

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТОХАСТИЧЕСКИХ ВРЕМЕННЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЫДАЧИ УПРАВЛЯЮЩИХ КОМАНД НА КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ

А.Н. Кудряшов (Санкт-Петербург)

Предпосылки к созданию модели

Основная операция любого процесса управления – это выдача управляющих воздействий на объект управления. Применительно к космическому аппарату (КА), как объекту управления – это выдача управляющих команд на элементы его бортового оборудования (приборы и устройства).

При управлении КА в ручном или автоматизированном режимах управляющие воздействия в виде так называемых разовых команд (РК) выдаются на КА по радиоканалу с пульта оператора командно-измерительной системы (КИС) при нахождении КА в зоне ее радиовидимости. Кроме того, они могут выдаваться непосредственно с пульта инженера-оператора центра (пункта) управления полетами (ЦУП) транзитно через КИС. В ходе выдачи РК может производиться загрузка числовых массивов (программ) для бортовой вычислительной системы, обеспечивающей работу КА в автоматическом режиме вне зоны видимости наземных средств управления.

С каждым годом функционал обязанностей специалистов, осуществляющих формирование и выдачу указанной командно-программной информации (КПИ), усложняется, поэтому должна обеспечиваться их высокая профессиональная подготовка. Использование тренажерных средств позволяет повысить эффективность обучения управленческого персонала за счет получения практических навыков по отработке штатных и нештатные ситуации при выполнении операций управления КА. Поэтому задача разработки модели-тренажера, имитирующей процесс прохождения и реализации на борту КА набранных оператором на соответствующем пульте управляющих команд, модели, учитывающей неопределенность влияния факторов космического пространства, состояние наземных и бортовых средств, возникающие временные задержки, является актуальной.

Технологическая структура процесса выдачи КПИ в ходе сеанса управления КА

Автоматизированная система управления КА, является сложной с разных аспектов рассмотрения, в том числе в силу многоструктурности своего построения [1]. Оно включает, в частности: структуру технических средств и каналов связи между ними, а также организационную структуру подразделений с их субординационно-координационными взаимосвязями. Элементы этих структур пространственно (топологически) распределены по поверхности Земли и космическому пространству, следовательно, можно говорить о топологической структуре АСУ КА. Как у автоматизированной системы, у нее может быть выделена структура программно-математического обеспечения. Но особая роль принадлежит так называемой технологической структуре – роль первичной, системообразующей структуры. 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]. Для процесса выдачи командно-программной информации в ходе сеанса управления космическим аппаратом такая структура может быть представлена в графическом виде, приведенном на рис. 1.

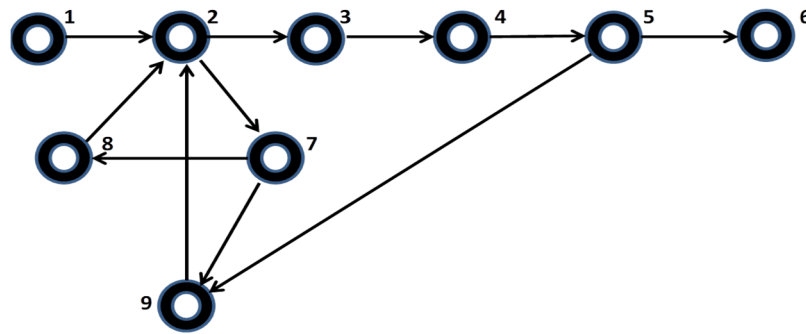


Рис. 1. Технологическая структура процесса выдачи КПИ на КА

На рисунке цифрами обозначены следующие операции.

1. Выдача первой РК.
2. Передача КПИ по радио каналу.
3. Прием и трансляция команд на бортовые устройства КА.
4. Выдача с КА квитанций на КПИ по радио каналу.
5. Получение квитанций (КВ) наземным приемником КИС.
6. Фиксация времени получения КВ.
7. Квитанция не получена (или получена квитанция «нет»).
8. Повтор выдачи РК.
9. Выдача следующей (другой) РК (ВП, РП, ЭИ).

