

Моделирование сбоев в информационно-технологическом процессе управления подвижными объектами на основе модифицированных стохастических сетей Петри для использования в тренажерных системах

к.воен.н. А. Н. Кудряшов, В. Н. Воротягин
Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского
Санкт-Петербург, Россия
kudrspb@mail.ru, vorotyagin@rambler.ru

Аннотация. Представляется модель проявления сбоев в информационно-технологическом процессе управления подвижными объектами различного рода (поезда, надводные и подводные суда, самолеты, космические аппараты). Применительно к конкретной системе управления модель динамично формируется из набора однотипных фрагментов стохастической сети Петри с управляющими позициями, модифицированной для поставленной задачи. Разработанную модель предполагается использовать в тренажерных системах подготовки соответствующих операторов, диспетчеров, оперативных дежурных, инженеров центров управления движением (полетами), экипажей подвижных объектов.

Ключевые слова: подвижный объект, технологический процесс управления, технологическая операция, сбой, неопределенность, сеть Петри, матрица инцидентности, визуализация контрольной подмаркировки.

ВВЕДЕНИЕ

Идея применения обобщающего понятия «подвижные объекты» и анализа информационно-технологических процессов управления ими (их обслуживания) далеко не нова [1]. К активным подвижным объектам (АПО) могут быть отнесены различные перемещающиеся в пространстве с функционирующим бортовым оборудованием и ведущие информационный, энергетический или вещественный обмен с физической средой или другими АПО системы: железнодорожные составы, поезда метрополитена, автотранспорт, воздушные, надводные и подводные суда, космические аппараты. В более широком понимании к классу АПО могут быть отнесены сами по себе неподвижные предприятия, но с весьма подвижным производством: сборочные конвейеры, нефтеперегонные, сталелитейные заводы и т. п.

В общем случае технология управления — совокупность процессов преобразования сведений о состоянии объекта управления и воздействиях среды в управляющее воздействие [2]. Информационно-технологический процесс управления активными подвижными объектами (ПО) — выполнение комплекса технологических операций управления ПО с определенным набором отношений между ними, определяющих порядок их выполнения, а также набором соответствующих инструкций, перечнем

соответствующего оснащения, условий и ограничений выполнения каждой из операций, обеспечивающих достижение требуемого результата (цели) с заданным качеством. Информационным процесс назван потому, что в настоящее время как операции сбора сведений о состоянии ПО, так и выдачи на него управляющих воздействий — это преимущественно операции манипулирования информацией с использованием аппаратно-программных средств. Механические приводы уходят в прошлое, штурвалы заменяются на джойстики.

В ходе реализации информационно-технологического процесса управления ПО ключевой фигурой является человек-оператор, принимающий решение о выполнении той или иной технологической операции управления. Его роль особенно возрастает при отклонениях от штатного хода процесса управления, возникновении сбоев, то есть в ситуации неспособности системы управления выполнить очередную технологическую операцию. Для повышения 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 моделью.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Следует различать процесс целевого функционирования управляемого подвижного объекта и информационно-технологический процесс управления им. В соответствии с методами системного анализа первичной является главная цель — выполнение ПО его целевого предназначения. Структура целевого процесса функционирования ПО в зависимости от его типа может задаваться расписаниями движения поездов, полетов самолетов, временным графиком работы бортовой аппаратуры космического аппарата и т. д. Исходя из них формируется и реализуется информационно-технологический процесс управления ПО.

Решение задачи моделирования сбоев в упомянутом выше процессе управления должно начинаться с моделирования самого процесса, только протекающего штатно. При этом должно учитываться то, что человек-оператор —

часть этого процесса, причем организующая. То есть модель процесса управления ПО должна быть интерактивной, предоставляющей оператору данные о состоянии ПО и возможность выдавать управляющие воздействия по изменению (сохранению) этого состояния.

Возникающие при управлении ПО нештатные (аварийные) ситуации (НС), то есть ситуации, угрожающие жизни и здоровью людей, экологии среды, выходом из строя технических средств, невыполнением цели функционирования ПО, 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 самоустраняющейся. Под сбоем в информационно-технологическом процессе управления ПО будем понимать невозможность выполнения очередной технологической операции управления по неизвестной причине (от отказа клавиатуры на рабочем месте оператора до аварии на самом ПО). При этом нет времени для детального анализа причин и последствий сбоя, необходимо оперативно принимать решение: ничего не делать, ждать, когда сбой самоустранится, повторять операцию или искать обходной путь (байпас) в структуре технологического процесса управления ПО.

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 [3]. 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 функционирования ПО некоторое снижение его качества и др.

