

УДК 629.78:004.94

ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНАЯ ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ВНЕКОРАБЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ КОСМОНАВТОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ

В.А. Ерохин, О.Д. Пушкарь

В.А. Ерохин; канд. техн. наук О.Д. Пушкарь
(АО «ЦНИИмаш»)

Рассмотрена задача формирования циклограммы внекорабельной деятельности (ВКД) космонавтов на поверхности Луны с применением имитационного моделирования. Дискретно-событийная имитационная модель ВКД создана на основе цветной стохастической сети Петри с использованием моделирующей системы CPN Tools. Параметры модели, в том числе математическое ожидание времени выполнения операций ВКД, задаются с учетом результатов экспериментальных исследований на наземных комплексах натурального моделирования. Приведены результаты статистического анализа численных экспериментов с имитационной моделью по оценке времени выполнения гипотетической циклограммы ВКД.

Ключевые слова: внекорабельная деятельность, циклограмма, имитационная модель, сеть Петри, статистический анализ

Discrete-Event Simulation Model of Human Extravehicular Activity on the Lunar Surface. V.A. Erokhin, O.D. Pushkar

The paper considers the task of creating a cyclogram for Extravehicular Activity (EVA) of cosmonauts on the lunar surface using simulation modeling. Discrete-event simulation model of EVA was created on the basis of the stochastic coloured Petri net (CPN) using CPN Tools modeling system. The model parameters including the mathematical expectation concerning the time of performing EVA are set taking into account the results of experimental studies on ground-based full-scale simulation complexes. The results of statistical analysis of statistical analysis of numerical experiments with a simulation model for estimating the time of the performance of the EVA hypothetical cyclogram are given.

Keywords: extravehicular activity, cyclogram, simulation model, coloured Petri net, statistical analysis

Методы и средства моделирования процесса внекорабельной деятельности.

Постановка задачи

Внекорабельная деятельность (ВКД) – работа космонавтов за пределами герметичных отсеков в процессе космического полета на поверхности Луны или другого небесного тела. ВКД является одним из наиболее сложных видов профессиональной деятельности космонавтов.

Для отработки оборудования, применяемого в процессе ВКД, формирования циклограмм внекорабельной деятельности – детальных планов работы космонавтов от открытия до закрытия выходного люка шлюзового отсека, подготовки космонавтов к выполнению программы ВКД применяется комплекс средств с использованием различных методов натурального (физического) и математического моделирования.

К физическим средствам моделирования относятся самолеты-лаборатории [1], которые позволяют воспроизводить в процессе параболических полетов перегрузки, соответствующие гравитационным условиям космического полета и напланетной (налунной) деятельности, гидролаборатории [2], стенды электромеханического обезвешивания [3].

Все большую роль в решении задачи повышения эффективности и безопасности ВКД играют средства, основанные на различных методах математического моделирования процесса ВКД [4–6].

Применение комплекса средств физического и математического моделирования процесса ВКД повышает достоверность результатов экспериментальной отработки циклограмм, оборудования и средств ВКД, обеспечивает формирование у космонавтов устойчивых навыков выполнения операций ВКД. Кроме того, использование в процессе тренировок космонавтов комплекса тренажеров, основанных на различных физических принципах, в сочетании со средствами математического моделирования создает в сознании человека-оператора адекватную концептуальную модель ВКД – совокупность знаний и представлений о рабочей среде, целях, средствах и способах внекорабельной деятельности [7], что имеет особое значение для космонавтов, не имеющих опыта выходов в открытый космос.

Одним из перспективных методов математического моделирования ВКД является метод имитационного моделирования – способ исследования реальной системы путем проведения численных экспериментов с ее компьютерной моделью, структура которой соответствует структуре моделируемой системы, а поведение модели во времени отображается с помощью образов реальных динамических объектов [8]. Решению задачи создания имитационной модели процесса ВКД для ее использования при формировании циклограммы ВКД космонавтов на поверхности Луны посвящена данная работа.

