волновой функции в представлении базиса собственных векторов оператора алгоритма. В естественной кодировке действие оператора сводится к умножению соответствующего коэффициента в разложении волновой функции на собственное число. Различие квантового и классического компьютера определяется выбором элементарной операции. В случае квантового компьютера это всегда оператор, то есть математический объект, который преобразует одну функцию в другую. Альберт Эйнштейн однажды пошутил, сказав, что всевышний вычисляет дифференциалы эмпирически. Эта мысль становится прозрачной, когда в качестве элементарной операции выбирается оператор алгоритма целиком. То, что квантовый компьютер делает за один прием экспериментально для классического компьютера многоступенчатая работа. Легко видеть, что если мы введем правило представлять, как исходные, так и выходные данные для квантового компьютера в естественной кодировке, то разница между квантовым и классическим расчетом исчезнет, потому что весь расчет сведется к умножению соответствующего коэффициента на подходящее собственное значение. А с такой операцией отлично справляется и классический компьютер. Также очевидно, что полученный таким образом классический алгоритм также эффективен, как и квантовый из которого он получен, так как требует в точности такого же числа операций для своего выполнения.

Заключение. Методы искусственного интеллекта, а именно обучение с учителем, примененные к приближенному выражению оператора алгоритма позволяют получить генератор матриц произвольного порядка для квантового алгоритма, тем самым решая задачу автоматического построения алгоритма. Показано, что возможны три подхода к определению элементарных операций. В случае, когда в качестве элементарной операции выбирается сам оператор алгоритма, алгоритм оказывается эффективным по определению. Вопрос об эффективности алгоритма остается открытым, а точнее нуждается в доказательстве, в том случае, когда в качестве элементарных операций выбирается набор операторов, соответствующих, например, вентильным схемам. При выборе же в качестве элементарных операций операторов, связанных с собственными значениями оператора алгоритма, эффективность алгоритма определяется поведением собственных значений оператора, отличных от единицы на бесконечности. Наконец показано, что в естественной кодировке, соответствующей представлению собственных векторов оператора алгоритма, исчезает разница между квантовым и классическим алгоритмом. Это открывает возможность выполнять программы для квантовых компьютеров на конвенциональных ЭВМ в том случае если эффективный способ записи информации в естественной кодировке будет применен.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Feynman R. P. Simulating Physics with Computers // International Journal of Theoretical Physics. 1982. Vol. 21. Nos. 6/7. Pp. 467.
- 2. Shor P. W. Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computers // Proceedings of the 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science. 1994. Pp. 124.
- 3. Кошелев К. В. О квантовых алгоритмах // Труды всероссийского совещания по проблемам управления. 2024.

УДК 621.316.7+519.7

ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕРАКТИВНОЙ МОДЕЛИ НА ОСНОВЕ СЕТИ ПЕТРИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ТРЕНАЖЕРНОГО СИМУЛЯТОРА ОТКЛИКОВ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА УПРАВЛЯЮЩИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Кудрящов Александр Николаевич

Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Ждановская ул., 13, Санкт-Петербург, 197198, Россия e-mail: vka@mil.ru

Аннотация. Представляется модель, построенная с использованием сетей Петри, отображающая (симулирующая) для тренирующегося оператора информацию об изменениях в положении космического аппарата и его элементов в пространстве, о смене режимов функционирования бортового оборудования, о выполнении отдельных технологических операций, о нештатных ситуациях, проявившихся в ответ на выданное им управляющее воздействие. Модель предполагается использовать в качестве тренажера по повышению практической подготовленности специалистов центров управления полетами космических аппаратов.

Ключевые слова: космический аппарат; оператор; управляющее воздействие; отклик; интерактивная модель; сеть Петри; симулятор.

