

## МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ОРГАНИЗОВАННОСТИ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СВЯЗИ И АВТОМАТИЗАЦИИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

**Боговик Александр Владимирович**

к.в.н., профессор Военной академии связи  
имени Маршала Советского союза С.М. Буденного,  
г. Санкт-Петербург, Россия,  
bogovikav@mail.ru

**Алисевиц Евгения Александровна**

к.т.н., доцент Военной академии связи  
имени Маршала Советского союза С.М. Буденного,  
г. Санкт-Петербург, Россия,  
ezhilkina@yandex.ru

**Гусев Алексей Петрович**

к.т.н., доцент Военной академии связи  
имени Маршала Советского союза С.М. Буденного,  
г. Санкт-Петербург, Россия,  
alexeYGusew@mail.ru

### АННОТАЦИЯ

В работе рассмотрен методологический подход к оценке организованности систем технического обеспечения связи и автоматизации специального назначения, в связи с тем, что они относятся к классу управляемых иерархических систем, функционирующих в сложных прогнозируемых условиях противодействующих факторов. Предложена последовательность реализуемых операций (процедур) с применением показателя организованности, отражающего степень достижения поставленных целей. Коэффициент организации системы тем выше, чем большее число альтернатив рассматривается априори в начале процессов управления техническим обеспечением связи и автоматизации, в том числе с учетом противоборства двух систем, преследующих противоположные цели. При ограниченном (счетном) множестве возможных действий противоборствующих сторон их оптимальные стратегии могут быть найдены на основе решения матричной игры в смешанных стратегиях. Кроме того, приведены примеры расчета неопределенности принятых решений, выраженных через энтропию управляющих элементов для одноуровневой, двухуровневой и многоуровневой модели системы управления техническим обеспечением связи и автоматизации специального назначения. Максимальное значение энтропии системы достигается в том случае, если все гипотезы равновероятны. Такой случай характерен, например, для начала планирования операций, когда априори (до принятия решения) можно считать все гипотезы равновероятными. В общем случае энтропия (неопределенность решений) управляющего органа будет иметь нижнюю и верхнюю границы. После того, как управляющий элемент произвел выбор конкретного решения, априорно существовавшая неопределенность устраняется. Каждому варианту решения приписывается вероятность достижения цели. В этом случае можно вычислить энтропию принятия оптимальной стратегии и, в конечном итоге, определить степень организованности систем технического обеспечения связи и автоматизации специального назначения, функционирующих в сложных прогнозируемых условиях противодействующих факторов.

**Ключевые слова:** управляемые иерархические системы; показатель организованности системы; вероятность принятия решения; энтропия принятия оптимальной стратегии; связь.

Системы технического обеспечения связи и автоматизации специального назначения (ТОС и АСН) относятся к классу управляемых иерархических систем, функционирующих в сложных прогнозируемых условиях противодействующих факторов [1, 5, 6, 7].

Эффективность применения систем ТОС и АСН во многом определяется организованностью (согласованностью) действий управляющих элементов (УЭ) всех уровней иерархии, обеспечивающих требуемое качество результатов их деятельности.

Методологический подход к оценке организованности систем ТОС и АСН может быть представлен предлагаемой последовательностью реализуемых операций (процедур), при этом показатель организованности систем ТОС и АСН может рассматриваться как параметр, отражающий степень достижения поставленных целей.

Пусть в иерархической системе  $K$ -й управляющий элемент (УЭ)  $l$ -го уровня иерархии имеет возможность принимать решения из  $m_{lk}$  альтернатив (вариантов) и вероятность принятия  $i$ -ой альтернативы из  $m_{lk}$  равна  $P_{lk}(i)$ . Тогда неопределенность принятого решения  $K$ -м управляющим элементом  $l$ -го уровня иерархии определяется его энтропией (1):

$$H_{lk} = -\sum_{i=1}^{m_{lk}} P_{lk}(i) \log P_{lk}(i),$$

где  $m_{lk}$  - число анализируемых альтернатив.

Согласно выражению (1) энтропия равна нулю тогда и только тогда, когда одна из вероятностей  $P_{lk}(i)=1$ , а все остальные нулю.

Физически это означает, что  $K$ -му управляющему элементу  $l$ -го уровня не предоставляется право выбора (отсутствует свобода действий). В данной ситуации такой случай может рассматриваться как крайний, справедливый для жестко регулируемой системы.

