

УДК 004.42:001.891.573:658.512

АДАПТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ РЕКОНСТРУКЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ТРЕХМЕРНЫХ МОДЕЛЯХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А.К. Головнич

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель

ADAPTIVE ALGORITHMS OF RECONSTRUCTION TECHNOLOGICAL PROCESSES ON 3D-MODELS OF TECHNICAL SYSTEMS

A.K. Golovnich

Belarusian State University of Transport, Gomel

Рассматривается принципиальный подход к моделированию технологических процессов систем как последовательности вычисляемых связанных физических состояний объектов, изменяемых при воздействии внешних сил. Эти воздействия определяются через некоторые промежутки времени, зависящие от конкретных условий выполнения технологических операций. Механизм backtracking'a позволяет проверить корректность модельного развития реконструируемого процесса по критериальным признакам за период времени, охватывающий несколько рассчитываемых состояний. При несоблюдении установленных критериев вырабатывается дополнительное воздействие, имитирующее управляющий стимул с целью возврата модельной системы в зону нормального исполнения операции. Прошедшие проверку расчетные состояния визуализируются в соответствующей 3D-модели.

Ключевые слова: моделирование, динамика, адаптивные алгоритмы, технические системы, физические процессы.

A new approach to modeling of technological processes of systems in the form of a sequence of connected physical states of objects is considered. These objects are changed under the influence of external forces, which are determined after some time intervals. This period of time includes several calculated states. If the established criteria aren't met, an additional impact is produced. It simulates control stimulus in order to return the model system to the zone of normal execution of the operation. The calculated states that have passed the test are visualized in the corresponding 3D model.

Keywords: modeling, dynamics, adaptive algorithms, technical systems, physical processes.

Введение

Сложность модельной реконструкции технологии работы реальной технической системы заключается в необходимости учета большого числа факторов, непосредственно и косвенно влияющих на выполнение конкретных операций, которые реализуются с колебаниями значений зависимых параметров. Например, циклично повторяющиеся на железнодорожной станции операции расформирования составов на горке происходят в различных интервалах изменений скоростей надвига и роспуска, отличаются координатами мест останова отцепов в сортировочном парке, вариациями начала и длительности срабатывания тормозных замедлителей и др. Существенное влияние на такое рассеяние характеристик оказывают условия выполнения операций (температура наружного воздуха, влажность, состояние пути и подвижного состава, масса каждого отцепа и ее распределение по отдельным вагонам, человеческий фактор). Анализ работы объектов технических систем показывает, что любая технологическая операция выполняется в устойчивом режиме при постоянных колебаниях параметров в некоторых пределах [1].

1 Основные модели реконструкции технологии работы технических систем

Наиболее простая модельная схема описания технологии работает только с детерминированными значениями исходных параметров, которые оказываются неизменными в каждом последующем цикле технологической операции (модель нулевого уровня). Так как вариации действующих сторонних сил и факторов носят колебательный характер, то их влияние приводит к отклонению состояний объектов в ту или иную сторону относительно некоторых средних значений. Поэтому можно предположить, что за достаточно большой период времени их накапливаемые влияния взаимно компенсируются, и модельная интерпретация корректно репродуцирует реальный технологический процесс. Однако переменность внешних воздействий не случайна. Действующие на объект силы в момент времени t зависят не только от предыдущего состояния, но и от положения объекта на временной оси развертывания данного технологического процесса. Таким образом, в модель нулевого уровня можно вводить учитывающие эти особенности корректирующие параметры, вычисляемые по фазовому портрету достигнутого состояния объекта. Тем не менее, такие поправки носят условный характер, формируют модельные правила абстрактного характера и могут быть не связаны

с физическими процессами реальных технологических операций, выполняемых с объектами технической системы.

