

# Анализ целевых возможностей наземного комплекса управления космическими аппаратами на основе сетей Петри и экспертного оценивания

к. воен. н. А. Н. Кудряшов

Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского  
Санкт-Петербург, Россия,  
kudrspb@mail.ru

**Аннотация.** Разработан алгоритм, включающий следующие действия. Проводится анализ структур наземного комплекса и построение графа его технологической структуры. Далее моделируется выполнение выбранных технологических операций. Построенная имитационная модель позволяет учитывать влияние возможных воздействий на элементы наземного комплекса и оценивать полноту выполнения операций. Для более детального анализа достигнутой степени выполнения операций предлагается использовать экспертные оценки, сформулированные вербально. Выполняется переход от лингвистической шкалы к количественной шкале с использованием нечетких чисел. Полученные данные о целевых возможностях комплекса в заданной ситуации сводятся в единую таблицу. Такие таблицы могут послужить основой для принятия обоснованных решений по применению наземных средств управления космическими аппаратами, а освоение данного алгоритма может быть полезным при подготовке соответствующих специалистов.

**Ключевые слова:** космический аппарат, наземный комплекс управления, технологическая операция, имитационная модель, показатели возможностей, экспертная оценка, нечеткое число.

## ВВЕДЕНИЕ

Необходимость анализа целевых возможностей (ЦВ) наземного комплекса управления космическими аппаратами (НКУ КА) не вызывает сомнений. В реальной практике управления КА результаты такого анализа могут послужить основой для принятия обоснованных решений по перепланированию применения средств НКУ, изменению программ сеансов управления КА в конкретной сложившейся ситуации.

Кроме того, освоение разработанного алгоритма может быть полезным при обучении операторов НКУ. Целесообразность использования алгоритма при проведении занятий (тренировок) заключается в повышении эффективности обучения за счет приобретения навыков выполнения операций управления КА как в штатном режиме, так и при введении любых мыслимых и немыслимых нештатных ситуаций.

А с экономической стороны это выгодно потому, что в процессе обучения не требуется использования разнородной реальной техники и многочисленного персонала, достаточно одного персонального компьютера. К тому же все отказы, нештатные ситуации, введенные преподавателем (инструктором) или возникшие из-за ошибок, совершенных самим обучаемым, будут условными, виртуаль-

ными, не наносящими вреда реальной технике (КА и средствам НКУ).

В статье для наглядности сделан акцент на рассмотрение функционирования НКУ КА определенного класса, а именно КА наблюдения (мониторинга, дистанционного зондирования Земли). Тем не менее, представляемый алгоритм без принципиальных доработок может быть использован для анализа целевых возможностей НКУ КА других типов.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Алгоритм (от имени арабского математика Аль-Хорезми) — конечная совокупность точно заданных правил решения произвольного класса задач или набор инструкций, описывающих порядок (последовательность) действий для решения некоторой задачи [1]. В результате проведенных исследований определилась необходимая последовательность (алгоритм) следующих шести действий по оцениванию целевых возможностей НКУ КА наблюдения.

## АНАЛИЗ СТРУКТУР НКУ

НКУ КА представляет собой многоуровневую иерархическую организационно-техническую систему управления, отличающуюся сложностью структурного построения, включающего структуры: функциональную, технологическую, техническую, топологическую, организационную, структуру программно-математического и информационного обеспечения (ПМИО) [2].

Функциональная структура — совокупность конкретных целей, функций и задач НКУ, а также концептуальных отношений между ними, определяющих взаимосвязи функций и задач, необходимых для достижения целей, стоящих перед НКУ.

Технологическая структура НКУ — совокупность выполняемых в процессе управления технологических операций, направленных на решение задач, стоящих перед системой, и логико-временных связей между ними.

Техническая структура НКУ — комплекс технических средств и каналов связи между ними, необходимых для реализации соответствующих технологических операций.

Топологическая структура — совокупность территориально (пространственно) распределенных узлов (районов) дислокации или расположения отдельных элементов и подсистем НКУ и взаимосвязей между ними.