Имитационная модель ВКД на основе сети Петри

Имитационная модель внекорабельной деятельности космонавтов как дискретной стохастической системы разработана на основе сети Петри [9]. При создании модели применен дискретно-событийный подход, согласно которому рассмотрены основные состояния внекорабельной деятельности космонавтов и описана логика генерирования событий, приводящих в дискретные моменты времени к переходу динамических объектов – образов космонавтов из одного состояния в другое. Эффективность использования

формализма сетей Петри для создания имитационных моделей стохастических дискретно-событийных процессов показана в различных применениях, в том числе в работах [10–13].

Для определенности функционирование имитационной модели рассматривается на примере выполнения гипотетической ВКД, циклограмма которой в виде сети Петри представлена на рис. 1.

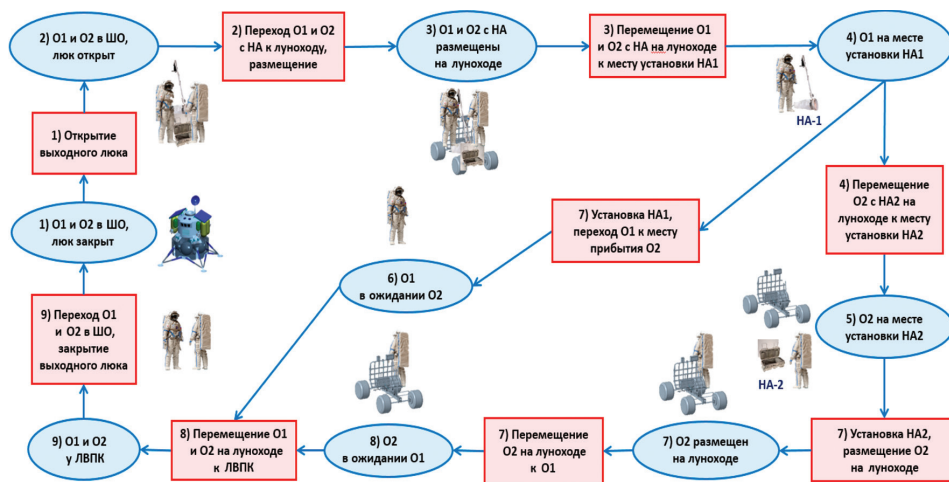


Рис. 1. Циклограмма ВКД в виде сети Петри

(ШО – шлюзовой отсек; ЛВПК – лунный взлетно-посадочный корабль;
НА – научная аппаратура; О – оператор)

Сеть Петри, реализующая модель ВКД, содержит девять состояний и девять переходов.

Состояния сети:

- 1) O1 и O2 – в ШО ЛВПК, выходной люк закрыт;
- 2) O1 и O2 – в ШО ЛВПК, выходной люк открыт;
- 3) O1, O2 и научная аппаратура размещены на луноходе;
- 4) O1 – на месте установки первого комплекта научной аппаратуры (НА1);
- 5) O2 – на месте установки второго комплекта научной аппаратуры (НА2);
- 6) O1 – на месте прибытия O2 на луноходе, ожидание (в случае необходимости);
- 7) O2 после установки НА2 размещен на луноходе;
- 8) O2 – на месте встречи с O1, ожидание (в случае необходимости);
- 9) O1 и O2 находятся рядом с ЛВПК перед входом в ШО.

Переходы сети:

- 1) открытие выходного люка шлюзового отсека ЛВПК;
- 2) переход O1 и O2 с научной аппаратурой (комплекты НА1 и НА2) к луноходу, размещение НА, O1 и O2 на луноходе;

- 3) перемещение O1 и O2 с НА на луноходе к месту установки НА1, выход O1 с НА1 из лунохода;
- 4) перемещение O2 с НА2 на луноходе к месту установки НА2, выход O2 с НА2 из лунохода;
- 5) установки НА2, размещение O2 после установки НА2 на луноходе;
- 6) перемещение O2 на луноходе к месту встречи с O1;
- 7) установка НА1, переход O1 после установки НА1 к месту прибытия O2 на луноходе, ожидание (в случае необходимости);
- 8) размещение O1 на луноходе, перемещение O1 и O2 на луноходе к ЛВПК;
- 9) переход O1 и O2 в ШО ЛВПК, закрытие выходного люка.

К числу исходных данных, необходимых для настройки параметров модели, относится информация о времени выполнения операций ВКД.