Уровень реалистичного воспроизведения технологической операции должен иметь особую логику связей зависимых параметров взаимодействующих объектов, определенным образом интерпретируя объективные закономерности развития реальных процессов. В таких модельных правилах используются алгоритмы, реконструирующие действие физических законов. Для моделирования технических систем особо важным оказывается корректное прототипирование сил гравитации и электромагнетизма. На железнодорожной станции эти силы используются в соответствующих технических устройствах (локомотивах, перегрузочных машинах, лебедках, сортировочных горках и пр.), обеспечивающих передвижение вагонов, а также определяющие деструктивные действия в виде сопротивления движению, деформации частей железнодорожного пути и подвижного состава и др. Так как усилия от устройств, сообщающих движение и влияющих на состояние объектов дополняются действием сопутствующих факторов и условий, то воспроизведение аналогичного адекватного модельного образа поведения системы объектов оказывается весьма трудной задачей в силу высокой размерности множества параметров и колебаний их значений.

Поэтому рассматривается возможность аналитико-эмпирического моделирования процессов технической системы с разделением на два этапа расчета состояний объектов: определение характеристик состояния объектов по их взаимодействию согласно существующим канонам механики и дополнительный расчет с использованием динамической компоненты, учитывающей конкретные условия протекания операции. Данная поправка в грубом приближении является некоторым коэффициентом, корректирующим значение расчетного параметра, характеризующего состояние объекта, что приближает подобную реконструкцию к модели нулевого уровня. В общем случае предлагаемый вариационный механизм позволяет формировать группы адаптивных модельных правил, развивая которые можно создать динамический образ прототипируемой технической системы, функционирующей в достаточном соответствии с реальностью в течение некоторого времени выполнения операций. Многообразие и взаимодействие объектов друг с другом и окружающей среды в таком случае может передаваться в модели соответствующими рекуррентными соотношениями изменяющихся состояний, дополненными эмпирическими компонентами в виде ряда аппроксимированных выражений, связанных между собою некоторыми зависимостями, обусловливаемыми характером реальных процессов.

2 Прототипирование технологических операций в модели с контурами обратной связи

Рассмотрим возможность воспроизведения реалистичного развития технологического процесса в модели с колебаниями зависимых параметров операций. Пусть некоторая технологическая операция T_i определяется состоянием i -го объекта с j -м свойством в момент времени t как $F_{ij}^*(t)$. Состояние i -го объекта определяется некоторым характерным для данной операции набором Ω_i значений j -х параметров (массы m_i , скорости V_i , координат положения $D_i(X, Y, Z)$, внутреннего напряжения λ_i , деформации b_i и др.). Данное состояние может изменяться по причине влияния различных внешних воздействий $\delta_{ij}(t)$, способных варьироваться в некоторых пределах значений. Например, модельная схема расформирования состава на сортировочной горке в момент времени $t = 60$ сек после начала операции может иметь значение координатного параметра

$$D_i(X, Y, Z) = F_{i(j=\text{коорд})}^* \left(t = 60, \sum_{k=1}^n \delta_{ij}(t_k) \right),$$

где $\sum \delta_{ij}(t_k)$ – накопленное влияние различных факторов, которое приводит к новому координатному положению $F_{i(j=\text{коорд})}^*$ через одну минуту (n циклов) после начала операции расформирования.

Модельная операция активируется через некоторый дискретный квантованный процесс последовательного расчёта значений характерных параметров с последующей визуализацией достигаемого координатного положения объекта (для примера сортировочной станции – положение вагонов на путях виртуальных парков и горловин станции через $t = 5, 10, \dots, 60$ сек). Квант определяется как некоторый промежуток времени t_q , через который происходит следующий расчетный этап определения состояния i -го объекта системы моделирования. Так как результаты модельного расчета визуализируются в изменяющихся позициях объектов, то длительность расчетного кванта должна быть достаточно короткой ($t_q = 1-5$ сек), чтобы впоследствии наглядно реконструируемый процесс был плавным, похожим на видеосъемку реального технологического процесса. Принимаем, что в течение кванта t_q изменений с модельным объектом не происходит или они таковы, что оказываются меньше вариаций $\delta_{ij}(t)$.

По каждому кванту расчётов состояния объекта $F_{ij}^*(t)$ переменная поправка $\delta_{ij}(t)$ рассматривается как интегральное совокупное влияние различных факторов, а также результат их взаимодействия. Длительность кванта может различаться от одного расчетного шага к другому, так как зависит от скорости протекания конкретного технологического процесса и ряда других причин (рисунок 2.1).