Организационная структура — совокупность смен и расчетов, выполняющих технологические операции на технических средствах НКУ, и находящихся в субординационных или координационных связях между собой.

Структура ПМИО НКУ — совокупность наборов информационных данных, знаний о заданной предметной области, моделей, методов, алгоритмов и программ для ЭВМ, необходимых для автоматизированного решения задач, определяемых технологической структурой.

Указанные структуры тесно взаимосвязаны. Анализ выполнения расчетами центров управления полетами (ЦУП) и отдельных командно-измерительных комплексов (ОКИК) технологических операций подготовки и проведения сеансов управления КА наблюдения с применением технических средств НКУ показал следующее.

Объединяющими (интегрирующими) являются технологическая и топологическая структуры. И действительно, функциональная структура детализируется в технологической, а элементы технической и организационной структур пространственно (топологически) совмещены для выполнения технологических операций. Элементы же структуры ПМИО вообще строго привязаны к элементам структуры технических, в первую очередь вычислительных, средств НКУ. Следовательно, представленная в виде графа, вершины которого интерпретируются как технологические операции, выполняемые соответствующими расчетами с использованием аппаратно-программных средств, технологическая структура НКУ в полной мере отражает процесс его функционирования.

Процесс функционирования НКУ, то есть процесс управления КА, включает в себя две составляющие:

– выдача управляющих воздействий на КА (выдача на КА и исполнение на его борту командно-программной информации (КПИ);

– прием, обработка, анализ информации о состоянии КА (информация обратного канала (оперативного контроля) (ИОК), телеметрическая информация (ТМИ), измерения текущих навигационных параметров (ИТНП)). Соответственно, разрабатываемая имитационная модель также будет состоять из двух частей.

Перейдем к рассмотрению первой части — моделированию процесса выдачи и реализации КПИ, а именно: разовых команд (РК), исполняемых непосредственно в зоне радиовидимости наземных средств, и рабочих программ (РП), представляющих из себя исходные числовые массивы для работы бортовых цифровых вычислительных машин (БЦВМ) вне зон радиовидимости.

Исходя из проведенного анализа работы расчетов, функционирования средств НКУ и бортовой аппаратуры, для формирования имитационной модели представим моделируемый процесс в графическом виде (рис. 1).

На рисунке цифрами обозначены следующие операции:

1. Ввод КПИ в комплекс средств автоматизации (КСА) ЦУП.
2. Передача КПИ на командно-измерительную систему (КИС)
3. Выдача РК на КА.

4. Передача РК из бортового приемника (БПРМ) в систему трансляции команд (СТК).

5. Выдача команды из СТК на исполнительные органы (ИО).

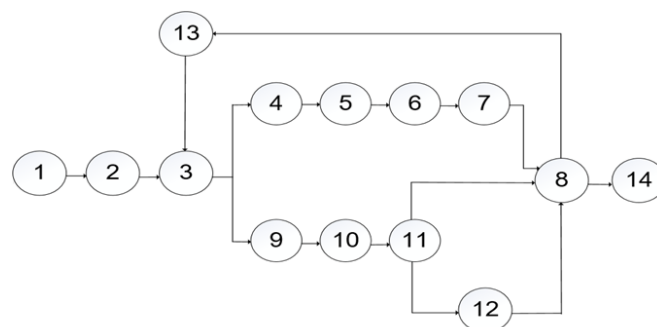


Рис. 1. Технологическая структура процесса выдачи на КА и исполнения на его борту КПИ

6. Передача от ИО в СТК сигнала об исполнении команды.

7. Выдача из СТК в передатчик (БПРД) квитанции на РК.

8. Выдача квитанций на РК, РП, ИОК из БПРД на КИС.

9. Выдача КИС рабочих программ на КА.

10. Передача массивов рабочих программ через БПРМ в бортовую цифровую вычислительную машину (БЦВМ).

11. Выдача из БЦВМ квитанций о получении РП.

12. Формирование и выдача из БЦВМ массива ИОК.