Модель выдачи на КА командно-программной информации

Для моделирования процесса функционирования АСУ КА в фазе проведения сеанса выдачи КПИ на КА предлагается использовать аналитико-имитационное моделирование, и, в частности, так называемые временные сети Петри (ВСП), причинно-следственные модели параллельных действий, способные адекватно отразить логико-временные связи между технологическими операциями. Для отражения возможного негативного влияния факторов космического пространства, человеческих ошибок, отказов (сбоев) технических (программных) средств в модель следует ввести элементы, учитывающие неопределенность в достижении полноты выполнения запланированных технологических операций по выдаче КПИ на КА. Кроме того, коль скоро модель предназначена для использования в качестве тренажера, она должна позволять обучаемому оператору вмешиваться в моделируемый процесс, самому выполнять управляющие действия. А для преподавателя (инструктора) должны быть предоставлены возможности по изменению исходных данных и вводу нештатных ситуаций.

С учетом приведенных требований была сформирована стохастическая временная сеть Петри с управляющими позициями следующего вида (см. также рис.2):

$$(P, T, F_1, F_2, M, M_Z, Q_Z), \quad \text{где} \quad (1)$$

P – множество позиций;

T – множество переходов;

F_1, F_2 – матрицы входных и выходных инцидентий, 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 ВСП;

$M_z: P \rightarrow Q^* = [q_i^* | q_i^* = [0, q_{zi}]], i=1, \dots, n$ – отображение, задающее таймер-векторы ВСП, элементы которых q_i^* – это время, прошедшее после поступления маркера в позицию p_i , n – число позиций в сети; Q_z – множество временных задержек – времен пребывания маркеров в позициях $q_{zi}, i=1, \dots, n$.

Правило запуска (срабатывания) любого перехода t_j состоит в том, что из каждой его входной позиции p_n должно быть изъято число маркеров, равное кратности дуги (ребра), соединяющей эту позицию с переходом (2). А в каждую его выходную позицию p_k должно быть дополнительно помещено число маркеров, равное кратности дуги, соединяющей переход и данную позицию (3). В результате маркировка (состояние) сети изменяется. Для ВСП переход, для которого позиция p_i является входной, не может быть запущен до того, пока не будет выполнено условие: $q_i^* \geq q_{iz}$.

$$m^{\wedge}(p_n) = m(p_n) - f_1(p_n, t_j), \quad (2)$$

$$m^{\wedge}(p_k) = m(p_k) + f_2(t_j, p_k). \quad (3)$$

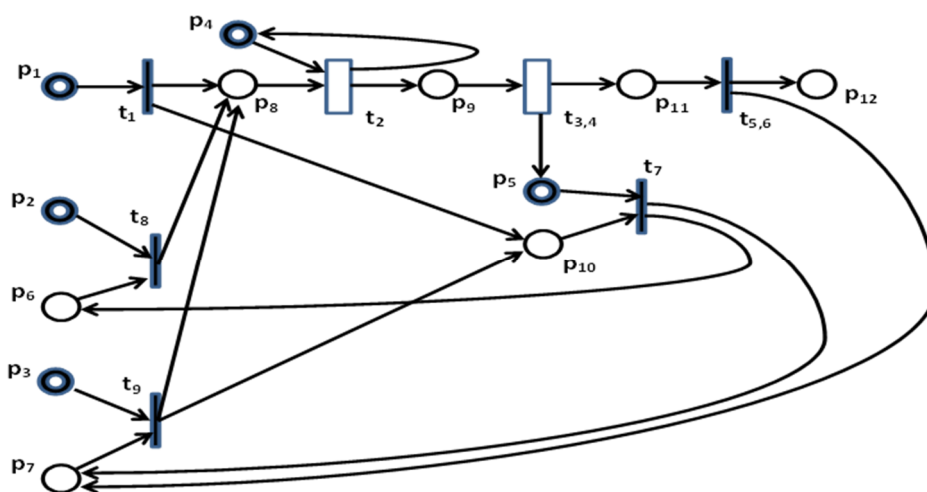


Рис. 2. ВСП, моделирующая процесс выдачи КПИ на КА

При построении модели выдачи КПИ с помощью ВСП ее переходы и позиции интерпретировались следующим образом. Переходы – это технологические операции (см. рис.1), а наличие маркеров во входных позициях – условия для их выполнения [2]. Множество позиций P разделено на два подмножества:

- логические позиции, отображающие технологическую последовательность выполнения операций;
- «возмущаемые» или «управляющие» позиции, 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.

