



УДК 358.4
ГРНТИ 78.27.49

МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО ВАРИАНТА МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВИАЦИИ ВОЗДУШНО-КОСМИЧЕСКИХ СИЛ, ВЫПОЛНЯЮЩЕЙ ЗАДАЧИ ЗА ПРЕДЕЛАМИ ГРАНИЦ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Р.В. ЕФАНОВ

Филиал ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Сызрань)

Р.Г. ХИЛЬЧЕНКО, кандидат военных наук

ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

И.И. ЧЕРНУХО, кандидат технических наук

ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

Предложена методика обоснования рационального варианта материально-технического обеспечения авиации ВКС России, выполняющей задачи по предназначению за пределами границ РФ. Методика основана на представлении процесса доставки материально-технических средств в виде цепи полумарковских случайных событий и позволяет обосновать выбор способа доставки груза (в рамках одного варианта обеспечения) и рациональный вариант из возможных путем их сопоставления в условиях временных ограничений.

Ключевые слова: материально-техническое обеспечение, многоэтапный процесс, виды транспорта, способ доставки, принятие решения, рациональный вариант, полумарковские цепи.

THE PROCEDURE OF JUSTIFICATION A REASONABLE OPTION FOR LOGISTICS SUPPORT OF THE AEROSPACE FORCES AVIATION PERFORMING MISSIONS OUTSIDE THE BORDERS OF THE RUSSIAN FEDERATION

R.V. EFANOV

MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» Branch (Syzran)

R.G. HILCHENKO, Candidate of Military sciences

MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)

I.I. CHERNUHO, Candidate of Technical sciences

MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)

The Procedure of justification a reasonable option of material and technical support of the Russian Federation Aerospace Forces aviation that performs tasks intended for use outside the borders of the Russian Federation is proposed. The method is based on the representation of the material and technical means delivery process in the form of a semi-Markov random events chain and allows to justify the choice of the cargo delivery method (within one security option) and the rational option from the possible ones by comparing them under time constraints.

Keywords: logistics, multi-stage process, types of transport, delivery method, decision-making, rational option, semi-Park chains.

Введение. Известно [1], что способ доставки материально-технических средств (МТС) при организации обеспечения авиации ВКС России, выполняющей задачи по предназначению за пределами границ Российской Федерации, может быть определен задействованным для этой цели транспортом: наземным (автомобильный, железнодорожный), воздушным, морским.



Кроме того, процесс доставки от базы хранения МТС (на территории РФ) до конечного пункта доставки (на территории другого государства) может включать в себя несколько этапов, характеризующихся разными способами транспортировки груза.

Важной задачей при планировании подобных мероприятий является оценка обстановки и условий (факторов), позволяющая обосновать выбор способов доставки, разделив тем самым весь логистический процесс на этапы. Цепочка событий, связанных со сменой вида транспортного средства (этапы доставки) образует вариант материально-технического обеспечения (МТО), который должен быть сопоставлен с другими вариантами для определения наиболее рационального из них.

Актуальность. Решение указанной задачи наталкивается на ряд трудностей, связанных с отсутствием методического аппарата обоснования рационального варианта доставки МТС адекватного реально существующим угрозам срыва МТО. При этом предварительный анализ последовательно сменяющихся этапов доставки (в рамках одного варианта), позволяет рассматривать каждый вариант доставки как полумарковскую цепь случайных процессов.

Поэтому целью настоящей работы является разработка методики обоснования рационального варианта материально-технического обеспечения авиации ВКС, выполняющей задачи за пределами границ Российской Федерации, на основании математического аппарата теории полумарковских случайных процессов.

Смену этапов процесса обеспечения для четырех возможных способов доставки представим в виде графа состояний, показанного на рисунке 1.

При этом выбор способа доставки на очередном этапе может быть представлен конфликтными переходами системы, каждый из которых обусловлен присущими ему вероятностно-временными характеристиками [2]. Значения этих характеристик должны быть обоснованы учетом множества факторов, таких как: транспортная инфраструктура, протяженность маршрута, природно-климатические особенности пути следования, метеорологические условия, массогабаритные характеристики перевозимого груза и другие.