Энтропия (2) УЭ принимает максимальное значения в случае, когда  $P_{lk}(i)$  все одинаковы, т.е. все решения равновероятны, тогда  $P_{lk}(i) = \frac{1}{m_{lk}}$  :

$$H_{lk \max} = -\frac{1}{m_{lk}} \log \frac{1}{m_{lk}} = \log m_{lk}, \quad (2)$$

Рассматриваемый случай характерен для ситуации, когда отсутствует какая-либо априорная информация о результатах воздействия принятого решения на объект управления. В реальных системах решения (и соответствующие ему воздействия) стараются выбрать оптимальными с точки зрения достижения целей управления. Тогда вероятность принятия того или иного решения (3) может быть определена (соотнесена) с его адекватностью [2]:

$$P_{lk}(i) = \frac{m}{m_0} \varphi(i), \quad (3)$$

где  $m$  – число просмотренных альтернатив при выборе управления;

$m_0$  – общее возможное число альтернатив, зависящее от неопределенности состояния объекта управления из-за внешних воздействий на него;

$\varphi(i)$  – эффективность функционирования объекта управления при  $i$ -й альтернативе [3].

По сути –  $\frac{m}{m_0}$  – это вероятность того, что из просмотренных  $m$  – альтернатив, выбранный вариант будет оптимальным.

Когда число альтернатив (степеней свободы) задается вышестоящим уровнем системы, а  $m = m_0$ , т.е.  $\frac{m}{m_0} = 1$ , то вероятность принятия того или иного решения имеет следующий вид (4):

$$P_{lk}(i) = \varphi(i) . \tag{4}$$

В общем случае энтропия (неопределенность решений) управляющего органа будет иметь нижнюю и верхнюю границы (5):

$$0 \leq H_{lk} \leq H_{lk \max} . \tag{5}$$

После того, как управляющий элемент произвел выбор конкретного решения, априорно существовавшая неопределенность устраняется.

Рассмотрим энтропию для многоуровневой модели системы управления, в которой вероятность выбора решения на  $l^m$  уровне зависит от того, какие решения были приняты на  $(l+i)$ -м уровне.

Ограничимся при этом только УЭ прямой подчиненности, так как вероятность того, какие решения будут приняты управляющим элементом  $l$ -го уровня, практически не зависит от решений УЭ  $(l+1)$ -го уровня, которому он не подчинен.

Математическим представлением решений  $K$ -го УЭ на  $l$ -м уровне иерархии может служить цепь Маркова. [4]

Цепью Маркова  $n$ -го порядка называется последовательность зависимых действий, при которой условная вероятность некоторого исхода  $x_k$  в  $i$ -м действии, если известны исходы в предыдущих  $n$ -действиях (в данном случае на  $n$ -верхах уровнях иерархии), т.е. при  $i > a_1 > a_2 > \dots > a_n$  имеет вид (6):

$$P_l(x_k^{(i)} / x^{(a_1)}, x^{(a_2)}, \dots, x^{(a_n)}) = P(x_k^{(i)} / x^{(a_1)}, x^{(a_2)}, \dots, x^{(a_{n+1})}) \tag{6}$$

В Марковском источнике  $n$ -го порядка распределение вероятностей  $P(x_i)$  решений на  $l$ -м уровне иерархии зависит от того, каковы были решения на верхних уровнях иерархии.

Число возможных последовательностей решений (по вертикали или по подчиненности) УЭ  $L$ -уровневой иерархической системы, при числе альтернатив на каждом уровне  $m_{lk}$  равно  $r = \prod_{l=1}^L m_{lk}$ . Следовательно, число различных состояний Марковского источника -  $r$ -конечно и не

превышает  $r \leq \prod_{l=1}^L m_{lk}$ .

Если для каждого  $S_l$ -решения на  $l$ -м уровне иерархии заданы вероятности  $P_{lk}(i)$  и известно, какой последовательностью действий  $L$ -органов управления (по уровням иерархии) оно определяется, то могут быть вычислены вероятности  $P_l$  каждой из последовательностей  $S_l$ .