Соответственно имеем:

$t_1 - t_9$ – переходы, срабатывание которых интерпретируется как выполнение технологических операций (см. рис.1);

$p_1 - p_5$ – управляющие позиции;

$p_6 - p_{12}$ – логические позиции.

Переходы t_2 и $t_{3,4}$ – сложные. Первый срабатывает с временной задержкой q_{zi} , $i=8$, имитирующей временной интервал от выдачи РК до получения квитанции на нее.

Второй срабатывает с заданной вероятностью, отражающей неопределенность влияния факторов космического пространства и состояния бортового оборудования. Правило его срабатывания альтернативное: маркер помещается или в выходную позицию p_{11} , что означает наличие условий для срабатывания перехода $t_{5,6}$, то есть получение квитанции на РК, либо в позицию p_5 , что создает условия для ситуации отсутствия квитанции (переход t_7).

Графически логика срабатывания перехода $t_{3,4}$ представлена на рис. 3.

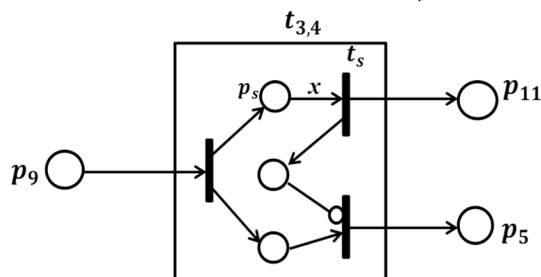


Рис. 3. Переход $t_{3,4}$.

На рис. 3 внутри перехода $t_{3,4}$, изображена сеть Петри, поясняющая его работу. Она включает в себя так называемую «сдерживающую дугу» [3], запрещающую срабатывание перехода, в который она входит, при наличии маркера в позиции, из которой она выходит. Использование такого элемента обеспечивает выполнение логического правила «или» для появления маркера в позициях p_{11} или p_5 , означающего, что квитанция на РК или есть, или ее нет.

На рис. 3 также обозначены: x – кратность дуги, соединяющей «стохастические» позицию p_s и переход t_s . Условие запуска перехода t_s стандартное: число маркеров во входной позиции p_s должно быть больше или равно кратности входной дуги (числу x):

$$m(p_s) \geq x \quad (4)$$

В классическом подходе, используемом в [3], при описании стохастических сетей Петри, для введения неопределенности предлагается задать в левой половине неравенства (4) вместо маркировки $m(p_s)$ вектор, компоненты которого – это вероятности появления в позиции p_s одного маркера, двух маркеров, трех маркеров и т.д. В отличие от этой ситуации, когда число маркеров неизвестно, да и представляется весьма сомнительной возможность обоснованного построения таких «вероятностных маркировок», в моделируемой ситуации число маркеров во входной позиции p_s известно точно – это число попыток обучаемого оператора выдать очередную РК. Зато неизвестно, придет ли на эту РК ответ – квитанция с борта КА. Для моделирования этой неизвестности предлагается вводить неопределенность в правую часть неравенства (4), задавая кратность дуги $f_1(p_s, t_s)$ (число x) датчиком случайных натуральных чисел в интервале $\{1, n\}$. При этом число n (или, в частном случае, непосредственно x) следует вводить, конечно, «втайне» от обучаемого. Такое введение в матрицу входных инцидентий F_1 своеобразной «структурной неопределенности» позволяет рассматривать предлагаемую модель как новую модификацию стохастических сетей Петри.

Использование разработанной модели в качестве тренажера

Обучение (подтверждение квалификации) инженеров по управлению ЦУП (операторов КИС) должно включать в себя отработку навыков выполнения действий непосредственно в ходе сеанса управления КА. Эта фаза технологического процесса обеспечения целевого применения КА является самой динамичной и ответственной, особенно для операций выдачи командно-программной информации.