13. Повтор, отмена или изменение РК (РП).

14. Окончание сеанса.

Данная технологическая структура отображает процесс передачи сформированной КПИ на КА и исполнения этих команд на его борту в статическом виде. Для рассмотрения этого процесса в динамике и предлагается построение имитационной модели.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ НА ЭЛЕМЕНТАХ СТРУКТУРЫ НКУ С ПОМОЩЬЮ СЕТЕЙ ПЕТРИ

Одним из видов имитационных моделей являются так называемые сети Петри (СП), причинно-следственные модели параллельных действий [3–5]. Именно такую модель предлагается использовать для моделирования функционирования НКУ. При построении этой модели ее переходы и позиции интерпретировались следующим образом. Переходы — это операции технологического цикла управления (ТЦУ), а наличие маркеров во входных позициях — условия для их выполнения [6].

Множество позиций  $P$  предлагается разбить на три подмножества:

- $P_1$  — логические позиции, отображающие технологическую последовательность выполнения операций;
- $P_2$  — «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 ТЦУ.
- $P_3$  — контрольные позиции, количество маркеров в которых отражает степень выполнения ТЦУ (позиции отображения ситуации).

Введение позиций нескольких видов, особенно применение термина «управляющая позиция» предполагает использование формализмов так называемых Е-сетей [7, 8]. Однако, по мнению автора, использование сетей Петри в классическом виде для поставленных задач представляется более удобным.

Для этого сопоставим каждой технологической операции (см. рис. 1) переход СП, а связи, отражающие логическую последовательность операций, отобразим, связав соответствующие логические позиции. Результат этих действий показан на рисунке 2.

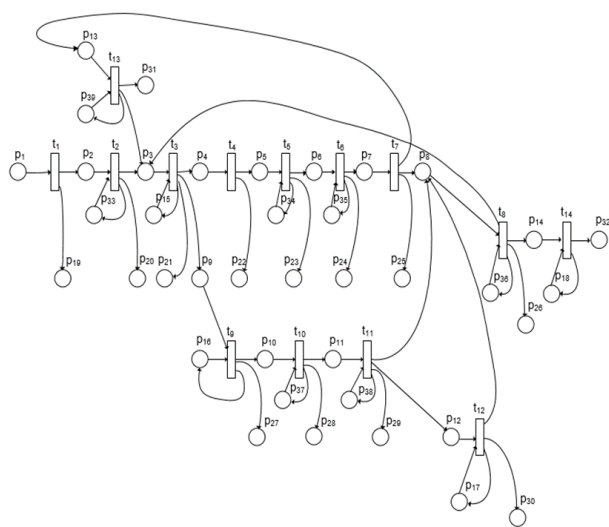


Рис. 2. Графическое представление 1-го фрагмента СП

Итак, интерпретация 14 переходов СП — это 14 технологических операций, представленных выше. Интерпретация наличия или отсутствия маркеров в позициях приведена ниже в таблице 1.

Таблица 1

Интерпретация маркировки СП в имитационной модели

Номер позиции	Интерпретация наличия (отсутствия) маркера
1	КПИ сформирована и введена в КСА ЦУП
2-14	Создание условия для выполнения следующей технологической операции
15	Возможна и разрешена выдача очередной разовой команды (РК)
16	Возможна и разрешена выдача рабочей программы (РП)
17	Возможна и разрешена выдача команды на съем информации оперативного контроля (ИОК)
18	Возможна и разрешена выдача команды на окончание сеанса
19	Отображение программы сеанса
20 и далее до 32	Накопление информации о выполнении технологических операций (контрольные позиции)
33	Выход из строя штатного канала ЦУП-ОКИК
34	Не проходит сигнал СТК-ИО
35	Неисправность конкретного ИО КА
36	Отсутствие квитанций на РК (РП)
37	Не проходит загрузка БЦВМ массивами РП
38	Отсутствие квитанций на отработку РП

При введении в «возмущаемые» позиции (№№ 15–18, 33–38) подмаркировки, отражающей конкретную ситуацию, появляется возможность по контрольной подмаркировке (позиции №№ 19–32) фиксировать ход процесса функционирования НКУ при выдаче и реализации КПИ, то есть определять текущую степень выполнения ТЦУ.