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

Для моделирования процесса управления ПО 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

[3–6]. Для отражения возможного негативного влияния факторов природного и техногенного характера, человеческих ошибок, отказов технических (программных) средств, приводящих к сбоям в ходе процесса управления ПО, в модель следует ввести элементы, учитывающие неопределенность появления этих сбоев, влияющих на выполнение запланированных технологических операций управления ПО. Кроме того, коль скоро модель предназначена для использования в целях обучения, она должна предоставлять обучаемому оператору информацию о ходе процесса управления и возможность самому выполнять управляющие действия. А для преподавателя (инструктора) должны быть предусмотрены возможности по изменению исходных данных по технологии управления ПО, 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:

$$(P, T, F_1, F_2, M, S).$$

Рассмотрим 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., вплоть до эффектов 7D-кинотеатров.

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

F_1 и F_2 — матрицы входных и выходных инцидентов, задающих связи между входными позициями и переходами и 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 изъ-

ято число маркеров, равное кратности дуг (ребер), соединяющих эту позицию с переходом (1), (2), а в его выходную позицию p_{3i} должно быть помещено, дополнительно к имеющимся, число маркеров, равное кратности дуги, соединяющей переход и данную позицию (3).

$$m^{\wedge}(p_{1i}) = m(p_{1i}) + f_1(p_{1i}, t_i), \quad (1)$$

$$m^{\wedge}(p_{2i}) = m(p_{2i}) + f_1(p_{2i}, t_i), \quad (2)$$

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

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):

$$m(p_{1i}) \geq x. \quad (4)$$

В классическом подходе, используемом в [4], при описании стохастических сетей Петри для введения неопределенности предлагается определять маркировку $m(p_{1i})$ в левой половине неравенства (4) по вектору, компоненты которого есть вероятности появления в позиции p_{1i} одного маркера, двух маркеров, трех маркеров и т. д. В отличие от такого подхода, когда число маркеров неизвестно, да и представляется весьма сомнительной возможность обоснованного построения таких «вероятностных маркировок», в моделируемой нами ситуации число маркеров во входной позиции p_{1i} 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 (4), задавая кратность дуги $f_1(p_{1i}, t_i)$ — число x — датчиком случайных натуральных чисел в интервале $[1, m]$. При этом число m следует вводить, конечно, втайне от обучаемого. Такое введение своеобразной «структурной неопределенности» в матрицу входных инцидентов 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 информационно-технологического процесса управления ПО. Для задания применительно к каждой завершенной операции перечней, наборов разрешенных следующих за ней операций в структуру модели СП включена специальная матрица S — матрица разрешений, элементы которой

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

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 технологического процесса управления или повтора операции ($i = j$).

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

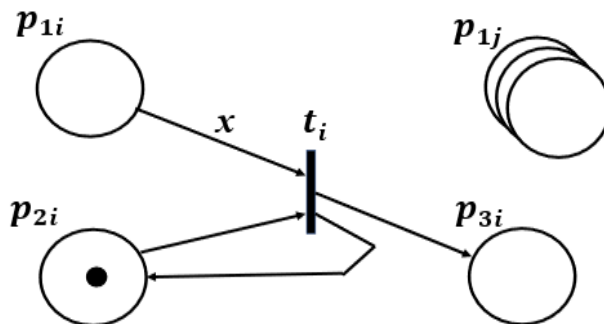


Рис. 1. Элементарный фрагмент СП

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 оставшимся в наличии маркере в позиции p_{1i} . Таким образом, вектор текущей контрольной подмаркировки, часть вектора маркировки μ , задающего количество маркеров в позициях подмножества P_3 , наряду с матрицей S определяют состав предоставляемой оператору информации о состоянии процесса управления ПО, 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 [6]. 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.

Следует заметить, что модель, предоставляя обучаемому в случае сбоя выполнения текущей технологической операции управления набор разрешенных действий в широком диапазоне от очевидных до гипотетически возможных, может позволить найти решения, «немыслимые» с точки зрения сложившейся практики, закреплённой в инструкциях, неявно ощущаемые специалистами, годами занимающимися управлением ПО, но скованными нарабатанными до автоматизма рефлексам. 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 технологии управления ПО.

ЛИТЕРАТУРА

1. Калинин, В. Н. Теоретические основы управления операциями обслуживания подвижных объектов: Учебное пособие для слушателей и курсантов. — Ленинград [Санкт-Петербург]: Воен. инж. ин-т им. А. Ф. Можайского, 1976. — 95 с.
2. Управление космическими аппаратами и средствами наземного комплекса управления: Учебник / Ю. С. Мануйлов, В. Н. Калинин, В. С. Гончаревский, [и др.]; под общ.

ред. Ю. С. Мануйлова. — Санкт-Петербург: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2010. — 609 с.