APPLICATION OF AN INTERACTIVE MODEL BASED ON AN UNDERDETERMINED PETRI NET TO DEVELOP A SIMULATOR OF RESPONSES OF ONBOARD SPACECRAFT EQUIPMENTTO CONTROL INPUTS

Kudryashov Alexander

Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky, Zhdanovskaya st., 13, St. Petersburg, 197198, Russia e-mail: vka@mil.ru

Abstract. A model is presented, built using Petri nets, which displays (simulates) for the training operator information about changes in the position of the spacecraft and its individual elements in space, about changes in operating modes of on-board equipment, about the performance of individual technological operations, about emergency situations

that appear in response to the issued control action. The model is intended to be used as a simulator to improve the practical preparedness of specialists at spacecraft flight control centers

Keywords: spacecraft; operator; control action; response; interactive model; Petri net; simulator.

Введение. Автоматизация процессов управления космическими аппаратами производится с помощью автоматизированной системы управления ими (АСУ КА). Эффективность функционирования сложной человекомашинной системы, какой является АСУ КА, зависит как от надежности работы технических средств, так и в еще большей степени оперативного персонала, принимающего решения при управлении полетом КА. Надежность работы операторов центров управления полетами (ЦУП) зависит, в основном, от степени их подготовленности. Низкий уровень подготовленности операторов пока еще не может быть скомпенсирован повышением надежности и интеллектуальности технических средств АСУ КА. В соответствии с приводимыми в [1] данными о результатах полетов орбитальных станций, из-за ошибок оперативного персонала происходит до 30 % общего количества нештатных ситуаций. Это официальные задокументированные данные, а в реальных (не всегда фиксируемых, если прошли без последствий) ситуациях этот процент значительно выше. Таким образом, для обеспечения высокого уровня качества управления КА необходима высокая профессиональная подготовка и переподготовка операторов ЦУП. Для ее достижения в числе прочих принимаемых мер разрабатываются тренажеры-симуляторы, позволяющие «погрузить» обучаемого оператора в ту, или иную, сначала штатную, а потом и нештатную ситуацию управления КА. Многократным повторением выполнения штатного технологического цикла управления, прерываемого задаваемыми тренажерной моделью сбоями, достигается требуемый уровень подготовленности операторов к решению отрабатываемых с помощью тренажера задач.

Технологический процесс оперативного управления КА характерен тем, что выполняется вслепую, «по приборам», то есть по информации о текущем состоянии КА (текущей информационной ситуации). Реальная ситуация существует в реальном пространстве, а оператор работает с информационной ситуацией (тренажерной моделью), являющейся отражением реальной ситуации и предоставляемых возможностей оператора по управлению КА. Оператор ЦУП как при плановом ходе работ, а, особенно, при отклонениях от плана, фактически проводит ситуационный анализ в различных аспектах: ретроспективном, текущем, причинно-следственном, целевом и прогнозном [2]. И, действительно, для обоснованного принятия решений он опирается на знания о предыдущих состояниях КА, воспринимает текущее его состояние, пытается определить причины возникающих отклонений от цели (плана) проводимого сеанса управления, прогнозирует последствия таких отклонений.

Таким образом, тренажерная модель подготовки операторов ЦУП должна представлять из себя ситуационнодинамическую модель технологического процесса управления КА, способную информировать оператора о состоянии КА (исходном, текущем, прогнозном) и воспринимать формируемые оператором управляющие воздействия как при плановом ходе сеансов управления, так и при моделируемых (или вводимых инструктором) нештатных ситуациях. Практика разработки тренажеров для подготовки операторов-диспетчеров, кем и является оператор ЦУП, в смежных областях (система управления самолетом, диспетчерские службы вокзала, аэропорта) показала, что должны учитываться определенные принципы, отражающие особенности диспетчерской деятельности [1]. Это принципы: системности, антропоцентрический, эргономический, эргатический, ресурсный.

Принцип системности предполагает, что разрабатываемый симулятор – это целостная организационнотехническая система, обеспечивающая, по возможности, полноту предоставления оператору информации (откликов) о поведении КА и средств наземного комплекса управления (НКУ) в ответ на управляющие воздействия, им сформированные.

Антропоцентрический принцип требует учета особенностей человеческого восприятия информации, происходящего как по одиночным сигналам зрительного и слухового каналов (рецепция), так и по интуитивно формируемому в целом образу предлагаемой ситуации (перцепция). При формировании на тренажере информации, выдаваемой человеку-оператору, могут быть отдельно выделены: информационный канал сообщений о конкретной ситуации и когнитивный канал, поддерживающий, напоминающий общие сведения об управляемом технологическом процессе.

