);
- прицепки к составу маневрового локомотива (O_7);
- уборки башмаков из-под состава (O_8);
- надвига состава на горку (O_9);
- роспуска состава (O_{10});
- заезда маневрового локомотива в парк приёма (O_{11}).

Завершение каждой из указанных операций фиксирует ключевое состояние f_i участвующих в модели объектов в соответствующий момент времени $t_{FIX(i)}$ (рисунок 2).

Существенной особенностью имбрейсинга является допустимость возможных отклонений модельных позиций как по времени завершения $\Delta t_{FIX(i)}$ ключевых операций, так и по достигаемому состоянию Δf_i модельных объектов. Соединение точек нижнего и верхнего пределов отклонений состояний модельных позиций определяет зону корректного прототипирования ξ^{MOD} процессов реальной технической системы. При этом по завершении некоторой ключевой операции O_i в момент времени $t_{FIX(i)}$ разброс параметризуемого состояния колеблется от Δf_i^- до Δf_i^+ . В общем случае $\Delta f_i^- \neq \Delta f_i^+$. Этот эффект визуально подчёркивается неоднородностью «толщины» зоны ξ^{MOD} по всему спектру моделируемых процессов (см. рисунок 2). Данная неотжественность отклонений модельных состояний объектов от прототипных называется *модельным шифтингом первого рода*.

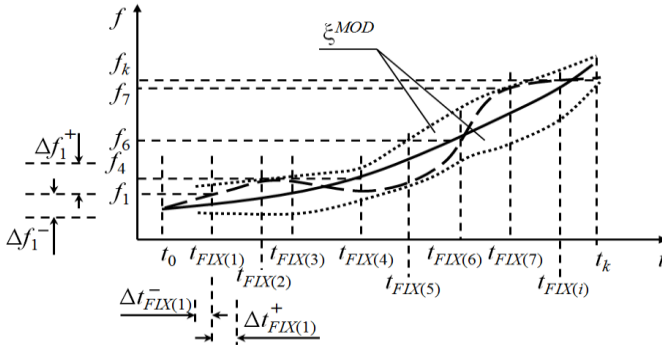


Рисунок 2 – Embrace-конфигурация параметрических MR-позиций состояний объектов

Как указывалось ранее, аналогичная коллизия наблюдается и для моментов завершения ключевых операций. Разброс $\Delta t_{FIX(i)}$ может быть от $\Delta t_{FIX(i)}^-$ до $\Delta t_{FIX(i)}^+$. Также в общем случае $\Delta t_{FIX(i)}^- \neq \Delta t_{FIX(i)}^+$. Этот диссонанс отклонений называется *модельным шифтингом второго рода*. Причины возникновения модельного шифтинга в данной статье не исследуются.

При моделировании процессов динамической системы необходимо обеспечить контролируемость шифтинга посредством установления предельных значений $\lim(\Delta t_{FIX(i)}^-)$, $\lim(\Delta t_{FIX(i)}^+)$, $\lim(\Delta f_i^-)$, $\lim(\Delta f_i^+)$. В процессе моделирования ожидается взаимное влияние шифтинга 1-го и 2-го родов, которые могут быть связаны причинно-следственной связью между собой (таблица 1).

Таблица 1 – Отклонение параметров функционирования модельных объектов относительно базовых позиций прототипов

Номер позиции	Влияющий признак	Результат влияния	Верификация модели
1	$\Delta t_{FIX(i)}^- < \lim(\Delta t_{FIX(i)}^-)$	$f_i^{MOD} \in \xi^{MOD}$	Обеспечивается
2	$\Delta t_{FIX(i)}^- \geq \lim(\Delta t_{FIX(i)}^-)$		Модель неработоспособна
3	$\Delta t_{FIX(i)}^+ < \lim(\Delta t_{FIX(i)}^+)$	$f_i^{MOD} \in \xi^{MOD}$	Обеспечивается
4	$\Delta t_{FIX(i)}^+ \geq \lim(\Delta t_{FIX(i)}^+)$		Модель неработоспособна
5	$\Delta f_i^- < \lim(\Delta f_i^-)$	$f_i^{MOD} \in \xi^{MOD}$	Обеспечивается
6	$\Delta f_i^- \geq \lim(\Delta f_i^-)$		Модель неработоспособна
7	$\Delta f_i^+ < \lim(\Delta f_i^+)$	$f_i^{MOD} \in \xi^{MOD}$	Обеспечивается
8	$\Delta f_i^+ \geq \lim(\Delta f_i^+)$		Модель неработоспособна
9	$\Delta t_{FIX(i)}^- \Rightarrow \Delta f_i^- < \lim(\Delta f_i^-)$	$f_i^{MOD} \in \xi^{MOD}$	Обеспечивается
10	$\Delta t_{FIX(i)}^- \Rightarrow \Delta f_i^- \geq \lim(\Delta f_i^-)$		Модель неработоспособна
11	$\Delta t_{FIX(i)}^- \Rightarrow \Delta f_i^+$		Неопределенна
12	$\Delta t_{FIX(i)}^+ \Rightarrow \Delta f_i^+ < \lim(\Delta f_i^+)$	$f_i^{MOD} \in \xi^{MOD}$	Обеспечивается
13	$\Delta t_{FIX(i)}^+ \Rightarrow \Delta f_i^+ \geq \lim(\Delta f_i^+)$		Модель неработоспособна
14	$\Delta t_{FIX(i)}^+ \Rightarrow \Delta f_i^-$		Неопределенна