При дополнительных условиях эргодичности, выполняемых, как правило, на практике, существуют безусловные вероятности  $P(i)$  выбора  $i$ -го решения (7):

$$P(i) = \sum_{l=1}^L P_l P_{lk}(i) \tag{7}$$

Выражение (8)

$$H_{lk} = - \sum_{i=1}^{m_{lk}} P_{lk}(i) \log P_{lk}(i) \tag{8}$$

представляет собой математическое ожидание неопределенности решения для УЭ, находящееся на  $l$ -м уровне иерархии.

Неопределенность (энтропию) решений (по вертикали) для системы управления можно получить путем усреднения по уровням иерархии (9):

$$H(x) = - \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^{m_{lk}} P_l P_{lk}(i) \log P_{lk}(i), \quad (9)$$

Выражение (1) является частным случаем выражения (7) при  $L=1$  и характеризует одноуровневую систему.

Для характеристики степени организованности иерархической системы, введем коэффициент организации (10):

$$Q = 1 - \frac{H(x)}{H_{\max}}, \quad (10)$$

где  $H_{\max} = \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K H_{lk \max} = \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K \log m_{lk}$  - максимально возможное значение энтропии (неопределенности выбора) при равновероятном и независимом выборе альтернатив всеми управляющими элементами.

При этом теоретически идеально организованной системой является система, в которой все действуют по единому плану (без какой-либо свободы самостоятельных действий) и при этом полностью достигается цель управления  $P_{lk}(i) = \varphi(i) = 1$ ,  $H(x) = 0$  и  $Q = 1$ .

Рассмотрим модель двухуровневой системы управления (рис 1).

Пусть  $m_{l,K}$  - число альтернатив, рассматриваемых  $K$ -м управляющим органом  $l$ -го уровня иерархии.

Вероятность принятия  $i$ -й альтернативы управляющим органом  $(l+1)$ -го (верхнего) уровня иерархии, если  $i \in m_{(l+1)}$ , -  $P_{l+1}(x_i)$ , а условная вероятность принятия  $K$ -й альтернативы ОУ  $l$ -го (нижнего) уровня  $P_l(x_k/x_i)$  (рисунок).

Тогда полная безусловная двумерная вероятность принятия совместного решения органами управления верхнего и нижнего уровней вычисляется как (11)

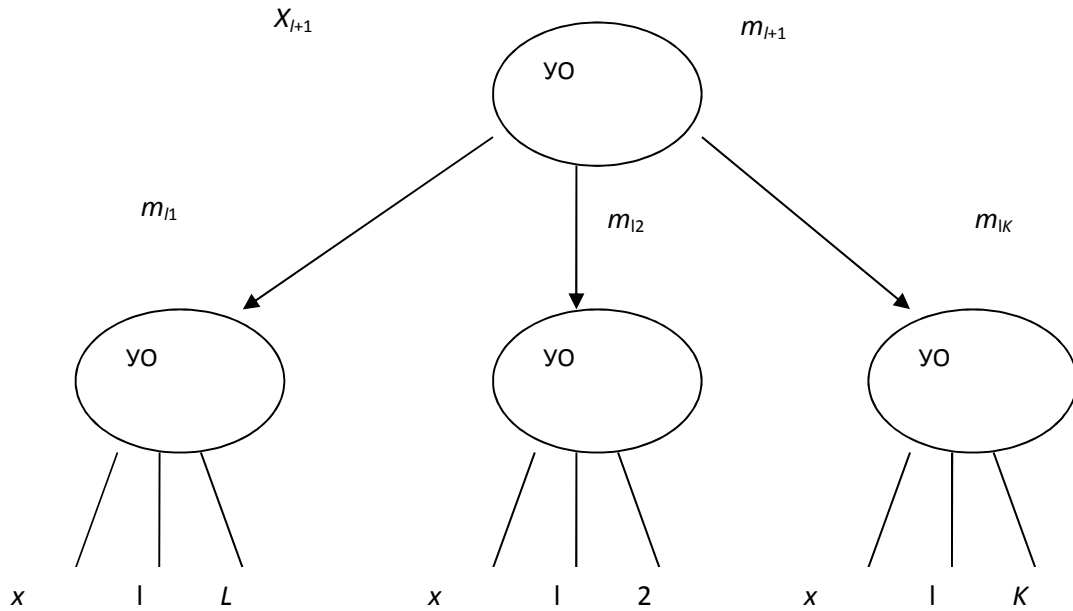
$$P_{l,l+1}(x_k, x_i) = P_{l+1}(x_i) P_l(x_k / x_i). \quad (11)$$

