

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-1-44-53

УДК 681.5

Метод оптимизации структуры в иерархических распределенных системах управления

Андрей Юрьевич Онуфрей¹, Александр Владимирович Разумов²,
Виталий Викторович Какаев³✉

^{1,2,3} Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация

¹ vka@mil.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6189-5886>

² vka@mil.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1208-2368>

³ vka@mil.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-9898-2740>

Аннотация

Предмет исследования. Предложено описание системы управления в виде ориентированного графа и способ формализации задачи выбора варианта структуры системы управления. Представлены результаты исследования иерархических распределенных систем управления на основе аналитических и статистических моделей оценивания показателей эффективности и оптимизации их структуры. Разработаны модель и метод оптимизации систем управления с иерархической структурой, позволяющих на основе синтеза опорного варианта однородной иерархической структуры провести оптимизацию системы управления с произвольной структурой. По сравнению с известными методами, допущение об однородности структуры системы управления дает возможность использовать аналитическое решение при выборе опорного плана в соответствии с предложенным критерием в векторном пространстве «оперативность–стоимость». **Метод.** Предложенный метод оптимизации базируется на доказательстве возможности исследования однородных иерархических распределенных систем управления аналитическими методами и получения зависимости стоимости и времени решения задач в системе управления от параметров ее структуры. Метод оптимизации структуры состоит из двух основных этапов. На первом этапе, в рамках аналитической модели, решаются прямая задача оптимизации по минимуму времени обработки при ограничении на стоимость и обратная задача оптимизации по минимуму стоимости при ограничении на время обработки. Результатом является выбор лучшего опорного плана однородной структуры системы управления. На втором этапе, на основе имитационного моделирования, решается задача определения «критических» участков (пунктов управления), ограничивающих эффективность функционирования системы управления. Найденные «критические» участки подлежат улучшению за счет изменения их структуры и введения новых технических решений, обеспечивающих заданные показатели эффективности всей системы управления. **Основные результаты.** Создана модель иерархической структуры системы управления. Показана процедура выбора опорного варианта и алгоритм модификации структуры системы управления. Приведен пример оптимизации структуры системы управления по критерию требуемой пропускной способности. Пример показал, что применение предложенного метода позволяет выбрать вариант структуры, удовлетворяющий выбранному критерию и заданным ограничениям. **Практическая значимость.** Представленный метод может быть применен на ранних этапах проектирования распределенных информационных систем управления при выборе вариантов их построения и обосновании требований к техническим характеристикам элементов структуры.

Ключевые слова

иерархическая распределенная система управления, аналитическая модель, имитационная модель, структура, синтез, выбор варианта, разрез в графе, критический участок, пропускная способность, оптимизация, критерий выбора

Ссылка для цитирования: Онуфрей А.Ю., Разумов А.В., Какаев В.В. Метод оптимизации структуры в иерархических распределенных системах управления // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 1. С. 44–53. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-1-44-53

A method of optimizing the structure of hierarchical distributed control systems

Andrey Yu. Onufrey¹, Alexander V. Razumov², Vitaliy V. Kakaev³✉

^{1,2,3} Mozhaisky Military Aerospace Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation

¹ vka@mil.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6189-5886>

² vka@mil.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1208-2368>

³ vka@mil.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-9898-2740>

Abstract

A description of the control system represented in the form of an oriented graph and a method for formalization of the problem of choosing a variant of the control system structure are proposed. The research results of hierarchical distributed control systems based on analytical and statistical models for evaluating performance indicators and optimizing their structure are presented. A model and a method for optimization control systems with a hierarchical structure have been developed which makes it possible to optimize a control system with an arbitrary structure based on the synthesis of a reference variant of a homogeneous hierarchical structure. In comparison with the known methods, the assumption of uniformity of the structure of the control system makes it possible to use an analytical solution when choosing a reference plan in accordance with the proposed criterion in the vector space “efficiency-cost”. The proposed optimization method is based on proving the possibility to analytically investigate homogeneous hierarchical distributed control systems and on establishing the dependency of the cost and time of task solving in the control system on the structure parameters. The method for optimizing the structure in hierarchical distributed control systems consists of two main stages. At the first stage, within the framework of the analytical model, the direct optimization problem is solved by minimizing the processing time with a cost constraint and the inverse optimization problem is solved by minimizing the cost with a processing time constraint. The result is the choice of the best reference plan for a homogeneous control system structure. At the second stage, based on simulation modeling, the problem of determining the “critical” areas (control points) that limit the effectiveness of the control system is solved. The found “critical” areas are subject to improvement by changing their structure and introducing new technical solutions that provide the specified performance indicators of the entire management system. A model of the hierarchical structure of the management system is given. The procedure for selecting the reference variant and the algorithm for modifying the structure of the control system are shown. An example of optimizing the structure of the control system is given according to the criterion of the required throughput. The example showed that the application of the proposed method allows choosing a variant of the structure of the control system that satisfies the selected criterion and the specified constraints. It is advisable to apply the proposed method at the early stages of designing distributed information control systems when choosing variants of their construction and substantiating requirements for the technical characteristics of structural elements.