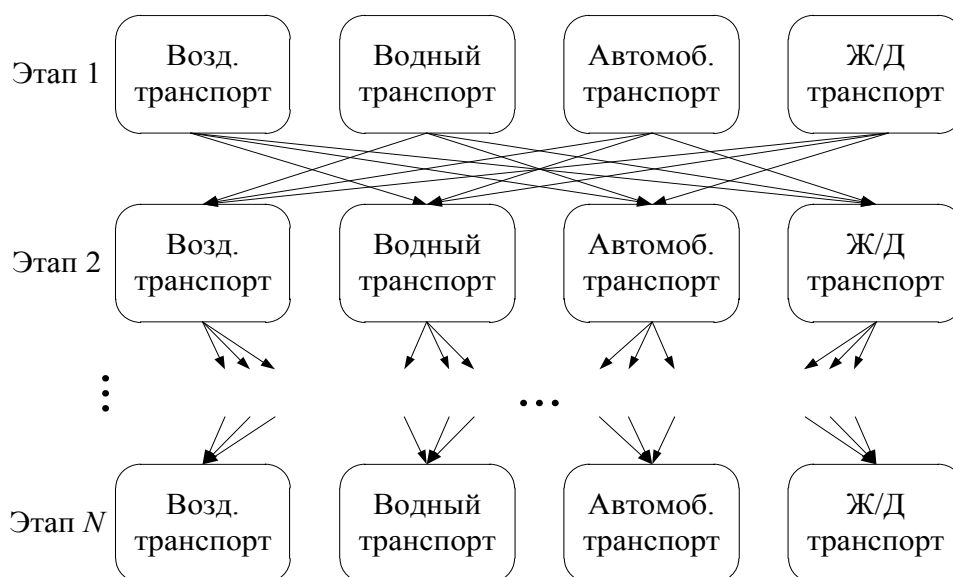


Рисунок 1 – Граф состояний процесса доставки МТС разными видами транспорта (способами транспортировки)

Немаловажным фактором, оказывающим влияние на выбор способа доставки МТС, является возможность срыва процесса обеспечения под воздействием внешних сил (враждебно настроенных стран, террористических организаций, пиратов и т.п.). На разных этапах МТО, с учетом того, через территории каких государств будет пролегать маршрут доставки, указанные силы будут обладать различными способностями.



Также на выбор будут оказывать свое влияние сроки доставки, которыми могут характеризоваться каждый из рассматриваемых видов транспорта, определяя оперативность варианта МТО в целом.

Описанные выше особенности могут быть учтены, если воспользоваться математическим аппаратом теории полумарковских случайных процессов [3].

Зададимся матрицей возможных состояний $S_k^{(n)}$, элементами которой являются способы транспортировки ($k = 1...K$) груза на различных этапах процесса доставки ($n = 1...N$):

$$[S_k^{(n)}] = \begin{bmatrix} S_1^{(1)} & S_1^{(2)} & \dots & S_1^{(N)} \\ S_2^{(1)} & S_2^{(2)} & \dots & S_2^{(N)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_K^{(1)} & S_K^{(2)} & \dots & S_K^{(N)} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Цепочку состояний, представляющую собой возможную последовательность выбранных способов транспортировки, будем называть вариантом доставки МТС.

Пример развития событий процесса доставки груза по трем вариантам в виде графа состояний показан на рисунке 2.

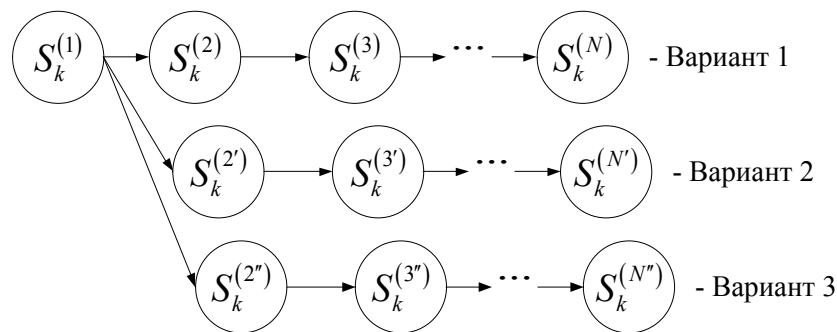


Рисунок 2 – Граф состояний возможного развития событий процесса доставки МТС по трем вариантам (пример)

Варианты доставки могут отличаться друг от друга количеством этапов ($N \neq N' \neq N''$) всего процесса и (или) способами (k) транспортировки груза на одном или нескольких этапах.