Энтропия (неопределенность) совместных решений  $i$ -го и  $K$ -го УО  $l$ -го и  $(l+1)$ -го уровней иерархии (12)

$$\begin{aligned} H_{l,l+1} &= - \sum_{i=1}^{m_{l+1,i}} \sum_{k=1}^{m_{l,k}} P_{l,l+1}(x_k, x_i) \log [P_{l,l+1}(x_k, x_i)] = \\ &= - \sum_{i=1}^{m_{l+1,i}} \sum_{k=1}^{m_{l,k}} P_{l+1}(x_i) P_l(x_k / x_i) \{ \log P_{l+1}(x_i) + P_l(x_k / x_i) \} \end{aligned} \quad (12)$$

Другой вариант определения энтропии можно получить следующим образом.

Условная вероятность принятия  $x_k$  альтернативы на  $l$ -м уровне иерархии (при условии, что была принята  $i$ -я альтернатива) -  $P_l(x_k / x_i)$ .



Модель двухуровневой системы управления

Введем понятие условной энтропии  $K$ -го УЭ,  $l$ -го уровня иерархии (условная по всем  $K$ -м альтернативам) (13)

$$H_{l,l+1} = - \sum_{k=1}^{m_k} P_l(x_k / x_i) \log \{P_l(x_k / x_i)\} \quad (13)$$

Тогда условная вероятность по всем возможным решениям  $i$ -го УЭ ( $l+1$ -го уровня) получим (14):

$$H^*_{l,l+1} = \sum_{i=1}^{m_{(l+1),i}} P_{l+1}(x_i) H^i_{l,l+1} = - \sum_{i=1}^{m_{(l+1),i}} \sum_{k=1}^{m_k} P_{l+1}(x_i) P_l(x_k / x_i) \log P_l(x_k / x_i) \quad (14)$$

Выражения (10) и (12) фактически отличаются только весом  $H^* \leq H$ .

Наконец, для двухуровневой системы, имеющей  $N$  - элементов  $l$ -го уровня иерархии и один УЭ ( $l+1$ -го уровня) полная энтропия системы равна сумме энтропий  $H_{l,l+1}$  (15):

$$H_{cy} = - \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{m_{(l+1),i}} \sum_{k=1}^{m_k} P_{(l+1)}(x_i) P_{l,n}(x_k / x_i) \{ \log P_{(l+1)}(x_i) + \log P_{l,n}(x_k / x_i) \}, \quad (15)$$

где  $P_{(l+1)}(x_i)$  — вероятность принятия  $i$ -й гипотезы из  $m_{(l+1)}$  управляющим элементом ( $l+1$ -го уровня);

$P_{l,n}(x_k / x_i)$  — условная вероятность принятия  $K$ -й гипотезы  $n$ -м управляющим элементом  $l$ -го уровня иерархии при условии, что на верхнем уровне принята  $i$ -я гипотеза,  $\forall k = \overline{1, m_{l,n}}$ ,  $\forall n = \overline{1, N}$ .

В случае независимости принятия решений по уровням иерархии (например, для элементов разных уровней, не подчиненных друг другу)  $P_{l,n}(x_k / x_i) = P_{l,n}(x_k)$ , т. е. условная вероятность превращается в безусловную (16):

$$H_{cy} = - \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{m_{(l+1)}} \sum_{k=1}^{m_{l,n}} P_{(l+1)}(x_i) P_{l,n}(x_k) \{ \log P_{(l+1)}(x_i) + \log P_{l,n}(x_k) \}, \quad (16)$$

Максимальное значение энтропии системы достигается в том случае, если все гипотезы равновероятны. Такой случай характерен, например, для начала планирования операций, когда априори (до принятия решения) можно считать все гипотезы равновероятными. В этом случае (17):

$$\begin{aligned} H_{cy\max} &= - \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{m_{(l+1)}} \sum_{k=1}^{m_{l,n}} \frac{1}{m_{(l+1)}} \frac{1}{m_{l,n}} \left[ \log \frac{1}{m_{(l+1)}} + \log \frac{1}{m_{l,n}} \right] = \\ &= \sum_{n=1}^N (\log m_{l,n} + \log m_{(l+1)}) \end{aligned} \quad (17)$$

Из общего выражения для энтропии системы (15) следует также, что для жестко организованной системы, когда нижнему уровню не предоставляется никакой свободы действий  $P_{l,n}(x_k / x_i) = 1$

$$H_{CV\min} = - \sum_{i=1}^{m_{l+1}} P_{l+1}(x_i) \log P_{l+1}(x_i), \quad (18)$$

т.е. минимальное значение энтропии определяется только неопределенностью выбора альтернативы (принятия решения) верхним уровнем иерархии (18).