3. Кудряшов, А. Н. Анализ целевых возможностей наземного комплекса управления космическими аппаратами на основе сетей Петри и экспертного оценивания // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2020. № 2 (26). С. 71–77.

4. Резников Б. А. Системный анализ и методы системотехники. Часть 1. Методология системных исследований. Моделирование сложных систем. — Министерство обороны СССР, 1990. — 522 с.

5. Колесник, А. В. Обоснование состава инструментария разработки программных средств моделирования космиче-

ских систем / А. В. Колесник, М. Ю. Ортиков, А. В. Чарушников // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. 2020. Вып. 675. С. 53–61.

6. Кудряшов А.Н. Тренажерно-обучающая модель выдачи управляющих воздействий на бортовые устройства космического аппарата на основе временных сетей Петри // Проблемы создания и применения космических аппаратов и систем средств выведения в интересах решения задач вооруженных сил Российской Федерации: Материалы III Всероссийской научно-практической конференции (Санкт-Петербург, Россия, 12–13 апреля 2022 г.). — Санкт-Петербург: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2022. — С. 281–286.

Modeling of Faults in the Information-Technological Process of Control of Moving Objects on the Basis of Modified Stochastic Petri Nets for Use in Simulation Systems

PhD A. N. Kudryashov, V. N. Vorotyagin

Mozhaisky Military Space Academy

Saint Petersburg, Russia

kudrspb@mail.ru, vorotyagin@rambler.ru

Abstract. A model of the manifestation of failures in the information-technological process of managing various types of mobile objects (trains, surface and underwater vessels, aircraft, spacecraft) is presented. As applied to a specific control system, the model is dynamically formed from a set of similar fragments of a stochastic Petri net with control positions modified for the task. The developed model is supposed to be used in simulator training systems for relevant operators, dispatchers, operational duty officers, engineers of traffic control centers (flights), crews of mobile objects.

Keywords: moving object, technological process of control, technological operation, failure, uncertainty, Petri net, incidence matrix, visualization of control labeling.

REFERENCES

1. Kalinin V. N. Theoretical bases of management of operations of service of mobile objects: Study guide [Teoreticheskie osnovy upravleniya operatsiyami obsluzhivaniya podvizhnykh obektov: Uchebnoe posobie]. Leningrad [Saint Petersburg] Mozhaisky Military Engineering Institute, 1976, 95 p.
2. Manuylov Yu. S., Kalinin V. N., Goncharevsky V. S. Control of space vehicles and means of the ground complex: Textbook [Upravlenie kosmicheskimi apparatami i sredstvami nazemnogo kompleksa upravleniya: Uchebnik]. Saint Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy, 2010, 609 p.
3. Kudryashov A. N. Analysis of the Target Capabilities of the Ground-Based Spacecraft Control System Based on Petri Nets and Expert Evaluation [Analiz tselevykh vozmozhnostey nazemnogo kompleksa upravleniya kosmicheskimi apparatami na osnove setey Petri i ekspertnogo otsenivaniya], *Intellectual Technologies on Transport [Intellektualnye tekhnologii na transporte]*, 2020, No. 2 (26), Pp.71–77.

4. Reznikov B. A. System analysis and methods of system engineering. Part 1. Methodology of system research. Modeling of complex systems [Sistemnyy analiz i metody sistemotekhniki. Chast 1. Metodologiya sistemnykh issledovaniy. Modelirovanie slozhnykh sistem]. Ministry of Defense of the USSR, 1990, 522 p.

5. Kolesnik A. V., Ortikov M. Y., Charushnikov A. V. Justification of the Composition of Tools for Developing Software for Modeling Space Systems [Obosnovanie sostava instrumentariya razrabotki programnykh sredstv modelirovaniya kosmicheskikh sistem], *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy [Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii imeni A. F. Mozhayskogo]*, 2020, Is. 675, Pp. 53–61.

6. Kudryashov A. N. Simulator-Training Model for Issuing Control Actions on On-Board Devices of a Spacecraft Based on Temporary Petri Nets [Trenazherno-obuchayushchaya model vydachi upravlyayushchikh vozdeystviy na bortovye ustroystva kosmicheskogo apparata na osnove vremennykh setey Petri], *Problems of Creating and Using Spacecraft and Launch Vehicle Systems in the Interests of Solving the Problems of the Armed Forces of the Russian Federation: Proceedings of the III All-Russian Scientific and Practical Conference [Problemy sozdaniya i primeneniya kosmicheskikh apparatov i sistem sredstv vyvedeniya v interesakh resheniya zadach vooruzhennykh sil Rossiyskoy Federatsii: Materialy III Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii]*, Saint Petersburg, Russia, April 12–13, 2022. Saint Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy, 2022, Pp. 281–286.