Аналогично построен второй фрагмент СП, моделирующий процессы сбора, обработки и анализа информации о состоянии КА (ТМИ, ТВИ, ИТНП) [6].

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ВЫПОЛНЕНИЯ ТЦУ

«Выходом» построенной имитационной модели функционирования НКУ являются вектора контрольной подмаркировки

$$\mu_1 = (m(p_{20}), m(p_{21}), \dots, m(p_{32}))$$

для первого фрагмента модели, отображающего выдачу и реализацию КПИ, и

$$\mu_2 = (m(p_{31}), m(p_{32}), \dots, m(p_{43}))$$

для второго фрагмента, моделирующего сбор и обработку ТМИ.

Каждый элемент этих векторов — количество маркеров в соответствующей позиции после проведения имитационного эксперимента, состоящего в запуске сети Петри с введенными возмущающими воздействиями. Сопоставление количества маркеров в контрольной подмаркировке количеству потенциально выполнимых технологических операций проведем по таблице следующего вида.

Таблица 2

Результаты экспериментов на сети Петри

Результат выполнения операции	Требуемое по ТЦУ количество	Фактическое количество
РП передана на ОКИК	2	1
РП выдана на КА	2	1
ТМ записана на ОКИК	5	5
ТМ обработана в ТМЦ	5	4
ТМ выдана в ЦУП	5	4
ИОК записана на ОКИК	2	2
Проведены ИТНП	5	4
...	...	...

При необходимости операции ТЦУ могут быть представлены более детально. Операция ИТНП добавлена в таблицу из тех соображений, что, если КИС способна выдавать РК и получать на них квитанции, значит, она способна измерять, по крайней мере, радиальную скорость движения КА.

Целью функционирования НКУ является строгое выполнение заданного ТЦУ КА. А ТЦУ КА наблюдения сформирован для полного обеспечения решения КА его целевой задачи — сбора информации об объектах наблюдения. Следовательно, основным показателем целевых возможностей НКУ является степень выполнения им операций этого технологического цикла, соотношенная с полнотой обеспечения решения целевой задачи КА. Данные имитационных экспериментов, приведенные в таблице 2, дают представление о потенциально достижимой степени выполнения ТЦУ. В том случае, когда цифры в столбцах таблицы совпадают, оценивание возможностей НКУ мож-

но считать законченным — ТЦУ КА будет выполнен полностью. Как показал анализ, при той избыточности, которая заложена в совокупности развернутых для каждого типа КА наземных комплексов управления, требуемые объемы технологических операций могут быть обеспечены с многократным резервированием. Необходимость более детального анализа целевых возможностей НКУ возникает при существенном сокращении числа привлекаемых ОКИК, увеличении числа обслуживаемых КА, выходе из строя ключевых технических средств, каналов связи, «обвальных» отказах программного обеспечения, вынужденном переходе к сокращенным, а то и одно-пунктным технологиям управления и т. д.

Для такого более детального анализа целевых возможностей НКУ предлагается привлечение явных и неявных экспертных знаний.

#### ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЭКСПЕРТНЫХ МНЕНИЙ О СТЕПЕНИ ВЫПОЛНЕНИЯ ТЦУ ТЕРМАМИ ЛИНГВИСТИЧЕСКОЙ ПЕРЕМЕННОЙ

Выполнение технологической операции каждого типа преследует конкретную цель, достижение которой обеспечивает целевое применение КА наблюдения. Так, для операций выдачи КПИ основная цель — закладка РП, содержащей задание для бортового специального комплекса по объектам наблюдения. Для операций съема и обработки ТМИ это оценка способности бортовых систем КА выполнять и обеспечивать выполнение задач по его предназначению. Для операций ИТНП и последующей их обработки — определение параметров орбиты КА и его места на ней с той степенью точности, которая позволит использовать координатно-временной метод управления целевой аппаратурой. Для оценки степени достижения указанных целей по каждому типу операции предлагается привлечь экспертов, причем специализирующихся в соответствующих предметных областях.