Реализация имитационной модели ВКД в системе CPN Tools

Созданная с использованием формализма сетей Петри дискретно-событийная стохастическая модель отряда космонавтов реализована в моделирующей системе CPN Tools [14], которая использует формализм цветных стохастических сетей Петри для имитационного моделирования дискретных процессов. Модели в системе CPN Tools создаются с помощью графического редактора и языка программирования CPN ML, описывающего атрибуты сети. Сеть модели, построенная в графическом редакторе CPN Tools, изображена на рис. 2.

Элементами составного множества («множества цветов» в терминологии сетей Петри) $\text{colset COS} = \text{product } N * M * \text{TEXP} * \text{TMED}$ timed являются главные динамические объекты модели – образы (маркеры) космонавтов. На компонентах множества COS определены соответственно переменные n , m , texp , tmed , из которых: n – идентификатор космонавта, texp – время выполнения циклограммы в текущем численном эксперименте, а переменные m и tmed будут использоваться после расширения функциональности модели. На рисунке два маркера, соответствующие операторам O1 и O2, размещены в позиции Base (исходное состояние при проведении численных экспериментов).

Элементами составного множества $\text{colset REPORT} = \text{product } \text{NEXP} * \text{COSM} * \text{TM} * \text{TTRAN} * \text{LAST}$ являются отчетные данные о каждой реализации численного эксперимента. На компонентах множества REPORT определены соответственно переменные nexp , tm , ttran , last , из которых: nexp – номер эксперимента, last – служебная переменная, ttran – суммарное время выполнения ВКД. В позиции Report размещен маркер-шаблон, обеспечивающий формирование маркера, содержащего информацию о первой реализации численного эксперимента.