С целью определения наиболее рационального из общего числа возможных вариантов доставки необходимо обосновать выбор способа доставки для каждого отдельно взятого этапа.

Для этого рассмотрим переход « $S_{k=i}^{(n-1)} \rightarrow S_{k=j}^{(n)}$ » для $i \neq j$ графа состояний рисунка 2. Выбор способа n -го этапа будет характеризоваться некоторой вероятностью перехода $P_{ij}^{(n)}$ системы из состояния $S_{k=i}^{(n-1)}$ предыдущего этапа ($n-1$) в состояние $S_{k=j}^{(n)}$.

Тогда, в рамках одного n -го этапа, матрица переходных вероятностей будет иметь размер $K \times K$:

$$\mathbf{P}^{(n)} = [P_{ij}^{(n)}] = \begin{bmatrix} P_{11}^{(n)} & P_{12}^{(n)} & \dots & P_{1K}^{(n)} \\ P_{21}^{(n)} & P_{22}^{(n)} & \dots & P_{2K}^{(n)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{K1}^{(n)} & P_{K2}^{(n)} & \dots & P_{KK}^{(n)} \end{bmatrix}. \quad (2)$$



Указанная матрица имеет две принципиальные особенности.

Во-первых, если понимать под «этапом доставки» – процесс промежуточной смены применяемого транспортного средства (способа транспортировки) под воздействием обозначенных выше факторов, то диагональные элементы матрицы (2) должны быть нулевыми, т.к. не характеризуют смену транспорта:

$$P_{11}^{(n)} = P_{22}^{(n)} = \dots = P_{KK}^{(n)} = 0. \quad (3)$$

Во-вторых, поскольку на рассматриваемом этапе процесса доставки система из состояния i может перейти лишь в одно из взаимоисключающих состояний ($j=1\dots K$), то для любой ненулевой строки матрицы (2) сумма переходных вероятностей $P_{ij}^{(n)}$ будет равна единице:

$$\sum_{j=1}^K P_{ij}^{(n)} = 1. \quad (4)$$

В качестве временной характеристики рассматриваемого этапа будем использовать плотность распределения $\varphi_{ij}^{(n)}(t)$ времени доставки груза i -м способом предыдущего этапа перед мгновенным переходом на j -ый способ n -го этапа.

Матрица переходных плотностей распределения времени n -го этапа будет иметь следующий вид:

$$\Phi^{(n)}(t) = [\varphi_{ij}^{(n)}(t)] = \begin{bmatrix} \varphi_{11}^{(n)}(t) & \varphi_{12}^{(n)}(t) & \dots & \varphi_{1K}^{(n)}(t) \\ \varphi_{21}^{(n)}(t) & \varphi_{22}^{(n)}(t) & \dots & \varphi_{2K}^{(n)}(t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_{K1}^{(n)}(t) & \varphi_{K2}^{(n)}(t) & \dots & \varphi_{KK}^{(n)}(t) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Физически плотность $\varphi_{ij}(t)$ распределения времени определяет оперативность выбранного i -го способа транспортировки предыдущего этапа и не зависит от выбора способа очередного этапа процесса доставки, который может быть представлен любым из $j=1\dots K$ видом транспорта.