При использовании экспертных знаний для оценивания состояния сложных объектов существует довольно жесткое ограничение: «Эксперт может при сравнении двух объектов, сказать, какой из двух лучше (метод парных сравнений), дать им оценки типа «хороший», «приемлемый», «плохой», упорядочить несколько объектов по привлекательности, но обычно не может ответить, во сколько раз или на сколько процентов один объект лучше другого». Однако широко распространен подход, когда ответы экспертов стараются рассматривать как числа, производят произвольную обработку их мнений, приписывая этим мнениям численные значения — баллы, коэффициенты, которые потом обрабатывают как результаты обычных физико-технических измерений. Выводы, полученные в результате обработки такой «оцифровки», могут не иметь отношения к реальности [9].

Возможность избежать подобных ошибок появляется в случае применения процедуры «арифметизации» вербальной экспертной информации. Это технология извлечения экспертных знаний, позволяющая общаться с экспертом на привычном для него профессиональном языке, побуждает его мыслить системно, обладает возможностью формализовать полученную информацию.

Процедура начинается с извлечения и представления экспертных знаний значениями (термами) лингвистиче-

ской переменной. Эти значения получают в ходе опроса экспертов. Они представляют собой ряд вербальных суждений от «невыполнимо» до «полное выполнение» для каждой технологической операции (цикла операций) управления КА.

#### ПРИМЕНЕНИЕ ПРОЦЕДУРЫ «АРИФМЕТИЗАЦИИ» ВЕРБАЛЬНОЙ ЭКСПЕРТНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Переход от лингвистической к количественной шкале (процентам) осуществляется с использованием специальной системы координат (рис. 3), на оси абсцисс которой задаются лингвистические значения переменной  $\gamma$  (верхняя шкала от «Невыполнимо» до «Полное выполнение») и количественные значения показателя целевых возможностей НКУ  $x$  (шкала от 0 до 100). По оси ординат расположена функция принадлежности  $\mu(x) = [0,1]$  как мера степени уверенности («правильности») перевода из одной шкалы в другую. На рисунке приведены наименования термов (ранжированный ряд вербальных значений лингвистической переменной  $\gamma$ ). Им поставлены в соответствие числовые значения мод этих термов, а также коэффициенты нечеткости слева  $\alpha$  и справа  $\beta$  для всех термов (по названию мод).

Так, например, значению  $x_i$  на оси ординат соответствуют два значения функции принадлежности:  $\alpha$  и  $\beta$ . Поскольку  $\beta > \alpha$ , то явно предпочтительнее отнести значение  $x_i$  к моде «Ниже среднего». При попадании  $x_i$  в зону, где значения  $\mu(x)$  около 0,5, в указанной ситуации нельзя отдать предпочтение какой-либо из мод данного интервала, поэтому значение лингвистической переменной примет вид: между «Ниже среднего» и «Среднее».

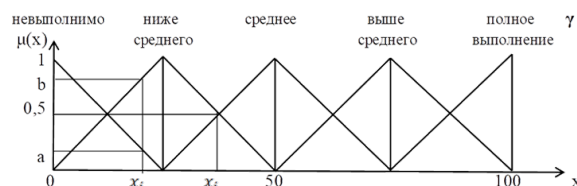


Рис. 3. Соотношение лингвистической  $\gamma$  и количественной  $x$  переменных

Для использования эксперта как интеллектуальной информационно-измерительной системы, по положениям теории планирования эксперимента [10], ему должны быть предоставлены значения признаков факторного пространства, описывающих рассматриваемое состояние НКУ. В качестве таковых используем данные из приведенной выше таблицы 2.