Ключевые состояния модельных и реальных объектов определяются на момент завершения соответствующих операций $t(O_i)$. При этом базовыми ориентирами всегда являются позиции объектов реальной системы $t^{REAL}(O_i)$. Тогда

$$\begin{aligned} \Delta t_{FIX(i)} &= t^{REAL}(O_i) - t^{MOD}(O_i), \\ \Delta t_{FIX(i)} &= \Delta t_{FIX(i)}^-, \text{ если } t^{REAL}(O_i) > t^{MOD}(O_i), \\ \Delta t_{FIX(i)} &= \Delta t_{FIX(i)}^+, \text{ если } t^{REAL}(O_i) < t^{MOD}(O_i). \end{aligned}$$

При этом должны соблюдаться условия контролируемого шифтинга:

$$\Delta t_{FIX(i)}^- < \lim(\Delta t_{FIX(i)}^-), \Delta t_{FIX(i)}^+ < \lim(\Delta t_{FIX(i)}^+).$$

Многократное повторение одного и того же модельного эксперимента с введением переменного коэффициента, компенсирующего неучтенные влияния прочих факторов, позволит получить решения в границах зоны ξ^{MOD} (см. рисунок 2).

К сожалению, такой модельный эксперимент может быть проведен для условий имеющегося статистического материала по реальной станции, который ограничен некоторым отрезком времени $[t_0, t_k]$. При этом модель способна работать за пределами достигнутого времени t_k , далее которого нет сравнительной базы реального опыта.

Более того, условия выполнения технологических операций могут измениться (например, в структуре поступающего на станцию вагонопотока увеличится доля инновационных вагонов увеличенной грузоподъемности, приводящих к возрастанию нагрузки на верхнее и нижнее строения пути с изменением влияния сил сопротивления на объекты движения). С достаточной уверенностью можно сказать, что модель будет функционировать в новых условиях, и на экране дисплея будут формироваться соответствующие визуальные образы перемещающихся по станционным путям вагонов и локомотивов, но оценка корректности результатов расчётов соответствующих влияний на железнодорожный путь и вагоны не может быть выполнена из-за отсутствия оценочных данных для реальных процессов, проведенных в рамках модели.

С другой стороны, выполнение такого натурального эксперимента позволило бы скорректировать результаты работы только конкретной реализации данной модели. Даже незначительное изменение исходных условий потребует новой подготовки реального эксперимента для верификации результатов модели. И чем больше изменений условий происходит в модели, тем сложнее подготавливать и проводить соответствующий адекватный натуральный тест.

Можно попытаться сформировать обратную схему связи «модель – реальность»: сначала подготовить и провести детально запротоколированную процедуру операций приема и расформирования поезда на станции с существующими условиями, потом скрупулезно повторить эти операции в мо-

дели, проводя их в полном соответствии с обозначенными условиями, и по достигнутым результатам провести сравнение состояний натуральных и модельных объектов с последующей необходимой корректировкой модели с целью достижения требуемого уровня совпадения сопоставляемых значений показателей.

Корректировка результирующих значений параметров, характеризующих состояние объектов модели, должна производиться с помощью некоторой операции, выравнивающей величины модельных показателей p_i^{MOD} до уровня необходимых нормированных p_i^{REAL} , установленных натурным экспериментом. При этом следует решить задачу достижения имбрейсинга в зоне допустимого отклонения модельных параметров в ξ^{MOD} с реализацией основных вариантов 1, 3, 5, 7, 9, 12 таблицы 1. Если посредством модельных итераций достигается embrace-конфигурация, то работа данной реализации модели продолжается за пределами временной шкалы $[t_0, t_k]$ до следующего отсчёта таймера $t_s > t_k$, где $(t_s - t_k) \approx (t_k - t_0)$.