Наиболее сложным, выполняемым, как правило, только при лётно-конструкторских испытаниях или в аварийных ситуациях, считается режим ручной выдачи РК. Для работы в этом режиме от оператора требуется глубокое понимание физики происходящего процесса, знание технических характеристик КА и средств наземного комплекса управления, умение концентрироваться и быстро реагировать на изменение ситуации. Вариант представления информации обучаемому на экране тренажера при выдаче РК в ходе сеанса в ручном режиме показан на рис. 4.

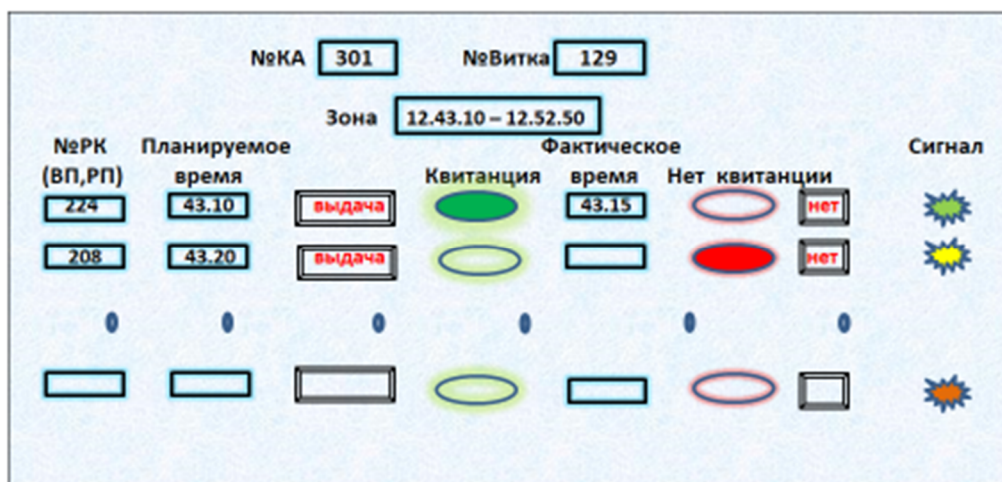


Рис. 4. Экран тренажера при выдаче РК

Исходная сеансная информация: № КА, № витка, зона радиовидимости, программа сеанса: перечень РК, с планируемыми временами их выдачи (если по технологии такая временная привязка предусмотрена), формируется и вводится (вручную или текстовым файлом) заранее или самими обучаемыми, или преподавателем (инструктором) в зависимости от степени подготовленности обучаемых и задач тренировочного занятия. Заранее преподавателем также вводится информация о состоянии средств, расчетов, отсутствии (наличии) возмущающих воздействий. В терминах разработанной модели это означает, что вводится начальная маркировка – вектор $\vec{m}_0$, все компоненты которого равны нулю, за исключением четвертого – $m(p_4)$, числе маркеров в позиции p_4 , $m(p_4) = 1$ означает, что средства и расчеты готовы к проведению сеанса.

Задается также число n – верхний порог значений для датчика случайных чисел, определяющий степень неопределенности (вероятность) успешного выполнения операции закладки командно-программной информации. На начальном этапе обучения неопределенность может не вводиться, то есть кратность дуги $f_1(p_s, t_s)$ – число x (см. рис. 3) может директивно задаваться равным 1.

Время прохождения радиосигнала до КА, его обработки бортовыми устройствами, проверки достоверности, записи в бортовую вычислительную систему и ретрансляции в виде квитанций на наземную станцию учитывается введением временной задержки $q_i, i=\delta$, имитирующей этот временной интервал.

Процесс выдачи КПИ осуществляется в соответствии с рассмотренной выше технологией (см. рис. 1).

Для выдачи РК используются клавиши: «выдача» (ввод маркера в позицию p_1 (p_2, p_3)). При успешном получении (после временной задержки) квитанции на выданную РК загорается зеленый транспарант: «квитанция», фиксируется фактическое время прохождения команды. В случае отсутствия квитанции или получения квитанции «нет» горит соответствующий красный транспарант.