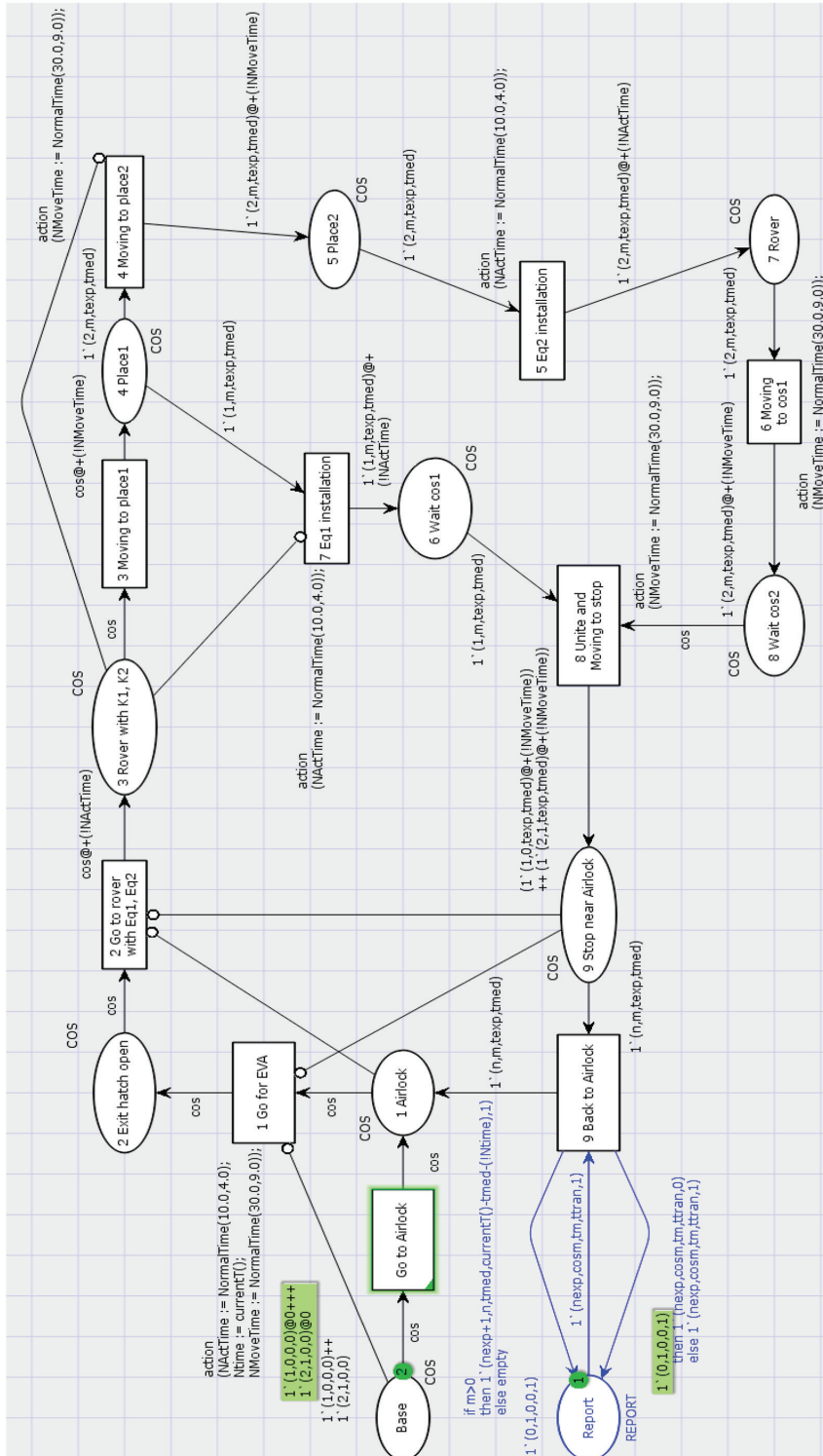


Рис. 2. Сеть модели ВКД в графическом редакторе CPN Tools

Переменная t_{med} , определенная на множестве COS, и переменная t_m , определенная на множестве REPORT, будут использоваться после расширения функциональности модели для имитационного моделирования нештатных ситуаций.

Ингибиторные (блокирующие) дуги в сети предназначены для синхронизации совместного перемещения космонавтов.

Случайные функции языка программирования CPN ML обеспечивают возможность моделирования случайных событий, таких как время выполнения отдельных операций ВКД. Так, функция $\text{fun NormalTime}(a:\text{real}, b:\text{real}) = \text{round}(\text{normal}(a,b))$ – случайная функция с нормальным законом распределения, генерирующая случайную величину со средним значением a , и дисперсией b .

Для генерирования значения времени выполнения операций ВКД используются переменные globref NActTime и globref NMoveTime , обновление которых происходит в сегменте кода переходов.

Численные эксперименты

С целью подтверждения работоспособности модели проведены численные эксперименты. Всего было проведено 100 реализаций процесса имитационного моделирования ВКД космонавтов, в результате которых были получены значения суммарной длительности ВКД, представленные на рис. 3. Дискретность модельного времени $\Delta t = 1$ мин.

Проведен статистический анализ результатов имитационного моделирования. Целью статистического исследования являлась проверка гипотезы о нормальном распределении случайных величин – суммарной длительности ВКД.

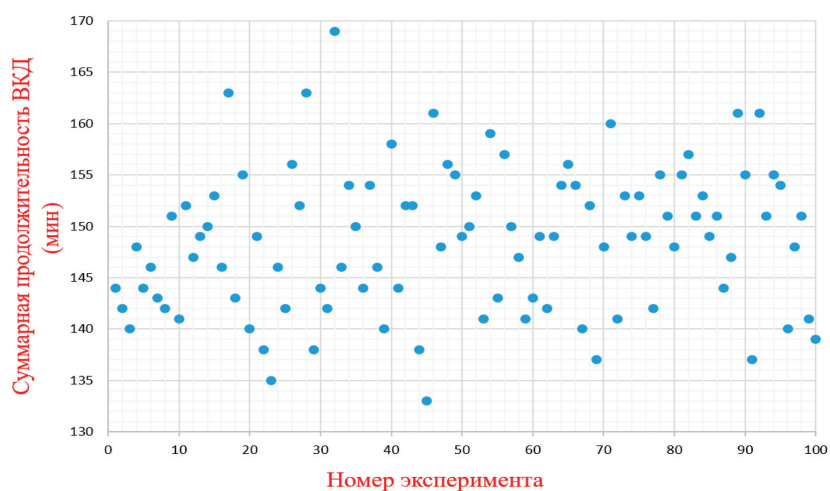


Рис. 3. Результаты численных экспериментов по определению времени выполнения циклограммы ВКД

Гистограмма частот случайной величины «суммарная длительность ВКД», построенная по результатам численного эксперимента с объемом выборки $n = 100$, представлена на рис. 4. На основе результатов работы имитационной модели можно сделать вывод о том, что наиболее вероятная длительность выполнения ВКД находится в интервале от 150 до 155 минут.