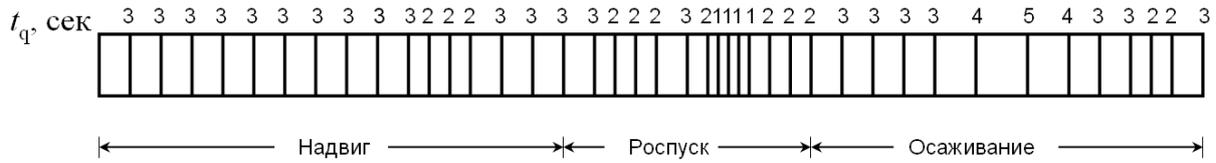


Рисунок 2.1 – Общая схема моделирования квантованного процесса расформирования составов на горке

Согласно приведенной схеме квантование операции надвига производится в основном через 3 секунды. Роспуск вагонов с горки обеспечивается с повышенной скоростью благодаря наличию значительных уклонов на спускной части, поэтому длина кванта t_q на данном расчетном элементе уменьшается до 2–1 сек. Осаживание представляет собой относительно медленный процесс, и длина кванта может увеличиваться до 4–5 сек.

Различные поправки $\delta_{ij}(t)$ способны привести к изменению траектории некоторого фазового состояния объектов. При этом возможно наступление ситуации, при которой отклонения конкретного достигаемого состояния $F^*_{ij}(t)$ от некоторого среднего будут настолько значительны, что может потребоваться введение поправки $\delta_{критij}(t)$, которая окажется больше разрешенной $\delta_{ij}(t)$. Поэтому следует на каждом шаге развития модельной ситуации оценивать степень приближения к критической (деконструктивной) зоне, вступление в которую приведет к нарушению технологического равновесия технической системы в целом.

3 Применение программного backtracking'a в модели реконструкции технологических процессов

Динамику развития некоторого технологического процесса можно рассматривать как расчёт величин воздействий $\delta_{ij}(t)$ на модельные объекты и их отклика на эти воздействия в виде соответствующих перемещений (изменений координат положения вагонов на железнодорожном пути, деформации рельсов и шпал, просадок земляного полотна) через промежуток времени, равный расчётному кванту. Соответствующий моделирующий алгоритм может использовать программный backtracking, заключающийся в том, что на некотором k -м шаге производится предварительный расчёт на $(n + 1)$ -шагов (квантов) ($n > k$) с оценкой последовательных состояний системы модельных объектов [2]. Если все n шагов расчётных состояний указывают на достижения разрешённых модельных состояний $F_{ij}(t)$, то предварительный расчёт завершается принятием результатов расчетов на k -м шаге и визуализацией достигаемого состояния объекта. Рассмотрим две принципиальные позиции исхода данного расчета.

1. На m -м шаге backtracking'a ($m < n + 1$) по расчетному влиянию $\delta_{ij}(t)$ модельное состояние некоторого объекта оказывается критичным, не допускающим дальнейшего изменения $F_{ij}(t)$. Поэтому на некотором предыдущем s -м шаге ($s < m$) необходимо ввести такое дополнительное корректирующее воздействие $\pm\Delta_{ij}(t)$, что при общем влиянии $\delta_{ij}(t) \pm \Delta_{ij}(t)$ система выйдет из опасной зоны, и новый предварительный расчёт с началом в s -м шаге на $(n + 1)$ шагов backtracking'a приведет к положительному результату с нормальным достигаемым состоянием. Как следствие, станет возможной фиксация текущего состояния объекта с соответствующей визуализацией его достигнутого положения в 3D-модели.

2. На $(n + 1)$ -м шаге оценочный расчёт указывает на приближение значений некоторых j -х расчетных параметров к зоне критичных состояний. В этом случае результаты расчета принимаются, текущее состояние объекта 3D-модели визуализируется, но следующий этап расчётов начинается с введения дополнительной («усиленной») коррекции внешних воздействий $\pm\Delta_{ij}(t)$. В общем случае возможны следующие схемы модельных состояний объектов (рисунок 3.1).