$P_i(x_i)$  - может быть ассоциирована с адекватностью действий системы управления и определяться через эффективность функционирования  $P_i(x_i) = \varphi_i(i)$  [2].

В этом случае коэффициент организации системы -  $Q$  физически будет означать степень достижения системой поставленных целей (19):

$$Q = 1 - \frac{H(x)}{H_{\max}} ; 0 \leq Q \leq 1 \quad (19)$$

Следует помнить, что коэффициент организации системы -  $Q$  тем выше, чем большее число альтернатив рассматривается априори в начале процессов управления техническим обеспечением связи и автоматизации, в том числе с учетом противоборства двух систем, преследующих противоположные цели [8, 9, 10].

Как показано в [3] при ограниченном (счетном) множестве возможных действий противоборствующих сторон их оптимальные стратегии могут быть найдены на основе решения матричной игры в смешанных стратегиях.

При этом каждому варианту решения приписывается вероятность достижения цели при его принятии —  $P_{i,k}(i)$ . В этом случае, воспользовавшись выражением (15), можно вычислить энтропию принятия оптимальной стратегии и, в конечном итоге, согласно (19), определить степень организованности систем технического обеспечения связи и автоматизации специального назначения, функционирующих в сложных прогнозируемых условиях противодействующих факторов.

### Литература

1. *Боговик А.В., Одоевский С.М.* Новые информационные и сетевые технологии в системах управления военного назначения. СПб.: ВАС, 2010. 432 с.
2. *Боговик А.В., Игнатов В.В.* Теория управления в системах военного назначения. СПб.: ВАС, 2008. 460 с.
3. *Денисов А.А.* Информационные основы управления. Л.: Энергоатомиздат, 1983. 72 с.
4. Основы проектирования и эксплуатации автоматизированных систем управления военного назначения / под ред. док. тех. наук, профессора В. Л. Ляковского. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016.
5. *Ляковский В.Л., Алашеев М.А., Бутров В.А.* и др. Проектирование автоматизированных систем обработки информации и управления. Общесистемное проектирование и содержание работ по проектированию АСОИУ. Тверь: ВА ВКО, 2010.
6. *Алисевиц Е.А., Жадан О.П., Губская О.А., Стахеев И.Г.* Алгоритм оперативно-технического управления сети связи специального назначения на основе дискретно-событийной модели // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Сер.: Естественные и технические науки. 2017. № 7-8.
7. *Семенов С.С., Гусев А.П., Андреев С.Н.* Виртуализация распределенного пункта управления // Сборник XII всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014 «Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова». РАН. 2014.
8. К вопросу об автоматизации системы управления вооружёнными силами США. 2015. URL: <http://pentagonus.ru/> (дата обращения 11.10.2017).
9. *Новиков Д.А.* Теория управления организационными системами. М.: МПСИ, 2005. 584 с.
10. Основы теории управления в системах специального назначения / под ред. Ю.В. Бородакия, В.В. Масановца, М.: Управление делами Президента РФ, 2008. 400 с.

## THE METHODOLOGICAL APPROACH TO THE EVALUATION OF ORGANIZATION SYSTEMS TECHNICAL SUPPLY COMMUNICATION AND AUTOMATION SPECIAL PURPOSE