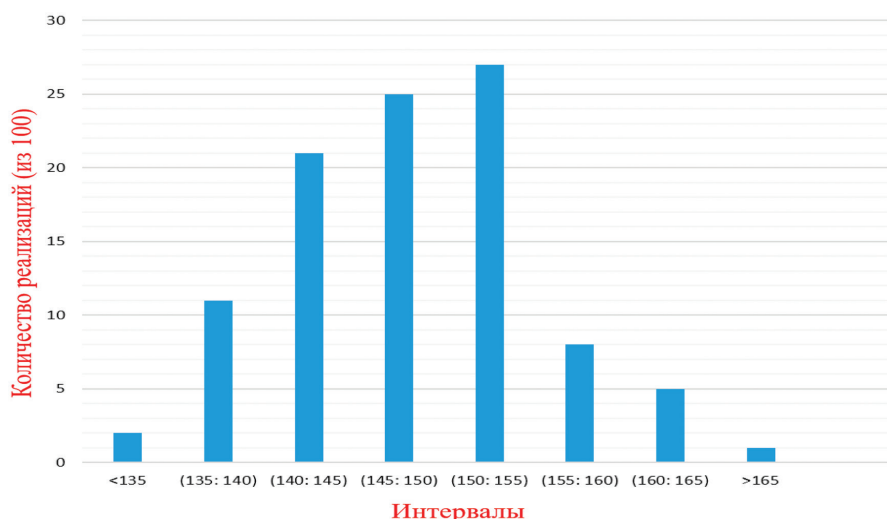


Рис. 4. Гистограмма частот случайной величины «суммарная длительность ВКД» (100 реализаций)

Проверка гипотезы о нормальном распределении выборки проведена при помощи модифицированного критерия согласия Пирсона [15] на уровне значимости $\alpha = 0,1$.

Принятое для данной выборки количество равновероятных интервалов разбиения совокупности выборочных данных $k = 8$; объем выборки $n = 100$; m_i – количество членов выборки, попавших в i -й интервал: $m_1 = 2$, $m_2 = 11$, $m_3 = 21$, $m_4 = 25$, $m_5 = 27$, $m_6 = 8$, $m_7 = 5$, $m_8 = 1$. Вычисленное значение критерия $\chi^2 = 11,489$ не превышает критическое значение статистики для $k = 8$ и $\alpha = 0,1$ (12,017), следовательно, гипотеза о нормальном распределении генеральной совокупности не отклоняется.

Построение графика проверки распределения на нормальность является графическим методом определения соответствия значений выборки нормальному распределению. График проверки распределения на нормальность представлен на рис. 5.

Как видно из графика, множество значений выборки распределено вдоль прямой линии, что также не отвергает гипотезу о нормальном распределении генеральной совокупности.

Знание вида распределения генеральной совокупности дает возможность уменьшить объем выборок при интервальной оценке ее параметров.

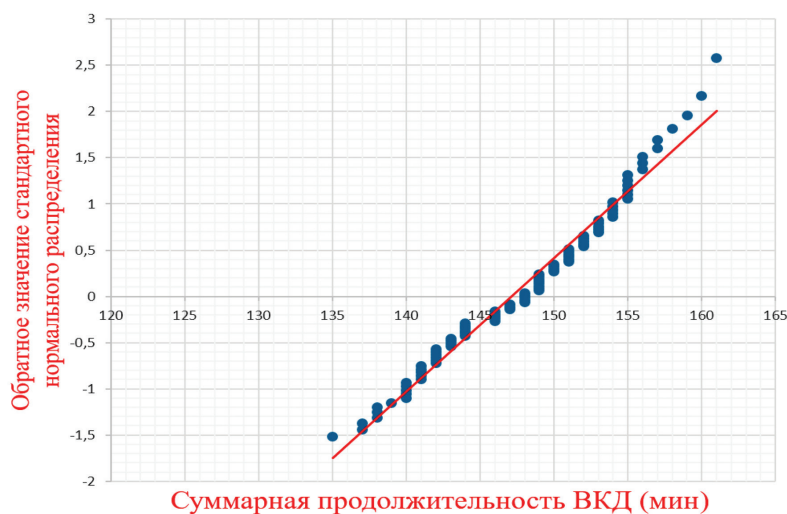


Рис. 5. График проверки распределения на нормальность

Выводы

Численные эксперименты с дискретно-событийной имитационной моделью ВКД на основе сетей Петри подтвердили ее работоспособность.