На рисунке 3.1 приведена динамика развития реконструкции некоторого модельного процесса по j -му характерному параметру набора Ω_i состояний $F_{ij}(t)$ i -го объекта. Согласно иллюстрациям, зона разрешённых состояний $F_{ij}(t)$ представляет собой достаточно широкий диапазон изменений характеристических параметров набора Ω_i .

По мере развертывания модельной технологической операции ширина зоны изменяется, а на некотором шаге реконструкции достигаемое состояние объекта $F^*_{ij}(t)$ может оказаться критическим. Например, при расформировании поездов зона координат остановки отцепов в сортировочном парке варьируется в более широких пределах, чем зона координат, фиксирующих положение вагонов при скатывании с горки по скоростным уклонам. В этом случае текущее состояние вагона $F^*_{ij}(t)$ может выйти в область критических скоростей.

Кроме зоны разрешённых состояний $F_{ij}(t)$ устанавливаются зоны критических состояний $f^{\text{up}}_{критij}(t)$ и $f^{\text{down}}_{критij}(t)$, ограничивающих зону допускаемых $F_{ij}(t)$ снизу и сверху. Эти зоны также варьируются по ширине диапазона на каждом

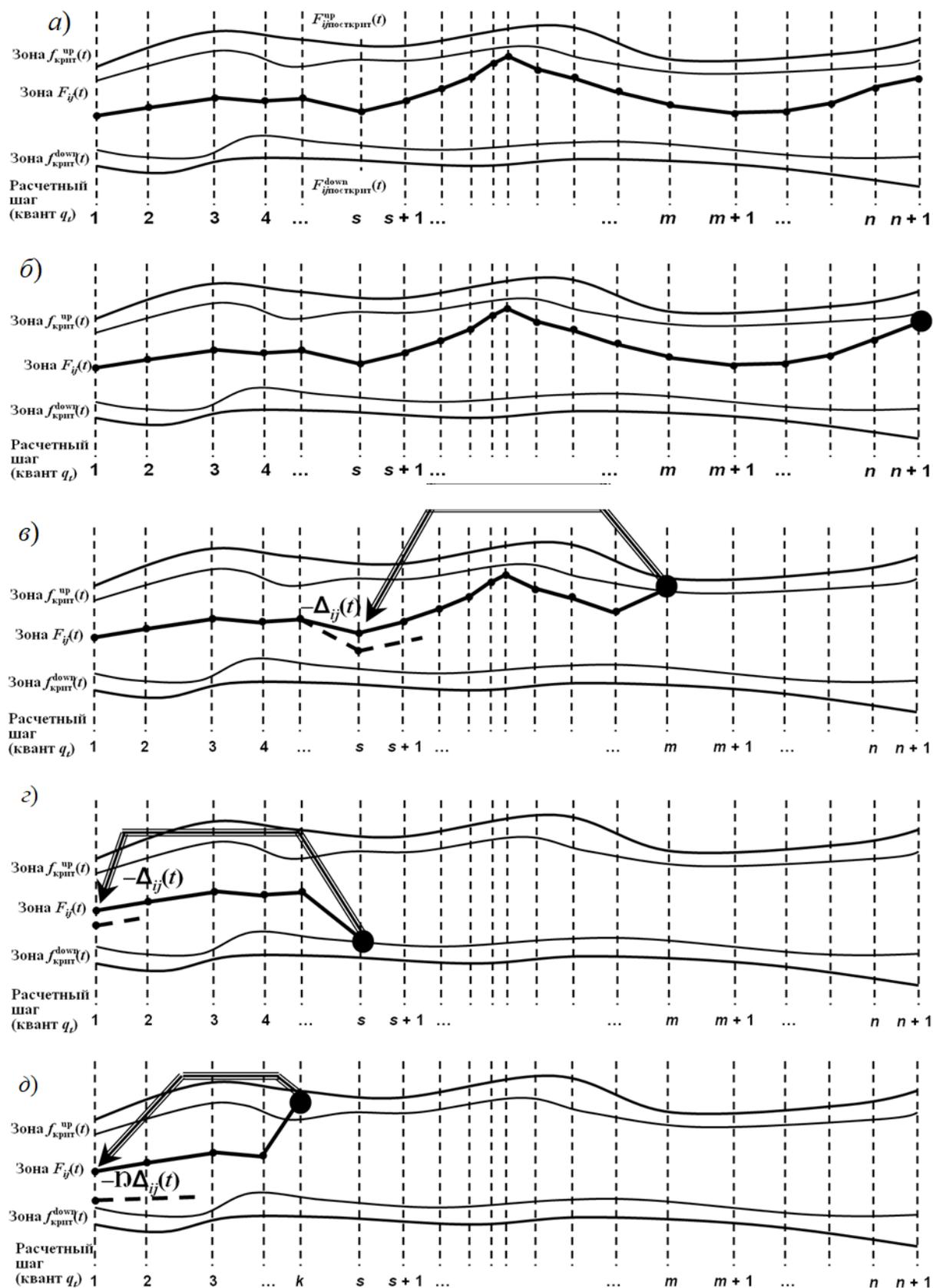


Рисунок 3.1 – Схемы развития модельной ситуации при выполнении технологической операции: а) – нормальная, б) – $(n + 1)$ -критичная, в) – m -критичная, г) – s -критичная, д) – исключительная

расчетном q_i и указывают на значение некоторого опасного, но в сложных условиях выполнения технологической операции разрешенного значения параметра состояния $F_{ij}(t)$.

Вхождение в данную зону сигнализирует о необходимости принятия соответствующих мер, способствующих возврату технологического процесса в зону штатного исполнения операции. Чем глубже проникновения текущего состояния объекта в зоны $f_{критij}$, тем эффективнее и действеннее должны быть управляющие стимулы $\Delta_{ij}(t)$, обращающие вектор развития операции в сторону разрешенных $F_{ij}^*(t)$.