Поэтому плотности каждой строки матрицы (5) будут идентичными:

$$\varphi_{i1}^{(n)}(t) = \varphi_{i2}^{(n)}(t) = \dots = \varphi_{iK}^{(n)}(t) = \varphi_i^{(n)}(t), \quad (6)$$

а сама матрица переходных плотностей распределения времени n -го этапа будет содержать лишь один столбец:

$$\Phi^{(n)} = [\varphi_{ij}^{(n)}(t)] = [\varphi_i^{(n)}(t)] = \begin{bmatrix} \varphi_1^{(n)}(t) \\ \varphi_2^{(n)}(t) \\ \vdots \\ \varphi_K^{(n)}(t) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Снятие ограничений на виды распределения элементов матрицы (6) позволяет считать случайный процесс смены способов доставки МТС последующих этапов полумарковским. Аналитический вид этих плотностей можно определить статистическим путем, на основе выдвижения и проверки статистических гипотез о видах законов распределений [4].



Система приобретет Марковский характер, если время всех ее переходных процессов подчинить лишь экспоненциальному закону распределения.

Итоговая матрица переходных характеристик полумарковского случайного процесса очередного этапа доставки МТС со сменой способа транспортировки на основании (2), (3) и (7) будет иметь следующий вид:

$$\mathbf{P}^{(n)} \boldsymbol{\varphi}^{(n)} = \left[P_{ij}^{(n)} \varphi_i^{(n)}(t) \right] = \begin{pmatrix} \underline{0} & P_{12}^{(n)} \varphi_1^{(n)}(t) & \dots & P_{1K}^{(n)} \varphi_1^{(n)}(t) \\ P_{21}^{(n)} \varphi_2^{(n)}(t) & \underline{0} & \dots & P_{2K}^{(n)} \varphi_2^{(n)}(t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{K1}^{(n)} \varphi_K^{(n)}(t) & P_{K2}^{(n)} \varphi_K^{(n)}(t) & \dots & \underline{0} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Непосредственный выбор способа доставки на каждом этапе процесса может быть обоснован следующим образом.

Для каждого этапа формируется матрица переходных характеристик (8) с нулевыми строками за исключением одной, которой соответствует выбранный способ доставки предыдущего этапа. Из этой строки определяется оптимальный способ по критериям применимости (успешного осуществления) и оперативности, который на следующем этапе будет задавать ненулевую строку матрицы переходных характеристик (8).

Таким образом, каждый вариант графа, представленного на рисунке 2, может быть дополнен переходными характеристиками, полученными на основании приведенной выше методики (рисунок 3).

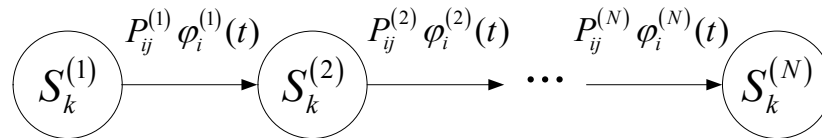


Рисунок 3 – Представление одного из возможных вариантов доставки МТС в виде графа состояний, дополненного переходными характеристиками

Принятие итогового решения в пользу наиболее рационального из возможных вариантов доставки может быть основано на сопоставлении их вероятностно-временных зависимостей.

Поскольку каждый вариант представлен последовательностью сменяющихся способов при отсутствии обратных связей, представим процесс доставки по рассматриваемому варианту в виде произведения вероятностно-временных характеристик его этапов в форме преобразования Лапласа [5]:

$$\begin{aligned} \tilde{P}^{(1 \rightarrow N)}(s) &= L_s \left\{ P_{ij}^{(1)} \varphi_i^{(1)}(t) \times P_{ij}^{(2)} \varphi_i^{(2)}(t) \times \dots \times P_{ij}^{(N)} \varphi_i^{(N)}(t) \right\} = \\ &= P_{ij}^{(1)} \varphi_i^{(1)}(s) \times P_{ij}^{(2)} \varphi_i^{(2)}(s) \times \dots \times P_{ij}^{(N)} \varphi_i^{(N)}(s) , \end{aligned} \quad (9)$$

где $L_s \{ \dots \}$ – символ преобразования Лапласа; s – оператор Лапласа; $\varphi_i(s)$ – плотность вероятности $\varphi_i(t)$ в операторной форме.

