

УДК 621.316.7+519.7

**ИНТЕРАКТИВНАЯ МОДЕЛЬ ИМИТАЦИИ СБОЕВ
ПРИ ОПЕРАТИВНОМ УПРАВЛЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ
ПРОЦЕССАМИ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОДИФИЦИРОВАННЫХ
СТОХАСТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПЕТРИ**

Кудряшов А.Н., Алёшин Е.Н. (Санкт-Петербург)

Введение

Управление сложными технологическими процессами (СТП) – это выполнение комплекса операций управления ими с определенным набором отношений между операциями, определяющих порядок их выполнения, а также набором соответствующих инструкций, перечнем соответствующего оснащения, условий и ограничений выполнения каждой из операций, обеспечивающих достижения требуемого результата (цели) с заданным качеством [1].

В ходе оперативного управления СТП, связанными с перемещением чего-либо в пространстве (функционирование перерабатывающих предприятий, конвейеров, организация движения железнодорожного и автотранспорта, судоходства, воздушных сообщений, обеспечение применения разнородных подвижных объектов), ключевой фигурой является человек-оператор, диспетчер, принимающий решение о выполнении той или иной технологической операций управления. Его роль особенно возрастает при отклонениях от штатного хода процесса управления, возникновении сбоев, как в ситуациях неспособности системы управления выполнить очередную технологическую операцию, так и при нештатном функционировании самого объекта управления. Для повышения качества подготовки операторов, способных в условиях дефицита времени принимать решения по демпфированию сбоев и достижению поставленных целей, видится полезным использование тренажерных систем с включенной в состав их математического обеспечения предлагаемой модели. Кроме того, проигрывание на данной динамично формируемой имитационно-аналитической модели нестандартных, немыслимых с точки зрения инструкций, управленческих решений может позволить найти пути совершенствования технологии управления рассматриваемыми СТП.

Основная часть

В соответствии с методами системного анализа первичной является главная цель – выполнение объектом управления (СТП) его целевого предназначения. Структура СТП в зависимости от его типа может задаваться технологией производства, расписаниями движения поездов, полетов самолетов, временным графиком работы бортовой аппаратуры космического аппарата и т.д. Исходя из них формируется и реализуется комплекс операций управления СТП.

Решение задачи моделирования сбоев в процессе управления должно начинаться с моделирования выполнения указанного комплекса операций управления (КОУ), только протекающего штатно. При этом должно учитываться то, что человек-оператор является частью системы управления, причем организующей. То есть модель процесса управления должна быть интерактивной, предоставляющей оператору данные о состоянии СТП и возможность выдавать управляющие воздействия по изменению (сохранению) этого состояния.

Возникающие при управлении СТП нештатные (аварийные) ситуации (НС), то есть ситуации, угрожающие жизни и здоровью людей, экологии среды, выходом из строя технических средств, невыполнением цели выполнения СТП, как правило, явно

проявляются, ясны последствия от них, природа их возникновения часто лежит на поверхности. Назначаются экспертные комиссии, определяются конкретные причины (виновные), разрабатываются планы мероприятий по устранению последствий НС. Соответственно, и для моделирования масштабных НС привлекаются методы различных научных направлений: технических, химических, биологических, метеорологических, военных и т.д.

Сбой же, это частное проявление НС, характеризующееся неспособностью отдельного функционального элемента системы выполнить свою функцию, как правило, по неизвестной причине, иногда кратковременной и самоустранивающейся. Будем понимать под сбоем в ходе управления СТП невозможность выполнения очередной операции управления по неизвестной причине (от отказа клавиатуры на рабочем месте оператора до аварии на самом объекте управления). При этом нет времени для детального анализа причин и последствий сбоя, необходимо оперативно принимать решение – ничего не делать, ждать, когда сбой самоустранился, повторять операцию или искать обходной путь, байпас, в структуре комплекса операций управления СТП.

Это структура, представляющая собой совокупность реализуемых в процессе управления технологических операций, направленных на достижение целей, стоящих перед системой, и логико-временных взаимосвязей между ними, построенных с учетом ресурсов, необходимых для выполнения указанных операций [2]. С одной стороны, она является весьма жесткой конструкцией, определяющей дисциплину технологического процесса. С другой стороны, она может обладать явной и неявной гибкостью, допустимой из-за наличия резервных возможностей: дублирующих технических средств, каналов связи, способов выполнения отдельных функций по сокращенным технологиям, допускающим при достижении цели выполнения СТП некоторое снижение его качества и др.