При приближении $F_{ij}^*(t)$ к зоне критических значений в модельной системе (по аналогии с реальной) нарастает некоторое внутреннее сопротивление дальнейшему продвижению $F_{ij}^*(t)$ в сторону $f_{крит}^{up}$ или $f_{крит}^{down}$. Это сопротивление формирует силовой стимул с обратным вектором действия, определяя в конечном итоге величину $\Delta_{ij}(t)$. Зоны критических состояний $f_{крит}^{up,down}$, не являясь запрещенными для $F_{ij}^*(t)$, обладают свойством порождения и усиления действия силового стимула с обратным влиянием на дальнейшее развитие технологического процесса. Области $F_{ij}(t)$ и $f_{крит}^{up,down}$ рассчитываются на момент каждого кванта q_i в

соответствии со складывающейся общей ситуацией совокупного действия факторов и достигнутого состояния объекта. Для типового процесса можно разрабатывать некоторую среднюю комбинативную структуру фазовых линий $F_{ij}(t)$, ограничивающих зоны $f_{крит}^{up,down}$ и определяющих область развития прототипируемого технологического процесса (рисунок 3.1). По всей вероятности, каждый конкретный технологический процесс будет иметь свою, только ему присущую фазовую траекторию изменения состояний. Однако наиболее эффективную линию $F_{ij}^*(t)$ необходимо конструировать по текущей ситуации модельного образа. Величины зон значений параметров $F_{ij}(t)$ и $f_{критij}$ в каждом конкретном случае характеризуют возможные ситуации и интегральное воздействие других сторонних факторов. Такое совокупное влияние всех сил и воздействий приводит к особым траекториям $F_{ij}(t)$, отклоняющимся в ту или иную сторону по мере развертывания данной операции.