Такое представление процесса доставки МТС позволяет оценить среднее время попадания системы из исходного в конечное состояние $(1 \rightarrow N)$ рассматриваемого варианта. Его можем определить как начальный момент 1-го порядка путем дифференцирования (9) по s и приравнивания нулю полученной производной:



$$\bar{T}^{(1 \rightarrow N)} = - \frac{d}{ds} \left[\tilde{P}^{(1 \rightarrow N)}(s) \right] \Big|_{s=0} \quad (10)$$

Выражение для определения дисперсии этого времени в общем случае может быть представлено в виде:

$$\sigma_{\bar{T}^{(1 \rightarrow N)}}^2 = \left\{ \frac{d^2}{ds^2} \left[\tilde{P}^{(1 \rightarrow N)}(s) \right] - \left(- \frac{d}{ds} \left[\tilde{P}^{(1 \rightarrow N)}(s) \right] \right)^2 \right\} \Big|_{s=0} \quad (11)$$

Будем считать, что на основании описанной выше методики определены переходные вероятности варианта доставки, состоящего из трех этапов. Значения этих вероятностей представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения переходных вероятностей смены способов доставки для варианта, состоящего из трех этапов

| Переходная вероятность | $P_{ij}^{(1)}$ | $P_{ij}^{(2)}$ | $P_{ij}^{(3)}$ |
|------------------------|----------------|----------------|----------------|
| Значение вероятности | 0,63 | 0,72 | 0,51 |

Закон распределения времени, для простоты и наглядности, будем считать экспоненциальным:

$$\varphi_{ij}^{(n)}(t) = \lambda_{ij}^{(n)} \exp \left\{ -\lambda_{ij}^{(n)} \cdot t \right\}, \quad (12)$$

с интенсивностями перехода $\lambda_{ij}^{(n)} = 1/\bar{T}_{ij}^{(n)}$, где $\bar{T}_{ij}^{(n)}$ – значение среднего времени, отводимого на доставку МТС i -м способом перед его сменой на способ « j ».

В операторной форме (форме преобразования Лапласа) плотность вероятности (12) приобретет следующий вид:

$$\varphi_{ij}^{(n)}(s) = L_s \left\{ \varphi_{ij}^{(n)}(t) \right\} = \frac{1}{\bar{T}_{ij}^{(n)} s + 1} \quad (13)$$

В качестве исходных данных для построения вероятностно-временной зависимости процесса доставки выбранным вариантом, помимо переходных вероятностей таблицы 1, будем использовать значения среднего времени, приведенные в таблице 2.

Таблица 2 – Значения среднего времени, отводимого на этапы доставки МТС выбранным вариантом

| Этапы доставки МТС | $\bar{T}_{ij}^{(1)}$ | $\bar{T}_{ij}^{(2)}$ | $\bar{T}_{ij}^{(3)}$ |
|-------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Среднее время этапов, ч | 15 | 7 | 9 |

Обратное преобразование Лапласа выражения (9) с учетом (13) и с использованием исходных данных таблиц 1 и 2 позволяет получить зависимость вероятности успешного завершения процесса МТО выбранным вариантом от времени его выполнения. Указанная зависимость, с учетом рекомендаций, описанных в [6], построена с помощью программной среды для решения математических задач Mathcad и представлена на рисунке 4.

Невысокое значение финальной вероятности ($P^{(1 \rightarrow N)}(t > 100) = 0,23$) рисунка 4 объясняется потерями, связанными с возможным выбором других способов на каждом из трех этапов, а произведение переходных вероятностей таблицы 1 укажет именно на это значение.