Полученный экстраполяционный период времени $[t_k, t_s]$ работы модели анализируется по достигнутым показателям и подготавливается соответствующий натуральный эксперимент, повторяющий все условия проведенной модельной реконструкции. При подтверждении сходимости результатов модель считается верифицированной. Возможно, достаточно будет определить значение *коэффициента имбрейсинга* k_{emb} и применять его на последующих экстраполяционных периодах $[t_k, t_s]$, $[t_s, t_p]$, Однако существует большая вероятность объективного действия некоторой оценочной *функции имбрейсинга* с установленной аналитической или эмпирической зависимостями от целого ряда параметров.

Приведённую процедуру можно реализовать на конкретном примере. Пусть стоит задача моделирования работы парка приёма сортировочной станции. Выделяем последовательность технологических операций по приёму и расформированию поездов с фиксированными позициями ключевых состояний объектов из указанного выше перечня O_1-O_{11} . Для множества станционных объектов паркового пути данной станции, разложения прибывающих поездов с учетом всех вагонов, их типов, моделей, конструктивных особенностей, наименований грузов и их массы в вагонах формируется детализированная цифровая съёмка операций O_1-O_{11} с регистрацией состояний участвующих в натурном эксперименте объектов на протяжении всего периода времени выполнения данных операций.

Параметризация объектов и элементов технологического процесса обслуживания вагонопотоков на станции позволит получить полные и детальные количественные данные о прототипируемом образе, формируя цифровую копию физической реальности (ЦКФР). Контрольными параметрами ЦКФР являются значения $t_{FIX(i)}^{REAL}$, по которым рассчитывается период моделирования,

$$t_k - t_0 = \sum_{i=0}^k (t_{FIX(i+1)}^{REAL} - t_{FIX(i)}^{REAL}),$$

где k – количество ключевых состояний объектов (для рассматриваемого примера $k = 10$ при начальном индексе $i = 0$).

Для каждого $t_{FIX(i)}^{REAL}$ определяются достигаемые состояния объектов видеосканнинга, являющиеся ориентирами для последующей модели функционирования железнодорожной станции.

Так как позиционируется разработка физически адекватной информационной модели железнодорожной станции, то значимым признаком объектов принимается атрибут пространственного координированного положения, и существенным является изменение координат объектов за время операции $(t_{FIX(i+1)}^{REAL} - t_{FIX(i)}^{REAL})$. Таким образом, вагоны и локомотивы фиксируются конкретными координатными позициями на путях станции в результате производимой работы сил тяги локомотива и сопротивления движению. Железнодорожный путь, претерпевая эксплуатационные нагрузки от подвижного состава, также может изменить своё положение по причине смещений пути в кривых, расстройстве плана кривых из-за ударов стыках, температурных деформаций и др. Задокументированные состояния всех объектов станции являются контрольными ориентирами для модельных аналогов. Если координаты информационных объектов повторяют значения своих прототипов в диапазоне допустимых погрешностей, то физическую модель системы можно признать адекватной реальности.

Однако, как уже отмечалось в данной статье, оценочные значения параметров модельных объектов и их прототипов будут различаться, и в некоторых случаях на значительную величину. Если уравнивающими коэффициентами выводить сопоставляющие фазовые кривые под нулевую невязку значений, то каждая модельная итерация потребует проведения подобной процедуры с постоянно различающимися коэффициентами. Поэтому необходимо определять допустимую зону шифтинга ξ^{MOD} (см. рисунок 2) с параметрами $\lim(\Delta t_{FIX(i)}^{-(+)})$ и $\lim(\Delta f_i^{(+)})$. Так, для указанного примера с 11 операциями потребуется определить 22 значения предельных отклонений модельных вагонов от экспериментальных позиций положения прототипов. Например, величины $\lim(\Delta t_{FIX(i)}^{+}) = 3$ сек и $\lim(\Delta f^{+}) = 2$ м устанавливают, что соответственно время приёма модельного поезда на станцию (операция O_2) может опережать сопоставимое время по эксперименту не более чем на 3 секунды, а положение модельного поезда на пути парка приёма отличается не более чем на 2 м далее по сравнению с эталонным. Важно то, что априори нельзя для модели задавать соответствующие времена и места установки вагонов. Эти параметры должны вычисляться исходя из физики процесса движения вагонов поезда, обладающих заданными характеристиками, и оценки влияния на них различных условий и факторов.