Разработанная имитационная модель может применяться для формирования циклограмм ВКД, а также для поддержки ВКД в режиме реального времени как со стороны центра управления полетом, так и автономными средствами пилотируемой экспедиции.

Кроме того, благодаря информативности и наглядности графического представления динамического процесса сетями Петри, предложенная имитационная модель ВКД может быть использована как дополнительное средство формирования у космонавтов концептуальной модели ВКД.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Найдёнов, Б.В. Использование самолетов-лабораторий для тренировок космонавтов, испытаний и экспериментальных исследований в условиях кратковременной невесомости / Б.В. Найдёнов, О.Д. Пушкарь // Тезисы доклада. Материалы XXXVIII Научных чтений памяти К.Э. Циолковского. – Калуга, 2003.
- [2] Обзор существующих гидролабораторий, используемых для подготовки космонавтов / М.Л. Киселев, М.А. Зайцев, В.В. Несмеянов, О.В. Кузовов // Пилотируемые полеты в космос. – 2020. – № 1(34). – С. 120–131.
- [3] Киво, А.М. Электромеханические системы стенов обезвешивания, обеспечивающих подготовку космонавтов к деятельности на поверхности планет с пониженной гравитацией: автореферат дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.09.03 / Киво Александр Михайлович; [Место защиты: Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т им. М.И. Платова]. – Новочеркасск, 2013. – 18 с.

- [4] Бабайцев, Д.В. Имитационное моделирование операций внекорабельной деятельности / Д.В. Бабайцев, О.С. Цыганков // Космонавтика и ракетостроение. – 2017. – № 1 (94). – С. 38–45.
- [5] Направления применения технологий виртуальной реальности при подготовке космонавтов к внекорабельной деятельности / А.А. Алтунин, П.П. Долгов, Н.Р. Жамалетдинов [и др.] // Пилотируемые полеты в космос. – 2021. – № 1(22). – С. 72–88.
- [6] Крючков, Б.И. Имитационная математическая модель внекорабельной деятельности космонавтов на поверхности Марса / Б.И. Крючков, П.П. Долгов // Пилотируемые полеты в космос. – 2023. – № 1(46). – С. 61–73.
- [7] Пушкарь, О.Д. Формирование концептуальной модели внекорабельной деятельности с использованием комплекса средств моделирования космического полета // Тезисы доклада. Материалы XLVIII Научных чтений памяти К.Э. Циолковского. – Калуга, 2013. – С. 287–288.
- [8] Эльберг, М.С. Имитационное моделирование [Текст]: учебное пособие / М.С. Эльберг, Н.С. Цыганков; Министерство образования и науки Российской Федерации, Сибирский федеральный университет, Институт инженерной физики и радиоэлектроники. – Красноярск: СФУ, 2017. – 126 с.
- [9] Питерсон, Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. – Москва: Мир. – 1984. – 264 с.
- [10] Кузнецов, С.К. Применение сетей Петри для моделирования железнодорожных систем (обзор) / С.К. Кузнецов, А.И. Потехин // Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ-2014, Москва). – Москва: ИПУ РАН, 2014. – С. 4937–4946.
- [11] Пушкарь, О.Д. Дискретно-событийная модель деятельности отряда космонавтов // Тезисы докладов 13-й Международной конференции «Авиация и космонавтика». – Москва, 2014. – С. 419–420
- [12] Пушкарь О.Д. Имитационная модель функционирования отряда космонавтов как дискретной стохастической системы на основе сетей Петри // Космонавтика и ракетостроение. – 2015. – № 2(81). – С. 32–39.
- [13] Юнесс, С. Применение сетей Петри для исследования сетевых систем управления / С. Юнесс, Е.С. Лобусов // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2019. – № 7. – DOI: 10.18698/2308-6033-2019-7-1885
- [14] CPN Tools Homepage. – URL: <http://www.cpntools.org>. (Дата обращения: 23.01.2023).
- [15] Кобзарь, А.И. Прикладная математическая статистика. – Москва: Физматлит, 2012. – 813 с.