Области $f_{крит}^{up,down}$ не идентичны друг другу, так как определяются различными условиями выполнения операции с низким и высоким значениями зависимых характеристик. Следует отметить, что по любому расчётному кванту q_i все $f_{крит}^{up,down}$ всегда имеют ряд ненулевых разрешённых

Таблица 3.1 – Условия развития модельных ситуаций воспроизведения технологических операций

Схема развития модельной ситуации	Характеристика ключевых позиций	Способ разрешения ситуации
Нормальная (рисунок 3.1, а)	Все достигаемые значения $F_{ij}^*(t)$ находятся в рабочей зоне состояний объектов, которые изменяются по квантам t_q	–
$(n + 1)$ -критичная (рисунок 3.1, б)	На конечном расчётном $(n+1)$ -м шаге $F_{ij}^*(t_{n+1}) = F_{критij}^*(t_{n+1})$, находящиеся в зоне $f_{критij}^{up}(t)$ или $f_{критij}^{down}(t)$	Состояние по текущему расчётному кванту визуализируется, но следующий этап расчётов начинается с введения дополнительного управляющего воздействия $\Delta_{ij}(t)$
m -критичная (рисунок 3.1, в)	На шаге m $F_{ij}^*(t_m) = F_{критij}^*(t_m)$, находящиеся в зоне $f_{критij}^{up}(t)$ или $f_{критij}^{down}(t)$	Дальнейший предварительный расчёт останавливается, расчётная цепочка возвращается на s -й шаг ($m > s$) и производится корректировка воздействий $F_{ij}^*(t_s) = F_{ij}^*(t_s) - \Delta_{ij}(t_s)$ или $F_{ij}^*(t_s) = F_{ij}^*(t_s) + \Delta_{ij}(t_s)$
s -критичная (рисунок 3.1, г)	На шаге s $F_{ij}^*(t_s) = F_{критij}^*(t_s)$, находящиеся в зоне $f_{критij}^{up}(t)$ или $f_{критij}^{down}(t)$	Предварительный расчёт прекращается на s -м шаге, расчётная цепочка состояний полностью обрывается и на повторном цикле backtracking'a а $q_i=1$ вводятся поправочные воздействия $F_{ij}(0) \pm \Delta_{ij}(0)$
Исключительная (рисунок 3.1, д)	На некотором k -м шаге backtracking'a достигается выход $F_{ij}(t_k)$ за пределы зоны нормального функционирования системы	На k -м шаге расчёт прекращается, анализируется достигнутое состояние $F_{ij}^*(t_{k-1})$. Если $F_{ij}^*(t_{k-1})$ достаточно близко подходит к зоне предельных состояний, то рассматривается возможность сведения ситуации к $(n + 1)$ -, m - или s -критичным, в противном случае вся цепочка обрывается и расчёт производится с с начальным положением объекта и введением «усиленного» стимула $\Omega \Delta_{ij}(t)$. Здесь Ω – индексирующий показатель, зависящий от глубины проникновения процесса в зону предельных состояний

позиций до выхода к запредельным $f_{\text{посткрит}ij}^{\text{up}}(t)$ и $f_{\text{посткрит}ij}^{\text{down}}(t)$, недопустимым на практике. Характеристика рассматриваемых ситуаций рисунка 3.1 приведена в таблице 3.1.

Достижимые состояния рассчитываются для каждого объекта или его элемента (в модели железнодорожной станции – для вагона, конкретной точки воздействия колеса на рельс, шпалы), и по каждому сравнивается расчетное $F_{ij}^*(t)$ с разрешенным.

Если $F_{\text{крит}ij}^*(t)$ возникает на p -м шаге, где $p < k < s$, то Δ_{ij} могут быть особо значительными по величине и весь процесс backtracking'a может быть связан с использованием цепочки некоторых $\max(\Delta_{ij})$, нейтрализующих сильное влияние $F_{\text{крит}ij}^*(t)$ на небольшом удалении от начального расчётного цикла состояния модельных объектов.

При нормальном развитии модельной ситуации $\Delta_{ij}(t)$ могут представлять собой случайные флуктуационные колебания модельного конструктора технологических операций.

Таким образом, зоны потенциальных состояний объектов разделяются на области нормальных \mathcal{A} , предкритичных \mathcal{B}_1 и \mathcal{B}_2 , критичных \mathcal{C}_1 и \mathcal{C}_2 и закритичных \mathcal{D}_1 и \mathcal{D}_2 (рисунок 3.2).