После определения экспертом по этой таблице значений лингвистической переменной  $\gamma$  и выполнения преобразований перевода этих значений в количественную шкалу (рис. 1), значения частных показателей целевых возможностей НКУ по выполнению циклов технологических операций могут быть представлены в виде нечетких унимодальных (L, R)-чисел следующего вида:

$$A_i = (a_i, \alpha_i, \beta_i),$$

где:  $a_i$  — значение (мода) нечеткого числа,  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  — левый и правый коэффициенты нечеткости (величины максимальных отклонений значения нечеткого числа),  $i = \{1, 2, 3\}$  — индекс, определяющий тип цикла опера-



ций (КПИ, ИТНП, ТМИ соответственно). Функции принадлежности количественной переменной  $x_i$  (процент выполнения  $i$ -го цикла операций) имеют вид:

$$\mu(x_i) = L(x_i) = 1 - \frac{(a_i - x_i)}{a_i}, \text{ если } a_i > x_i,$$

$$\mu(x_i) = R(x_i) = 1 - \frac{(x_i - a_i)}{\beta_i}, \text{ если } a_i < x_i.$$

Далее казалось бы целесообразным построение интегрального показателя целевых возможностей НКУ. Тем более что такое построение возможно — с помощью мультипликативной или аддитивной, а то и полиномиальной [9, 10] свертки частных показателей с использованием специальных правил арифметических операций над нечеткими числами (L, R)-типа. Однако в таком интегральном показателе теряется физический смысл, наглядность отображения полноты выполнения ТЦУ. Более приемлемым представляется применение лексикографического упорядочения показателей: КПИ → ИТНП → ТМИ (исходя из значимости целей выполнения данных циклов опе-

раций (см. выше)), и сведение всех данных в общую таблицу, так называемую «опросную матрицу».

#### ЗАПОЛНЕНИЕ ОПРОСНОЙ МАТРИЦЫ ОЦЕНКИ ЦЕЛЕВЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ НКУ ДЛЯ ЗАДАННОЙ СИТУАЦИИ

Согласно технологиям теории планирования эксперимента [3, 10] именно такие матрицы и должны заполняться экспертами. В таблице 3 приведен фрагмент опросной матрицы с ответами экспертов о значениях (модах) частного показателя в лингвистическом и оцифрованном видах. В нем указаны интервалы количественной шкалы, соответствующие значениям лингвистической переменной  $\gamma$ . Их границы определяются значениями предельных отклонений от мод значений  $i$ -го частного показателя (коэффициенты нечеткости  $\alpha_i$  и  $\beta_i$ ). В таблицу 3 также включены степени уверенности в правильности оцифровки  $\mu(x_i)$  и характеристики степени выполнения ТЦУ по типам операций (расшифровки значений  $\gamma$ ).

Таблица 3

Оценка целевых возможностей НКУ для заданной ситуации (опросная матрица)

Цикл (i)	Достижение цели цикла (мода переменной $\gamma$ )	Интервал (терм) шкалы $x$ (%)	Мода терм-шкалы $x$ (%)	Значение показателя $x_i$ (%)	Степень уверенности эксперта $\mu(x_i)$	Характеристика степени выполнения цикла операций обеспечения целевого применения КА (расшифровка значений переменной $\gamma$ )
КПИ (1)	«среднее»	25–75	50	50	1,00	Задание по объектам наблюдения может быть выполнено, однако его коррекция в текущих полетных сутках невозможна.
ИТНП (2)	«выше среднего»	50–100	75	80	0,75	ИТНП достаточно для применения координатно-временного метода управления целевой аппаратурой КА.
ТМИ (3)	«выше среднего»	50–100	75	80	0,75	ТМИ достаточно для оценки способности бортовых систем обеспечить решение целевых задач КА.