REFERENCES

- [1] Naydenov, B.V. The Use of Laboratory Aircraft for Cosmonaut Training, Testing and Experimental Research in Conditions of Short-Term Weightlessness / B.V. Naydenov, O.D. Pushkar // Abstracts of the Report. Materials of the XXXVIII Scientific Readings in Memory of K.E. Tsiolkovsky. – Kaluga, 2003.
- [2] Review of Existing Hydrolabs Used for Cosmonaut Training / M.L. Kiselyov, M.A. Zaitsev, V.V. Nesmeyanov, O.V. Kuzov // Manned Space Flights. – 2020. – No 1(34). – P. 120–131.

- [3] Kivo, A.M. Electromechanical Systems of Dewatering Stands Providing Cosmonauts Training for Activities on the Surface of Planets with Reduced Gravity: Abstract of the Dissertation of the Candidate of Technical Sciences: 05.09.03 / Kivo Alexander Mikhailovich; [Place of protection: South-Russian State Polytechnic University. M.I. Platov University]. – Novocherkassk, 2013. – 18 p.
- [4] Babaytsev, D.V. Simulation Modeling of Extravehicular Activity Operations / D.V. Babaytsev, O.S. Tsygankov // *Cosmonautics and Rocket Science*. – 2017. – No 1 (94). – P. 38–45.
- [5] Directions of Application of Virtual Reality Technologies in the Preparation of Astronauts for Extravehicular Activity / A.A. Altunin, P.P. Dolgov, N.R. Zhamaletdinov [et al.] // *Manned Space Flights*. – 2021. – No 1(22). – P. 72–88.
- [6] Kryuchkov, B.I. Simulation Mathematical Model of Extravehicular Activity of Astronauts on the Surface of Mars / B.I. Kryuchkov, P.P. Dolgov // *Manned Space Flights*. – 2023. – No 1(46). – P. 61–73.
- [7] Pushkar, O.D. Formation of a Conceptual Model of Extravehicular Activity Using a Complex of Space Flight Modeling Tools // *Theses of the Report Materials of the XLVIII Scientific Readings in Memory of K.E. Tsiolkovsky*. – Kaluga, 2013. – P. 287–288.
- [8] Elberg, M.S. Simulation Modeling: Textbook. Manual / M.S. Elberg, N.S. Tsygankov. – Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t, 2017. – 126 p.
- [9] Peterson J. Petri Net Theory and System Modeling. – Moscow: Mir, 1984. – 264 p.
- [10] Kuznetsov, S.K. Application of Petri Nets for Modeling Railway Systems (Review) / S.K. Kuznetsov, A.I. Potekhin // *Proceedings of the XII All-Russian Meeting on Management Problems (VSPU-2014, Moscow)*. – Moscow: IPU RAS, 2014. – P. 4937–4946.
- [11] Pushkar, O.D. Discrete-event Model of Cosmonaut Detachment Activity // *Abstracts of the 13th International Conference “Aviation and Cosmonautics”*. – Moscow, 2014. – P. 419–420.
- [12] Pushkar, O.D. Simulation Model of the Functioning of the Cosmonaut Detachment as a Discrete Stochastic System Based on Petri Nets // *Cosmonautics and rocket Science*. – 2015. – No 2(81). – P. 32–39.
- [13] Yuness, S. Application of Petri Nets for the Study of Network Control Systems / S. Yuness, E.S. Lobusov // *Engineering Journal: Science and Innovation*. – 2019. – No 7. – DOI: 10.18698/2308-6033-2019-7-1885
- [14] CPN Tools Homepage. – URL: <http://www.cpntools.org> (Accessed: 23.01.2023).
- [15] Kobzar, A.I. Applied Mathematical Statistics. – Moscow: Fizmatlit, 2012. – 813 p.