К созданию условий работы человека относится и эргономический принцип. Речь в первую очередь идет о создании удобного, не вызывающего быстрого утомления интерфейса, как по восприятию информации, так и по ее вводу.

Об участии человека говорит и эргатический принцип, состоящий в том, что тренажер рассматривается как человеко-машинная или эргатическая система. Это системы, в которых вмешательство оператора является необходимым условием успешного функционирования объекта управления.

Ресурсный принцип, который должен учитываться при разработке тренажерных моделей, указывает на необходимость предоставления оператору как технологических ресурсов, неких степеней свободы, в рамках которых он может принимать управленческие решения, так и информационно-справочных ресурсов, поддерживающих процесс принятия этих решений.

В качестве математического аппарата построения тренажерного симулятора подготовки операторов ЦУП КА предлагается использовать сети Петри (СП), интерпретируемые как ситуационно-динамические модели выполнения сеансных технологических операций управления КА [3-6].

Наличие и количество маркеров во входных позициях перехода СП, срабатывание которого понимается как выполнение очередной сеансной операции управления (СОУ), определяет текущую сеансную ситуацию. Правило запуска перехода традиционное: число маркеров во входных позициях должно быть больше или равно числу

(кратности) дут, соединяющих позиции и переход. Количество дут, соединяющих одну из входных позиций и переход, предлагается задавать случайным натуральным числом, а маркер в эту позицию помещает оператор, что понимается как выбор им данной операции для выполнения. Такая стохастическая конструкция позволяет ввести неопределенность следующего рода. СОУ может выполнится сразу, без замечаний, или выполнится после нескольких повторов команд на ее исполнение, а может и не выполнится, что потребует от оператора выбора альтернативного курса действий. То есть оператор должен в результате анализа предоставляемой информации выбрать для выполнения операцию из перечня допустимых в текущей ситуации или ничего не выполнять, предоставив КА двигаться по орбите, отрабатывая ранее выданные управляющие воздействия. В терминах СП — выбрать для запуска другой переход или остановить тренировку и приступить к ее разбору — анализу выполненных (или невыполненных) действий, зафиксированных в выходных контрольных позициях соответствующих переходов СП (в текущей контрольной подмаркировке [4]).

Динамика в моделируемый процесс вводится двояко: с одной стороны — за счет динамики изменения маркировки СП в ходе срабатывания переходов, с другой стороны, оператор, выбирая для запуска один из разрешенных переходов, сам в интерактивном режиме динамично формирует (доопределяет) текущую структуру модели в соответствии с упомянутыми выше эргатическим и ресурсным принципами разработки тренажеров.

Ресурсный же и антропоцентрический принципы предполагают наличие информационно-справочных ресурсов, поддерживающих процесс принятия решений оператором. Для этого в предлагаемой модели используется 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 схемы с подкрашенными траспарантами, таблицы с данными оперативной телеметрии, возможные сценарии развития ситуации и т.д., вплоть до мультимедийных эффектов, отображающих функционирования КА в космическом пространстве. Следует заметить, что следование принципу системности, полноты моделирования процесса управления КА (см. выше) не должно быть устремлено к созданию максимального количества визуальных, звуковых и прочих эффектов, а ограничиваться рамками, определяемыми теми конкретными навыками действий, которые отрабатываются на тренировке и исходной подготовленностью обучающегося (тестируемого) оператора. Кроме того, стремление предоставить оператору возможности по выбору действий, а также справочную информацию, которые могут гипотетически рассматриваться при анализе процессов управления КА, но заведомо не нужны в выбранных для обучения ситуациях, может привести к неподъемному росту размерности создаваемой тренажерной модели.

С учетом приведенных требований была сформирована стохастическая сеть Петри с управляющими позициями, имеющая следующий вид.

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

где обозначены следующие компоненты модели.