Значений  $\gamma$  всего пять, соответственно и пять интервалов количественной шкалы  $x$ . Типов циклов три. Следовательно, все многообразие ситуаций, все множество признаков факторного пространства состояний НКУ с точки зрения выполнения его целевых задач может быть сведено к трем (из возможных пятнадцати) строкам опросной матрицы. Представляется целесообразным заблаговременное формулирование вербальных характеристик значений  $\gamma$  для каждого интервала и каждого типа циклов технологических операций. Создание таких предварительных таблиц-заготовок опросных матриц позволит существенно повысить оперативность оценивания целевых возможностей НКУ в конкретной ситуации.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный алгоритм без принципиальных доработок может быть использован для анализа целевых возможностей НКУ КА различных типов. Использование получаемых в ходе экспертного оценивания таблиц данных о целевых возможностях НКУ КА в условиях влияния возмущающих воздействий, в конкретной ситуации, несомненно, будет способствовать повышению адекватности и обоснованности принимаемых управленческих решений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кобельков Г. М. Алгоритм вычислительный // Большая российская энциклопедия — электронная версия. URL: <http://bigenc.ru/mathematics/text/1810319> (дата обращения 03.07.2020).
2. Системный анализ и организация автоматизированного управления космическими аппаратами: Курс лекций / А. Н. Павлов, А. Н. Кудряшов, Ю. С. Мануйлов, С. А. Осипенко. — СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2013. — 237 с.
3. Военная системотехника и системный анализ: Учебник / А. Н. Павлов, Б. В. Соколов, Б. В. Москвин, Д. Н. Верзилин; под общ. ред. А. Н. Павлова. — СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2010. — 251 с.
4. Mesoscopic supply chain simulation / T. Hennies, T. Reggelin, J. Tolujew, P.-A. Piccut // Journal of Computational Science. 2014. Vol. 5, Is. 3. Pp. 463–470. DOI: 10.1016/j.jocs.2013.08.004.
5. Agent-Based Models of Geographical Systems / A. J. Heppenstall, et al. (eds). — Dordrecht: Springer, 2012. — 768 p.
6. Кудряшов А. Н. Имитационная модель проведения средствами отдельного командно-измерительного ком-

плекса сеансов управления космическими аппаратами / А. Н. Кудряшов, И. А. Кобылин // Сб. тезисов III Всероссийской научно-технической конференции «Теоретические и прикладные проблемы развития и совершенствования автоматизированных систем управления военного назначения» (Санкт-Петербург, 22 ноября 2017 г.). — СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2017. С. 33–34.

7. Решмин Б. И. Имитационное моделирование и системы управления: Учебно-практическое пособие. — Вологда: Инфра-Инженерия, 2016. — 74 с.

8. Акопов А. С. Имитационное моделирование: Учебник и практикум для академического бакалавриата. — М.: Издательство Юрайт, 2017. — 389 с. — (Бакалавр. Академический курс).

9. Спесивцев А. В. Мягкие измерения и мягкие вычисления при моделировании состояния сложных объектов на базе экспертных знаний // Управление в условиях неопределенности: Монография / Под общ. ред. проф. С. В. Прокопчиной. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. — С.217–263.

10. Павлов А. Н. Методика построения псевдоуниверсальных сверток лингвистических показателей на основе теории планирования эксперимента // Сборник докладов XII Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM`2008), (Санкт-Петербург, 23–25 июня 2008 г.). — СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2008. — Т. 1. — С. 169–172.

# Analysis of the Target Capabilities of the Ground-Based Spacecraft Control System Based on Petri Nets and Expert Evaluation

PhD in Military Science A. N. Kudryashov  
A. F. Mozhaitsky Military Space Academy  
Saint Petersburg, Russia  
kudrspb@mail.ru

**Abstract.** An algorithm has been developed that includes the following actions. The analysis of the structures of the ground complex and the construction of a graph of its technological structure are carried out. Next, the execution of selected technological operations is simulated. The constructed simulation model allows us to take into account the influence of possible impacts on the elements of the ground complex and evaluate the completeness of operations. Expert assessments formulated verbally are proposed for a more detailed analysis of the degree of operation. Next, the transition from linguistic to quantitative scale using fuzzy numbers. The obtained data on the target capabilities of the complex in a given situation are summarized in a single table. Such tables can serve as the basis for making informed decisions on the use of ground-based spacecraft controls, and mastering this algorithm can be useful in preparing the appropriate specialists.