Времена завершения базовых операций являются оценочными позициями сопоставления модельных и реальных состояний объектов. Именно в этих точках модельный процесс накладывается на шаблон прототипа, создавая *среду когерентного сравнения* значений параметров. Основными сопоставляющими величинами являются длительности $t_{FIX(i)}$ операций O_i и положения f_{ij} j -го вагона поезда на станционном пути. Последний параметр определяется расстоянием от некоторой привязочной точки (*fasten punkt*) до достигаемой на момент завершения операции O_i . *Fasten punkt (f-punkt)* устанавливается для каждого станционного пути (например, совпадает с положением предельного столбика, фиксирующего начало полезной длины данного пути).

Постоянное отслеживание модельных процессов и регулярное сравнение с эталоном требуют значительных информационных ресурсов и существенно усложняют общий алгоритм реализации динамической модели. Поэтому переход к дискретной схеме анализа с проверкой сходимости результатов работы имитирующей среды по фиксированным точкам позволит получить эффективный информационный продукт реконструкции физических процессов обслуживания вагонопотоков на железнодорожной станции. Общая сонаправленность, когерентность состояний объектов выражается в узких диапазонах допустимого разброса количественных измерений состояний модельного вагона по сравнению с эталонным за конкретное время.

Таким образом, основным условием верификации модели является когерентность репродуцированных и репродуцируемых процессов, обеспечивающая *эквивициальность исходов* модели и реальности. Подбор соответствующей обучающей выборки реального эксперимента на базе некоторой железнодорожной станции позволяет настроить модельную реализацию, обеспечивая адекватное воспроизведение состояний объектов инфраструктуры и подвижного состава.

Сложность физических процессов и многогранность факторного влияния окружающей среды не позволяют формировать устойчивые когерентные схемы функционирования модели, которая может быть верифицирована только по основным MR-позициям типового технологического процесса работы железнодорожной станции. При других условиях модель не получает практического подтверждения, и её достоверность оценивается по ряду косвенных признаков экспертного и другого характера.

Таким образом, динамические модели, которые не имеют отражения в реальном образе, формируют *паллиативную репликацию* действительности. Если в когерентных моделях обязательно присутствуют две сопоставляемые структуры: *репликант* (исходная реальная система) и *репликат* (порождённая модельная система), то некогерентные модели монополярны и не имеют связи со своим физическим прототипом. В этом случае нельзя даже

утверждать, что аналог модельного монополярного образа существует, так как неизвестно, насколько корректно воспроизводится физическая реальность в некогерентной модели. Наличие репликата в отрыве от связующего с реальностью репликанта непосредственно указывает на несимметричную конструкцию трудно верифицируемой модели. Таким образом, следует отметить, что большинство формируемых моделей будет представлять собой неполную, *паллиативную репликацию* действительности, у которой достоверность физического продуцирования должна подтверждаться опосредованными способами. Когерентное моделирование формирует множество репликаций, удовлетворяющих условию допустимого отклонения различных модельных состояний объектов от установленного шаблона. Таким образом, прототипному репликанту тождественны несколько модельных генераций железнодорожных станций, незначительно отличающихся друг от друга положением вагонов на станционных путях и временем выполнения технологических операций.

Наиболее сложной задачей является определение меры отклонения состояния реплицирующих объектов от шаблона-репликанта. Тождественность модельных генераций указывает на неразличимость отдельных вариаций состояний объектов в пределах установленных значений $\lim(\Delta t_{FIX(i)}^{-(+)})$ и $\lim(\Delta f_i^{-(+)})$. Если необходимо в трехмерной динамической модели железнодорожной станции прототипировать N технологических операций, то с учётом шифтинга потребуется определить $4N \cdot [\lim(\Delta t_{FIX(i)}), \lim(\Delta f_i)]$ значений граничных позиций области ξ^{MOD} , называемых *лимитной матрицей репликата* (M_{REPL}). Лимитная матрица обладает свойством устойчивости, которое позволяет использовать полученные значения M_{REPL} для других реализаций модели при изменении внешних условий в пределах $\pm \Delta \Psi$. Некоторые предварительные исследования указывают на то, что диапазон изменений $\Delta \Psi$ намного шире, чем $\lim(\Delta t_{FIX(i)})$ и $\lim(\Delta f_i)$. Это значит, что большие параметрические вариации внешних условий взаимно компенсируются в процессе функционирования сложной технической системы и в конечном итоге приводят к незначительным колебаниям результирующих состояний объектов.

A. K. GOLOVNICH

COHERENCE OF PROCESSES DYNAMIC MODEL RAILWAY STATION AND PROTOTYPE

The clause investigates the opportunities of authentic modeling dynamic processes at railway station with an estimation of a condition prototyping of objects on some pattern real experiment. A condition of verification model is the convergence of importance a coordinate situation of model and real railway carriage on a station way to the given time. The basic requirements to realization coherence models with isomorphic to a real image.

Получено 10.04.2022