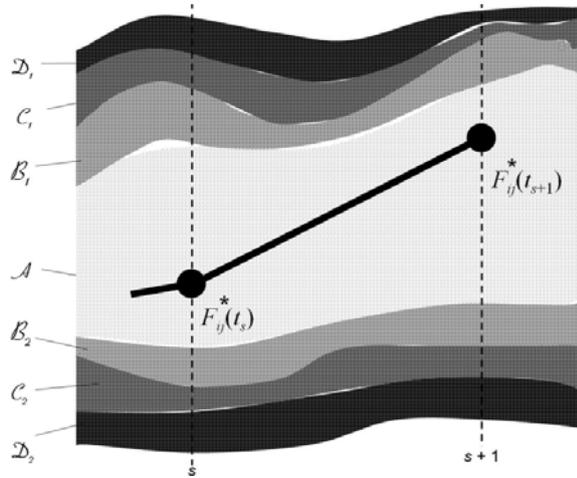


Рисунок 3.2 – Фазовая траектория состояний объекта моделирования в пространстве допустимых и запрещенных областей

Достижимые состояния объекта $F_{ij}^*(t)$ являются разрешенными по технологическим канонам, если

$$F_{ij}^*(t) \in \mathcal{A} \cup \mathcal{B}_1 \cup \mathcal{B}_2.$$

Переход к следующему расчетному ($s+1$)-у шагу осуществляется по результату воздействия δ_{ij} на предыдущее состояние данного объекта:

$$F_{ij}^*(t_{s+1}) = F_{ij}^*(t_s) + \delta_{ij}(t).$$

Согласно рисункам 3.1 и 3.2

$$f_{\text{крит}ij}^{\text{up}}(t) \in \mathcal{C}_1, f_{\text{крит}ij}^{\text{down}}(t) \in \mathcal{C}_2, \\ f_{\text{посткрит}ij}^{\text{up}}(t) \in \mathcal{D}_1, f_{\text{посткрит}ij}^{\text{down}}(t) \in \mathcal{D}_2.$$

Если на некотором m -м шаге (рисунок 3.1, в) $F_{ij}^*(t_m) \in \mathcal{C}_1 \vee F_{ij}^*(t_m) \in \mathcal{C}_2$, то происходит возврат на s -й шаг и формируется такое $\Delta_{ij}(t_s)$, что при повторном моделировании развития технологического процесса с s -го до m -го шага

$$F_{ij}^*(t_m) = F_{ij}^*(t_{m-1}) \pm \delta_{ij}(t_m) \pm \Delta_{ij}(t_m) \in \mathcal{A}$$

Вывод состояний объектов из областей \mathcal{B} и \mathcal{C} различается величинами корректирующих значений $\Delta_{ij}(t)$ и числом квантов отката от достигнутого модельного времени развертывания технологической операции. Нахождение состояния объекта в областях \mathcal{D}_1 или \mathcal{D}_2 являются фатальными для дальнейшей работоспособности данного объекта и рассматриваются как исключительные, обусловленные форс-мажорными обстоятельствами.

С этих позиций $\delta_{ij}(t)$ можно рассматривать как воздействие на объект в следствие взаимодействие с окружением, приводящее к изменению его j -го свойства, а $\Delta_{ij}(t)$ – квалифицировать как управляющее воздействие от технических средств или человека в следствие влияния адаптивных контуров системы, корректирующих дальнейшее развитие процесса. Если рассматривать $\delta_{ij}(t)$ как регулярные воздействия, являющиеся итогом совокупного влияния множественных сил, как правило, физического происхождения, то $\Delta_{ij}(t)$ следует определять как нерегулярные воздействия, возникающие только в случае нарастающих деконструктивных для системы внешних усилий.

Процедура backtracking'a разбивает процесс моделирования на предварительный расчет с оценкой достижимых состояний через множество временных квантов по горизонту удаления ($n + 1$) и верифицированную реконструкцию процесса с визуализацией пространственного положения модельных объектов по каждому кванту (рисунок 3.3).