Р – 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 $t_i, i=1,...,n$, срабатывание каждого из которых интерпретируется как выполнение соответствующей технологической операции управления.
- F_1 и F_2 матрицы входных и выходных инциденций, задающих связи между входными позициями и переходами, и переходами и выходными позициями соответственно.
 - $M: P \to N, N = \{0,1,2,...\}$ 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).

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

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

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

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, ..., 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):

$$m(p_{1i}) \ge x \tag{5}.$$

В классическом подходе, используемом в [3], при описании стохастических сетей Петри, для введения неопределенности предлагается определять маркировку $\mathbf{m}(\mathbf{p}_{1i})$ в левой половине неравенства (5) по вероятности появления в позиции \mathbf{p}_{1i} одного маркера, двух маркеров, трех маркеров и т.д. В отличии от такого подхода, когда представляется весьма сомнительной возможность обоснованного построения таких вероятностных векторов, в моделируемой нами ситуации число маркеров во входной позиции \mathbf{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 (5), задавая кратность дуги $f_1(p_{1i},t_i)$ — число x, датчиком случайных натуральных чисел в интервале [1,m]. Такое введение в матрицу входных инциденций своеобразной «структурной неопределенности» позволяет рассматривать предлагаемую модель как новую модификацию стохастических сетей Петри.

Используемая в модели матрица выходных инциденций — 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.

Для задания этой гибкости применительно к каждой завершенной операции, то есть для задания перечней разрешенных следующих за ней операций, в структуру модели СП включена специальная матрица S.

S — матрица разрешений, элементы которой,

$$s(t_i, p_{1i}) = [0,1], i = 1, ..., n, j = 1, ..., n,$$
 (6)

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 комплекса операций управления или повтора операции (i=j). Данная матрица является новым авторским элементом в составе модели типа сети Петри. Она позволяет не определять жестко заранее пути в двудольном графе СП, а, задавая лишь отдельные ограничения, предоставляет каждому оператору возможность в интерактивном режиме «вязать» из элементарных фрагментов свою индивидуальную СП, отображающую выполнение выбранной им последовательности операций. Таким образом удается избежать пресловутое «проклятие размерности». Ведь даже для двадцати сеансных операций число вариантов их выполнения достигает числа: два в четырехсотой степени

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

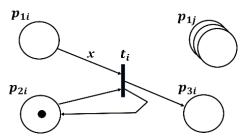


Рис. 1 Элементарный фрагмент СП

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_{1i} . Таким образом, вектор текущей контрольной подмаркировки, часть вектора маркировки — μ , задающая количество маркеров в позициях подмножества P_3 , определяет состав предоставляемой оператору информации об откликах бортового оборудования КА на управляющие воздействия, ее визуализацию (текстовую, графическую, аудиосообщения, мультимедийные эффекты и т.п.). 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.

Выводимая для оператора информация распределяется на три экрана (поля). На первом приводится программа запланированного сеанса, составленная самим обучаемым или введенная заранее инструктором (преподавателем). Этот экран, так и названный: «Программа», создает исходный справочный (когнитивный) канал восприятия, неся информацию о запланированной последовательности СОУ, то есть о задаваемом сценарии смены сеансных ситуаций.

На втором (основном) экране, условно именуемом «Управление», выделено несколько полей (окон), основным из которых является поле ввода управляющих воздействий (набора разовых, программных команд, задания числовых

массивов командно-программной информации (КПИ) для бортового вычислительного комплекса) и контроля их получения.

Кроме того, на экране размещены поля, отображающие текущее время, номера средств НКУ, выполняющих текущие сеансные операции с КА, уровень принимаемого сигнала (при его наличии), списки команд, массивов КПИ, потенциально доступных для выдачи. Данный экран является отображением текущей сеансной ситуации, определяемой наличием и количеством маркеров в выходных позициях тех переходов СП, срабатывание которых означает выполнение операций, предшествующих текущей.

Ввод управляющих воздействий (КПИ) осуществляется оператором по информации первого экрана вручную на клавиатуре и (или) путем выбора фрагментов КПИ из списка доступных. При отсутствии требуемых откликов бортового оборудования на выданный фрагмент КПИ перед оператором и встает выбор: повторять фрагмент, выдавать что-то другое или ничего не выдавать, оставив КА наедине с космосом и уже имеющейся на борту управляющей информацией. В терминах СП — необходимо выбрать следующий переход, во входную позицию которого мы поместим маркер.