С учетом указанных обстоятельств предлагается модель процесса управления СТП динамично формировать из набора однотипных моделей, каждая из которых отражает выполнение фрагмента КОУ, одной или нескольких технологических операций, допустимых для выполнения в текущей ситуации с точки зрения потенциальных возможностей управляемого СТП, здравого смысла, разрешенной гибкости и вариативности технологической структуры КОУ.

Для моделирования процесса выполнения КОУ предлагается использовать аналитико-имитационное моделирование, и, в частности, так называемые сети Петри (СП), причинно-следственные модели параллельных действий, способные адекватно отразить логико-временные связи между технологическими операциями и динамику их выполнения [2,3,4,5]. Для отражения возможного негативного влияния факторов природного и техногенного характера, человеческих ошибок, отказов технических (программных) средств, приводящих к сбоям в ходе управления СТП, в модель следует ввести элементы, учитывающие неопределенность появления этих сбоев, влияющих на выполнение запланированных технологических операций управления СТП. Кроме того, коль скоро модель предназначена для использования в целях обучения, она должна предоставлять обучаемому оператору информацию о состоянии СТП и возможность самому выполнять управляющие действия. А для преподавателя (инструктора) должны быть предусмотрены возможности по изменению исходных данных, вводу нештатных ситуаций, а также накопления информации о действиях обучаемого для последующего их разбора.

С учетом приведенных требований была сформирована стохастическая сеть Петри с управляющими позициями, в которой переходы и позиции интерпретировались

следующим образом. Переходы – это технологические операции, а наличие маркеров во входных позициях – условия для их выполнения. Она имеет следующий вид.

$$(P, T, F_1, F_2, M, S) \quad (1)$$

где обозначены следующие компоненты модели.

P – множество позиций, состоящее из трех подмножеств:

P_1 – множество входных логических или стартовых позиций, маркер в каждую из которых помещает оператор, наличие маркера говорит о том, что предыдущая операция выполнена (данная позиция одновременно назначается выходной, финальной предыдущего перехода) и разрешена технологически выбранная оператором следующая операция (разрешен запуск соответствующего перехода);

P_2 – множество входных «возмущаемых» позиций, отсутствие маркеров в которых говорит о невозможности выполнения соответствующих операций из-за отказа технического средства, ошибки персонала, других воздействий или эти операции осознанно исключены из технологического цикла (задается инструктором);

P_3 – множество выходных «контрольных» позиций или позиций отображения, визуализации ситуации, появление маркеров в которых говорит о выполнении очередной выбранной операции, позволяет соответственно сигнализировать об этом оператору на экране монитора, при наличии и необходимости для обучения запускать подготовленные заранее мультимедийные эффекты, вибрацию, механические приводы наклона кресла оператора и т.д.

T – множество переходов $t_i, i = 1, \dots, n$, срабатывание каждого из которых интерпретируется как выполнение соответствующей технологической операции управления.

F_1 и F_2 – матрицы входных и выходных инцидентий, задающих связи между входными позициями и переходами, и между переходами и выходными позициями соответственно.

$M: P \rightarrow N, N = \{0, 1, 2, \dots\}$ – отображение, задающее маркировку (количество маркеров в позициях).

Правило срабатывания любого перехода t_i состоит в том, что из его входных позиций p_{1i} и p_{2i} должно быть изъято число маркеров, равное кратности дуг (ребер), соединяющих эту позицию с переходом – (2), (3), а в его выходную позицию p_{3i} должно быть помещено, дополнительно к имеющимся, число маркеров, равное кратности дуги, соединяющей переход и данную позицию (4).

$$\hat{m}(p_{1i}) = m(p_{1i}) - f_1(p_{1i}, t_i), \quad (2)$$

$$\hat{m}(p_{2i}) = m(p_{2i}) - f_1(p_{2i}, t_i), \quad (3)$$

$$\hat{m}(p_{3i}) = m(p_{3i}) + f_2(p_{3i}, t_i). \quad (4)$$

В предлагаемой модели матрицы F_1 и F_2 имеют свои особенности, отличающие их от традиционных [4].

Элементы матрицы – $f_1(p_{1i}, t_i), i = 1, \dots, n$ определяются, исходя из следующих соображений.