Данный алгоритм используется многократно для расчета и визуализации различных j -х оценочных характеристик i -го объекта.

Заключение

Таким образом, модель реконструкции технологических операций ненулевого, продуцирующего уровня способна верифицировать и прототипировать структурные изменения в состояниях модельных объектов на основе некоторых правил, действие которых близко к результатам влияния реальных физических процессов. Эмпирическая компонента в модели рассчитывается по каждому квантованному состоянию как интегрирующее совокупное воздействие множественных пассивных факторов, не включенных в основной аналитический этап моделирования технологических процессов реальной технической системы.

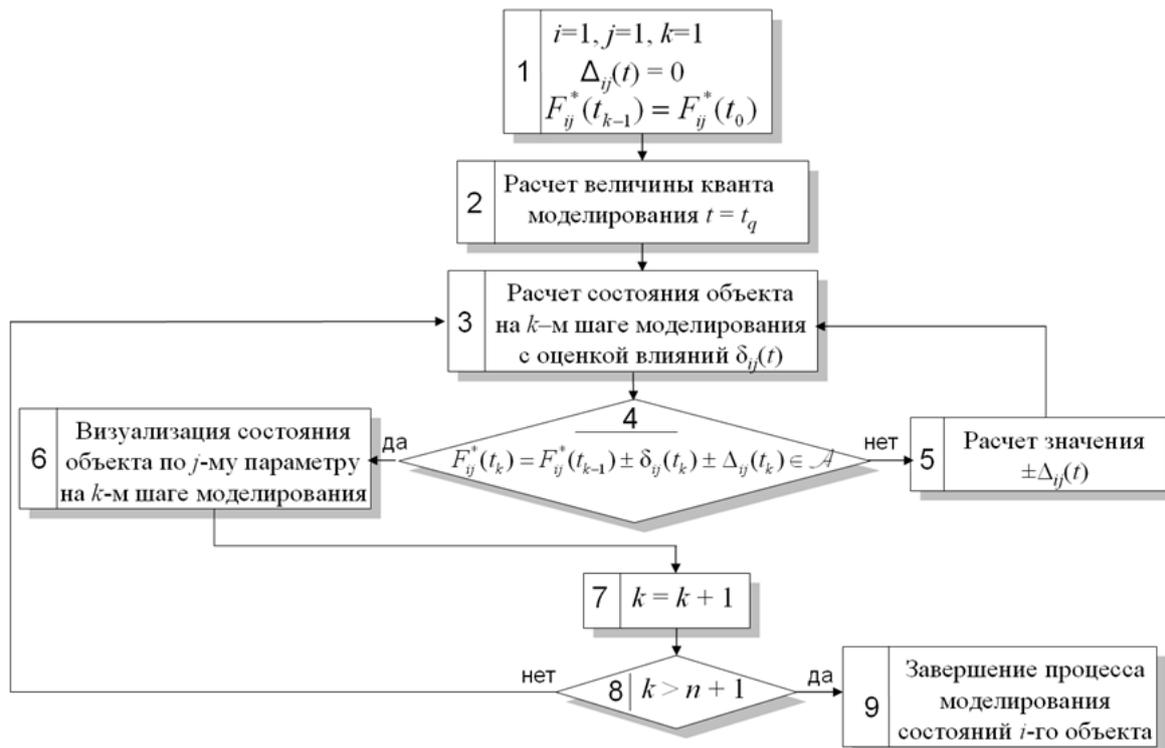


Рисунок 3.3 – Алгоритм расчёта и визуализации состояния i -го объекта моделирования с j -м контрольным параметром

ЛИТЕРАТУРА

1. Головнич, А.К. Моделирование состояний объектов технической системы с реконструкцией физических процессов / А.К. Головнич // Проблемы физики, математики и техники. – 2017. – № 1 (30). – С. 86–89.

2. Шень, А. Программирование: теоремы и задачи / А. Шень. – М.: МЦНМО, 2014

Поступила в редакцию 07.06.17.