Для ввода нештатных ситуаций преподавателем в любой момент может быть использована клавиша «нет» (нажатие на нее означает извлечение маркера из позиции p_4 , возможно с помещением его в позицию p_5). При этом обучаемому может быть предоставлена дополнительная информация, характеризующая создавшуюся ситуацию (метеопрогноз, действия сторонних сил, сообщения от взаимодействующих организаций и т.п.).

Одним из проявлений введенной неопределенности может выступать качество радиосигнала с борта КА: сильный, слабый, неустойчивый, в шумах, со сбоями и т.д. На большинстве КИС радиосигнал характеризуют соотношением: «сигнал/шум». На экране это соотношение характеризуется цветом правых индикаторов: зеленый, желтый, красный – это сильный, средний или слабый, соответственно. Для работы индикаторов качества сигнала используются те же значения $x \in \{1, n\}$, что вводят неопределенность в появление квитанции на РК.

В условиях заданной обстановки обучаемый должен осознанно и быстро принимать решения по каждой строке программы сеанса, представленной на экране: выдавать следующую набранную РК или перенабирать и повторять текущую (и сколько раз!), а может набирать и выдавать другую, не предусмотренную программой, команду.

Разработанная модель была реализована на языке программирования PYTHON и в настоящее время используется на занятиях в учебном Центре управления полетами КА Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского.

Если при составлении программ сеансов, поиске путей выхода из создаваемых ситуаций будут учтены особенности конкретных типов КИС и КА, то представляемая модель вполне может быть использована в реальных центрах (пунктах) управления КА.

Выводы

В ходе проведенных работ получены следующие результаты.

Сделаны выводы о том, что в целях совершенствования навыков операторов ЦУП (КИС) целесообразно использовать обучающие средства, использующие моделирование в первую очередь процессов выдачи на КА управляющих воздействий (КПИ).

Из совокупности структур выделена как первичная и построена технологическая структура процесса выдачи командно-программной информации в ходе сеанса управления космическим аппаратом.

Предложена модель, имитирующая указанный процесс, построенная на основе использования новой модификации стохастических временных сетей Петри.

Во время тренажа модель позволяет отображать и оперативно корректировать ход выполнения технологических операций по выдаче КПИ в ходе сеанса управления КА, в том числе в ручном режиме, учитывать текущее состояние технических средств, готовность к работам персонала, влияние возможных внешних возмущающих воздействий.

Дальнейшее совершенствование разработанной модели – тренажера видится в более наглядном отображении технических характеристик конкретных типов КИС и КА.

Литература

1. Системный анализ и организация автоматизированного управления космическими аппаратами: курс лекций / А.Н. Павлов, А.Н. Кудряшов, Ю.С. Мануйлов, С.А. Осипенко. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2013. 237 с.
2. Управление космическими аппаратами и средствами наземного комплекса: учебник / под общей редакцией Ю.С. Мануйлова. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2010. 609 с.
3. **Кудряшов А.Н.** Методика экспертного оценивания возможностей наземных средств по обеспечению целевого применения космических аппаратов при использовании региональных центров управления полетами // Региональная информатика и информационная безопасность. Сборник трудов. Выпуск 8 / Материалы Санкт-Петербургской международной конференции «Региональная информатика». СПб.: СПОЙСУ, 2020. С.37-40.
4. **Резников Б.А.** Системный анализ и методы системотехники. Часть 1. Методология системных исследований. Моделирование сложных систем: учебник. – МО РФ, 2006. 526 с.
5. Обоснование состава инструментария разработки программных средств моделирования космических систем / А.В. Колесник, М.Ю. Ортиков, А.В. Чарушников // Труды военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2020. – Вып. 675. С.53-61.
6. **Решмин Б.И.** Имитационное моделирование и системы управления. Вологда: Инфра-Инженерия, 2016. 74 с.
7. **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.
8. **Hennies T., Reggelin T., Tolujew J., Piccut P.** Mesoscopic supply chain simulation. – A.: Journal of Computational Science, 2013. P. 106-114.