**Keywords:** spacecraft, ground control complex, technological operation, simulation model, capability indicators, expert judgment, fuzzy number

## REFERENCES

1. Kobelkov G. M. Computational Algorithm [Algoritm vychislitel'nyy], *Great Russian Encyclopedia — Electronic Version* [Bol'shaya Rossiyskaya entsiklopediya — elektronnyaya versiya]. Available at: <http://bigenc.ru/mathematics/text/1810319> (accessed 03 July 2020).
2. Pavlov A. N., Kudryashov A. N., Manuylov Yu. S., Osipenko S. A. System analysis and organization of automated control of spacecraft: A course of lectures [Sistemnyy analiz i organizatsiya avtomatizirovannogo upravleniya kosmicheskimi apparatami: Kurs lektsiy], Saint Petersburg, A. F. Mozhaitsky Military Space Academy, 2013, 237 p.
3. Pavlov A. N., Sokolov B. V., Moskvina B. V., Verzilin D. N. Military system engineering and system analysis: Textbook [Voennaya sistemotekhnika i sistemnyy analiz: Uchebnik], Saint Petersburg, A. F. Mozhaitsky Military Space Academy, 2010, 251 p.
4. Hennies T., Reggelen T., Tolujew J., Piccut P.-A. Mesoscopic supply chain simulation, *Journal of Computational Science*, 2014, Vol. 5, Is. 3, Pp. 463–470. DOI: 10.1016/j.jocs.2013.08.004.
5. Heppenstall A. J., et al. (eds) Agent-Based Models of Geographical Systems. Dordrecht, Springer, 2012, 768 p.
6. Kudryashov A. N., Kobylin I. A. Simulation Model of Conducting Space Vehicle Control Sessions by Means of a Separate Command and Measurement Complex [Imitatsionnaya model' provedeniya sredstvami otdel'nogo komandno-izmeritel'nogo kompleksa seansov upravleniya kosmicheskimi apparatami], *Collection of theses III All-Russian Scientific and Technical Conference «Theoretical and applied problems of development and improvement of automated control systems for military purposes»* [Sbornik tezisov III Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Teoreticheskie i prikladnye problemy razvitiya i sovershenstvovaniya avtomatizirovannykh sistem upravleniya voennogo naznacheniya»], Saint Petersburg, November 22, 2017, Saint Petersburg, A. F. Mozhaitsky Military Space Academy, 2017, Pp. 33–34.
7. Reshmin B. I. Simulation modeling and control systems: Educational and practical guide [Imitatsionnoe modelirovaniye i sistemy upravleniya: Uchebno-prakticheskoe posobie], Volgograd, Infraengineering, 2016, 74 p.
8. Akopov A. S. Simulation modeling [Imitatsionnoe modelirovaniye], Moscow, URAIT Publishing House, 2017, 389 p.
9. Spesivtsev A. V. Soft Measurements and Soft Calculations for Modeling the State of Complex Objects Based on Expert Knowledge [Myagkie izmereniya i myagkie vychisleniya pri modelirovanii sostoyaniya slozhnykh ob"ektov na baze ekspertnykh znaniy], In: *Management in conditions of uncertainty: Monography* [Upravlenie v usloviyakh neopredelennosti: Monografiya], Saint Petersburg, St. Petersburg Electrotechnical University «LETI», 2014, P. 217–263.
10. Pavlov A. N. Method of Constructing Pseudo-Universal Convolutions of Linguistic Indicators Based on the Theory of Experiment Planning [Metodika postroyeniya psevdouniversal'nykh svertoch lingvisticheskikh pokazateley na osnove teorii planirovaniya eksperimenta], *Proceedings of XII International Conference on Soft Computing and Measurement* [Sbornik dokladov XII Mezhdunarodnoy konferentsii po myagkim vychisleniyam i izmereniyam] (SCM'2008), Saint Petersburg, June 23–25, 2008, Saint Petersburg, St. Petersburg Electrotechnical University «LETI», 2008, Vol. 1, Pp. 169–172.