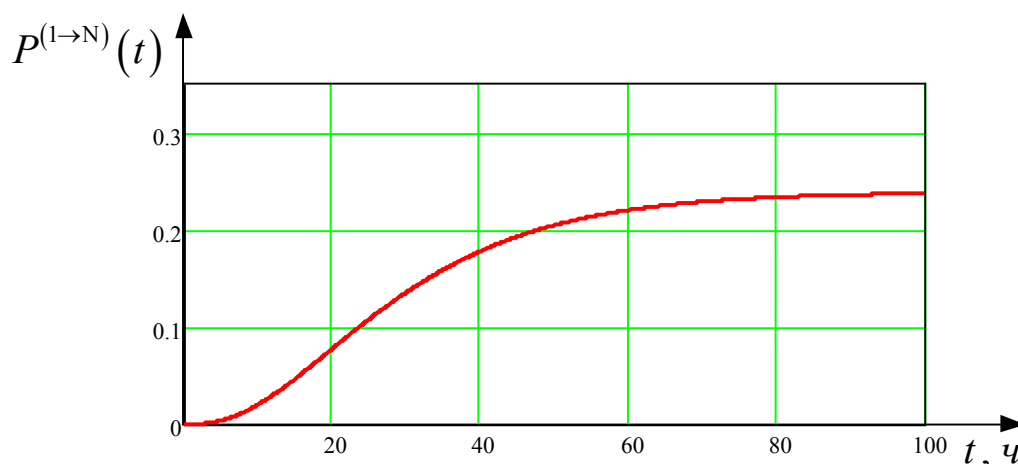


Рисунок 4 – Зависимость вероятности успешного завершения процесса МТО выбранным вариантом от времени его выполнения

Итоговое решение в пользу наиболее рационального из возможных вариантов доставки при сопоставлении их вероятностно-временных зависимостей будет определяться располагаемым временем, не позднее которого задача МТО должна быть выполнена.

Например, для трех вариантов процесса доставки, вероятностно-временные зависимости которых представлены на рисунке 5, рациональным может быть принят каждый из них для различных условий:

- «вариант 1» – при условии, что задача МТО должна быть выполнена в течение суток (24 часа);
- «вариант 2» – при условии, что задача МТО должна быть выполнена в течение 3-х суток (72 часа);
- «вариант 3» – при условии, что задача МТО должна быть выполнена точно в срок (48 часов), как вариант, имеющий минимальные риски, если доставка будет смещена от указанного срока в ту или иную сторону.

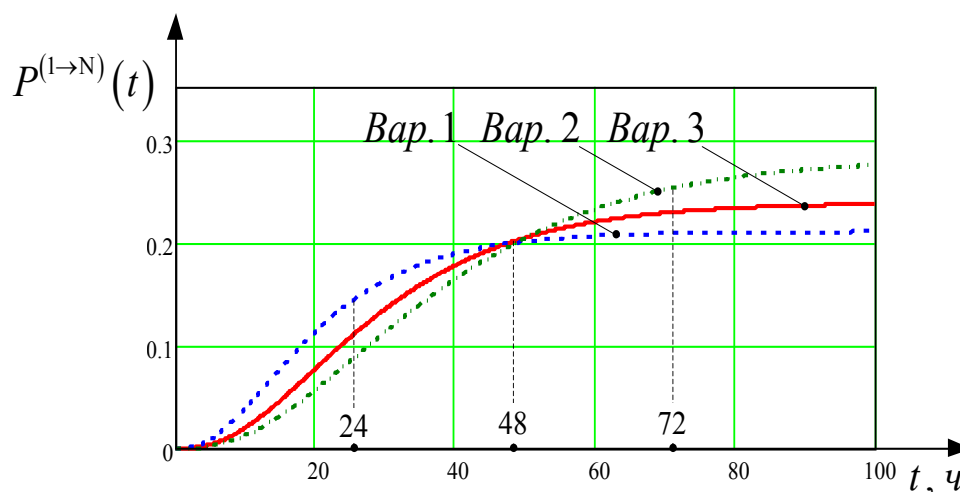


Рисунок 5 – Сопоставление вероятностно-временных зависимостей трех вариантов процесса доставки МТС

Выводы. На основе представления процесса доставки МТС в виде полумарковской цепи сменяющихся событий (способов транспортировки) разработана методика обоснования рационального варианта обеспечения авиации ВКС России, выполняющей задачи за пределами границ Российской Федерации. Методика включает в себя решение двух задач: обоснование



выбора способа доставки груза последовательности возможных этапов (в рамках одного варианта МТО) и обоснование рационального варианта МТО из возможных, путем их сопоставления в условиях временных ограничений.