Условие запуска перехода t_i стандартное: число маркеров во входной позиции p_{1i} , как и в позиции p_{2i} , должно быть больше или равно кратности входной дуги (числу x):

$$m(p_{1i}) \geq x \quad (5)$$

В классическом подходе, используемом в [4], при описании стохастических сетей Петри, для введения неопределенности предлагается определять маркировку $m(p_{li})$ в левой половине неравенства (5) по вектору, компоненты которого – это вероятности появления в позиции p_{li} одного маркера, двух маркеров, трех маркеров и т.д. В отличие от такого подхода, когда число маркеров неизвестно, да и представляется весьма сомнительной возможностью обоснованного построения таких вероятностных векторов, в моделируемой нами ситуации число маркеров во входной позиции p_{li} известно точно. Это число попыток обучаемого оператора запустить выполнение очередной технологической операции. Зато неизвестно, выполнится она или будет сбой. Для моделирования возможных сбоев предлагается вводить неопределенность в правую часть неравенства (5), задавая кратность дуги $f_i(p_{li}, t_i)$ – число x , датчиком случайных натуральных чисел в интервале $[1, m]$. При этом число m следует вводить, конечно, втайне от обучаемого. Такое введение в матрицу входных инцидентов своеобразной «структурной неопределенности» позволяет рассматривать предлагаемую модель как новую модификацию стохастических сетей Петри.

Используемая в модели матрица выходных инцидентов – F_2 , усиливает структурную неопределенность, связывая переходы только с «висячими», накопительными, контрольными позициями из множества P_3 , предоставляя оператору самому определять следующую за текущей технологическую операцию, допустимую в первую очередь с точки зрения разрешенной гибкости структуры комплекса операций управления СТП.

Для задания применительно к каждой завершенной операции перечней, наборов, разрешенных следующих за ней операций в структуру модели СП включена специальная матрица S .

S – матрица разрешений, элементы которой,

$$s(t_i, p_{lj}) = [0, 1], i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n,$$

определяют для операции t_i перечень всех разрешенных к выполнению после нее операций t_j , а также возможности, в случае сбоя ее выполнения, построения обходного пути, байпаса, в структуре КОУ или повтора операции ($i = j$).

Графически элементарный фрагмент СП, моделирующий выполнение технологической операции t_i , представлен на рис.1.

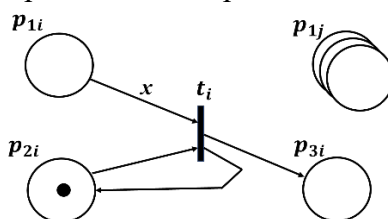


Рис.1. Элементарный фрагмент СП

Факт выполнения или сбоя в выполнении текущей операции – t_i определяется по появлению или отсутствию, соответственно, маркера в контрольной позиции – p_{3i} с одновременным пропаданием или остающимся в наличии маркере в позиции p_{li} . Таким образом, вектор текущей контрольной подмаркировки, часть вектора маркировки – μ , задающий количество маркеров в позициях подмножества P_3 , наряду с матрицей S , определяют состав предоставляемой оператору информации о состоянии СТП, ее визуализацию (текстовые, графические, аудиосообщения, мультимедийные

эффекты и т.п.). Сообщение о невыполнении операции (нет срабатывания перехода t_i после помещения маркера в позицию p_{1i} , не появился новый маркер в контрольной позиции p_{3i}) может выдаваться с заранее заданной временной задержкой. Кроме того, накапливающиеся в контрольных позициях маркеры несут информацию о действиях обучаемого (выборе, повторе, пропуске технологических операций), которая может быть использована для последующего разбора занятия.

Заключение

Следует заметить, что модель предоставляет оператору (обучаемому или исследователю) в случае сбоя выполнения текущей технологической операции управления набор разрешенных действий в широком диапазоне: от очевидных до гипотетически возможных. Это может позволить найти решения, «немыслимые» с точки зрения сложившейся практики, закрепленной в инструкциях, но неявно ощущаемые опытными специалистами, занимающимися управлением соответствующими СТП. Следовательно, разработанная модель может использоваться не только для обучения, но и для исследований, направленных на поиск нестандартных решений по выходу из нештатных ситуаций и в целом на совершенствование рассматриваемой технологии управления.

Литература

1. Управление космическими аппаратами и средствами наземного комплекса / Ю.С. Мануйлов, И.И. Делий и др. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2010. – 609 с.
2. **Кудряшов А.Н.** Анализ целевых возможностей наземного комплекса управления космическими аппаратами на основе сетей Петри и экспертного оценивания // Интеллектуальные технологии на транспорте. Электронный журнал. – СПб.: ПГУПС, 2020. – №2. – С.71-76.
3. **Решмин Б.И.** Имитационное моделирование и системы управления. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2016. – 74 с
4. **Резников Б.А.** Системный анализ и методы системотехники. Моделирование сложных систем. – Л.: МО СССР, 1990. – 522 с.
5. Обоснование состава инструментария разработки программных средств моделирования космических систем / А.В. Колесник, М.Ю. Ортиков, А.В. Чарушников // Труды ВКА имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2020. – Вып. 675. – С.53-61.