Помощь в принятии решений, выборе пути обхода возникшей нештатной ситуации оператору может оказать третий, информационно-справочный экран «Анализ». На нем, по выбору оператора, могут отображаться, в частности, необходимая текстовая справочная информация, подсвечиваемая при смене режимов структурная схема основного бортового оборудования КА, являющаяся сама по себе информационной опорой при анализе текущей (штатной или нештатной ситуации). Предусмотрено, что выполнение или невыполнение определенных команд, смены режимов отображается на экране путем цветной подсветки на схеме соответствующих блоков. Например, при отсутствии квитанции на одну из программных команд, соответствующий блок подкрашивается красным цветом, при успешном ходе сеанса используется зеленый цвет. При получении квитанции «нет», то есть при необходимости повтора команды, соответствующие блоки подкрашиваются желтым. Выполнение динамических операций, связанных с пространственными перемещениями КА или его элементов: ориентация, перекладка панелей солнечных батарей, наведение антенных систем отображается графически. Появление информации на экране определяется наличием и количеством маркеров в выходных позициях переходов СП, срабатывание которых обозначает выполнение набранных команд. Тем самым имитируется, несколько упрощенный по сравнению с реальным, канал поступления телеметрической информации о состоянии бортового оборудования КА.

Заключение. В представленном тренажере-симуляторе были по возможности учтены принципы разработки тренажеров, отражающие особенности работы инженеров-операторов ЦУП: системности, антропоцентрический, эргономический, эргономический, ресурсный. Тем не менее, путями его совершенствования видятся: расширение состава отрабатываемых сеансных операций, адаптация используемых экранных форм к конкретным типам КА, детализация телеметрической информации, предоставляемой оператору для анализа (создание возможности выбора телеметрируемых бортовых устройств и их параметров), отображение баллистической информации и докладов персонала средств НКУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Бронников С.В. Применение геоинформатики при управлении полетами космических аппаратов // Вектор ГеоНаук. 2022. Т. 5. № 3. С. 72-79. DOI: 10.24412/2619-0761-2022-3-72-79.
- 2. Цветков В.Я. Ситуационное управление // Современные технологии управления. ISSN 2226-9339. № 2 (102). Номер статьи: 10204. Дата публикации: 06.05.2023.
- 3. Резников Б.А. Системный анализ и методы системотехники. Моделирование сложных систем. Л.: МО СССР, 1990. 522 с.
- 4. Кудряшов А. Н. Использование стохастических временных сетей Петри для моделирования выдачи управляющих команд на космический аппарат // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2021): труды Десятой всероссийской НПК по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности, Санкт-Петербург, 20–22 октября 2021 г. СПб, 2021. С. 587-593.
- 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.
- 6. Sadiq A., Ahmad F., Khan S. A. et al. Modeling and analysis of departure routine in air traffic control based on Petri nets // Neural Computing and Applications. 2014. Vol. 25. № 5. P. 1099-1109.

УДК 621.391.28

ПОСТРОЕНИЕ КРИТЕРИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ РАДИОКАНАЛА LTE СИГНАЛЬНЫМ ТРАФИКОМ

Мошак Николай Николаевич¹, Касаткин Виктор Викторович², Рудинская Сабина Романовна³
¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
Большевиков пр., д.22, корп. 1, Санкт-Петербург, Россия, 193232

²СПб ФИЦ РАН

14-я линия В. О., 39, Санкт-Петербург, 199178, Россия
³Белорусская государственная академия связи
ул. Ф. Скорины, 8/2, г. Минск, 220114, Республика Беларусь
e-mails: nnmoshak49@mail.ru, v.v.kasatkin@iias.spb.su, sabina.rudin@mail.ru

Аннотация. Предложен метод построения функционального критерия эффективности использования пропускной способности радиоканала мобильной сети 4G LTE сигнальным трафиком на базе архитектуры плоскости управления радиоканалом сети для оценки его влияния на параметры основных информационных потоков.