**Alexsandr V. Bogovik,**  
Saint-Petersburg, Russia,  
bogovikav@mail.ru

**Evgueniya A. Alisevich,**  
Russia, ezhilkina@yandex.ru

**Alexsey P. Gusev,**  
Russia, alexeygusew@mail.ru

### ABSTRACT

The work considers methodological approach to the evaluation of organization systems technical supply communication and automation special purpose, due to the fact that they belong to the class of controlled hierarchical systems functioning in complex foreseeable conditions of opposing factors. Suggested sequence of the operations (procedures) with the use of the figure of organization, reflecting the degree of achievement of goals. The factor of organization of the system is higher, the greater the number of alternatives considered a priori at the beginning of the process of management of technical communication and

automation systems, including taking into account the confrontation between the two systems, pursuing opposite goals. With a limited (countable) set of possible action Pro-voorthuysen of the parties, their optimal strategy can be found on the basis of the solution of the matrix game in mixed strategies. In addition, examples of the calculation of the uncertainty of the decisions, expressed via the entropy of the controls for a single-level, two-level and multilevel models control system of technical communication and automation special purpose. The maximum value of the entropy of the system is achieved if all hypotheses are equally probable. Such a case is typical, for example, to start the planning of operations, when a priori (before the decision) you can assume that all hypotheses are equally probable. In the General case, the entropy (the uncertainty of the solutions) of the governing body will have lower and upper bounds. After the control element has made the choice of a specific solution, a priori existed the uncertainty is removed. Each solution is assigned a probability of achieving the goal. In this case, it is possible to calculate the entropy of optimal strategies and, ultimately, to determine the degree of organization of engineering systems and automation special purpose, functioning in difficult conditions, the predicted opposing factors.

**Keywords:** controlled hierarchical system; indicator of organization of the system; the likelihood of a decision; the entropy of optimal strategies; communication.

#### References:

1. Bogovik A.V., Odoevskij S.M. *Novye informatsionnye i setevye tekhnologii v sistemakh upravleniya voennogo naznacheniya* [New information and network technologies in military control systems]. Saint-Petersburg: VAS, 2010. 432 p. (In Russian).
2. Bogovik A.V., Ignatov V.V. *Teoriya upravleniya v sistemakh voennogo naznacheniya* [The theory of management in military systems]. Saint-Petersburg: VAS, 2008. 460 p. (In Russian).
3. Denisov A.A. *Informatsionnye osnovy upravleniya* [Information bases of management]. Leningrad: Energo-atomizdat, 1983. 72 p. (In Russian).
4. V. L. Lyaskovskiy (Ed.) *Osnovy proektirovaniya i ehkspluatatsii avtomatizirovannykh sistem upravleniya voennogo naznacheniya* [Bases of design and operation of military automated control systems]. Moscow: MG TU im. N.EH. Baumana, 2016. (In Russian).
5. Lyaskovskiy V.L., Alashev M.A., Butrov V.A. and other *Proektirovanie avtomatizirovannykh sistem obrabotki informatsii i upravleniya. Obshhesistemnoe proektirovanie i sodержanie rabot po proektirovaniyu ASOIU* [Design of automated information processing systems and management. System-wide design and content of works on design of ASOIU]. Tver': VA VKO, 2010. (In Russian).
6. Alisevich E.A., ZHadan O.P., Gubskaya O.A., Stakhev I.G. Algoritm operativno-tekhnicheskogo upravleniya seti svyazi spetsial'nogo naznacheniya na osnove diskretno-sobytiynoj modeli [Algorithm of operating-technical management of a communication network of a special purpose on the basis of discrete and event model]. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki* [Modern science: current problems of the theory and practice]. 2017. № 7-8. (In Russian).
7. Semenov S.S., Gusev A.P., Andreyanov S.N. Virtualizatsiya raspredelenного punkta upravleniya. *Sbornik XII "Vserossijskoe soveshhanie po problemam upravleniya VSPU-2014"*. Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN. 2014. (In Russian).
8. *K voprosu ob avtomatizatsii sistemy upravleniya vooruzhyonnymi silami SSHA. 2015* [To a question of automation of a control system of armed forces of the USA]. 2015. URL: <http://pentagonus.ru/> (data of access 11.10.2017). (In Russian).
9. Novikov D.A. *Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami* [Theory of management of organizational systems]. Moscow: MPSI, 2005. 584 p. (In Russian).



10. Borodakiy Yu.V., Masanovets V.V. (Ed.) *Osnovy teorii upravleniya v sistemakh spetsial'nogo naznacheniya* [Bases of the theory of management in the systems of a special purpose]. Moscow: Upravlenie delami Prezidenta RF, 2008. 400 p. (In Russian).

**Information about authors:**

Bogovik A.V., PhD, professor of the Military Academy of Communications;

Alisevich E.A., PhD, associate professor of the Military Academy of Communications;

Gusev A.P., PhD, associate professor of the Military Academy of Communications.