В дальнейшем целесообразно исследовать данную методику по направлениям:

– обоснование критериев оптимальности способов доставки, при решении первой задачи, позволяющих учитывать внешние факторы, включая преднамеренное негативное воздействие враждебных сил, с целью оперативного и качественного МТО;

– оценка точности прогнозируемого времени доставки МТС, при решении второй задачи, в условиях, когда задача МТО должна быть выполнена точно в срок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефанов Р.В., Хильченко Р.Г., Чернухо И.И. Методический подход к обоснованию мероприятий обеспечения авиации ВКС, выполняющей задачи за пределами границ Российской Федерации // Воздушно-космические силы. Теория и практика, 2019. № 12. С. 145–152. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.академия-ввс.рф/images/docs/vks/12-2019/145-152.pdf> (дата обращения 01.10.2020).

2. Козирацкий А.Ю., Подлужный В.И., Паринов М.Л., Федукевич З.Б. Обоснование характеристик конфликтно-обусловленных переходов в полумарковских вероятностных моделях // Радиотехника. 2006. № 9. С. 84–87.

3. Тихонов В.И., Миронов М.А. Марковские процессы. М.: Сов. радио, 1977. 488 с.

4. Гнеденко Б.В., Коваленко И.Н. Введение в теорию массового обслуживания М.: Наука, 1987. 336 с.

5. Модели информационного конфликта средств поиска и обнаружения: Монография / под ред. Ю.Л. Козирацкого. М.: Радиотехника, 2013. 232 с.

6. Козирацкий Ю.Л., Алгазинов Э.К., Паринов М.Л. Компьютерное моделирование полумарковских процессов. Материалы XV Международной научно-методической конференции «Информатика: проблемы, методология, технологии» (12-13 февраля 2015 г.) / ВГУ. Воронеж, 2015. Т. 2. С. 12–16.

REFERENCES

1. Efanov R.V., Hil'chenko R.G., Chernuho I.I. Metodicheskiy podhod k obosnovaniyu meropriyatij obespecheniya aviacii VKS, vypolnyayushej zadachi za predelami granic Rossijskoj Federacii // Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika, 2019. № 12. pp. 145–152. [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.akademiya-vvs.rf/images/docs/vks/12-2019/145-152.pdf> (data obrascheniya 01.10.2020).

2. Kozirackij A.Yu., Podluzhnyj V.I., Parinov M.L., Fedukovich Z.B. Obosnovanie harakteristik konfliktno-obuslovlennyh perehodov v polumarkovskih veroyatnostnyh modelyah // Radiotekhnika. 2006. № 9. pp. 84–87.

3. Tihonov V.I., Mironov M.A. Markovskie processy. M.: Sov. radio, 1977. 488 p.

4. Gnedenko B.V., Kovalenko I.N. Vvedenie v teoriyu massovogo obsluzhivaniya M.: Nauka, 1987. 336 p.

5. Modeli informacionnogo konflikta sredstv poiska i obnaruzheniya: Monografiya / pod red. Yu.L. Kozirackogo. M.: Radiotekhnika, 2013. 232 p.

6. Kozirackij Yu.L., Algazinov `E.K., Parinov M.L. Komp'yuternoe modelirovanie polumarkovskih processov. Materialy XV Mezhdunarodnoj nauchno-metodicheskoy konferencii «Informatika: problemy, metodologiya, tehnologii» (12-13 fevralya 2015 g.) / VGU. Voronezh, 2015. T. 2. pp. 12–16.



© Ефанов Р.В., Хильченко Р.Г., Чернухо И.И., 2020

Ефанов Роман Владимирович, заместитель начальника филиала ВУНЦ ВВС «ВВА» по материально-техническому обеспечению, филиал Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Сызрань), Россия, 446007, г. Сызрань-7, ул. Маршала Жукова, 1, afhsp@mail.ru.

Хильченко Роман Геннадьевич, кандидат военных наук, преподаватель кафедры радиоэлектронной борьбы (и технического обеспечения частей РЭБ), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, hrg-1984@yandex.ru.

Чернухо Иван Иванович, кандидат технических наук, заместитель начальника ВУНЦ ВВС «ВВА» по вооружению, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, chernuho.ivan@mail.ru.