Keywords

hierarchical distributed control system, analytical model, simulation model, structure, analytical synthesis, construction options, graph section, critical area, throughput, optimization, selection criteria

For citation: Onufrey A.Yu., Razumov A.V., Kakaev V.V. A method of optimizing the structure of hierarchical distributed control systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 1, pp. 44–53 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-1-44-53

Введение

Основными тенденциями при построении современных систем управления (СУ) являются распределенность, многосвязность, многофункциональность, использование искусственного интеллекта, новейших информационных и коммуникационных технологий. Принципы и способы построения таких СУ рассмотрены в работах [1–5]. Указанные тенденции способствовали повышению качественных характеристик СУ, но наряду с положительным эффектом внедрение новых решений значительно усложнило процесс их исследования и проектирования. Одна из важных задач при проектировании СУ — формирование возможных вариантов структуры и выбора наилучшего с точки зрения успешности решения поставленных задач. Данному вопросу посвящен ряд работ в России и за рубежом. Анализ их содержания показал, что большинство касаются вопросов моделирования процессов обработки информации и оценки эффективности функционирования [6–12], а также синтеза различных вариантов построения СУ [13–15]. Синтез структур СУ в настоящее время ведется в направлении применения методов аналитического и имитационного моделиро-

вания с использованием современных технологий и модельно-ориентированного проектирования, синтеза нелинейных СУ на основе квазилинейных моделей объектов. Работы [16–19] направлены на оптимизацию структур СУ на этапах выбора варианта из множества альтернатив. В [16, 17] рассмотрены модели и методы многокритериальной оптимизации СУ с иерархической структурой. В [18, 19] предложен метод выбора вариантов из однородных множеств и вероятностная модель задачи условной оптимизации.

Дальнейшее развитие распределенных иерархических СУ в настоящее время происходит в направлении совершенствования вычислительных средств (повышения быстродействия элементной базы и вычислительных устройств, надежности, снижения массогабаритных характеристик вычислительных средств), оптимизации протоколов обмена между пунктами управления и совершенствования алгоритмов обработки и передачи информации между потребителями. Данные исследования привели к возможности распределенной обработки данных на вычислительных средствах в иерархических СУ. Однако процессы обработки информации в условиях динамически изменяющейся информационной нагрузки и режимов эксплуатации,

с учетом важности и приоритетности решения задач в иерархических распределенных СУ, в настоящее время недостаточно исследованы. В связи с этим одной из важных задач остается оптимизация структуры СУ на основе формирования обобщенных моделей функционирования СУ и синтеза возможных вариантов ее структуры.

Постановка задачи исследования

Пусть задано множество W_S вариантов иерархических структур СУ:

$$W_S = (S, m_k : k = 1, S),$$

где S — число уровней управления в иерархии СУ; m_k — число пунктов на k -м уровне иерархии структуры.

Требуется выбрать вариант структуры из множества альтернатив, удовлетворяющих условиям выполнения целевой задачи СУ.

Решение проведем на основе реализации двухступенчатой процедуры оптимизации: выбора аналитическим способом опорного, упрощенного, варианта СУ и его дальнейшего направленного улучшения с использованием имитационного моделирования.

Выбор опорного варианта СУ

Представим структуру СУ в виде графа $G(X, Y)$, где X — множество вершин, соответствующих пунктам управления; Y — множество связей между пунктами. Для иерархических СУ структура графа представляет собой некоторую иерархию с несколькими уровнями управления. На рис. 1 показан граф СУ с k -уровнями управления, x_j^k — вершина графа, соответствующая j -му пункту управления k -го уровня иерархии СУ, $k = 1, S, j = 1, m_k$.

В опорном варианте иерархической структуры учтем следующие допущения:

— предположим, что иерархическая структура однородна, т. е. характеристики обработки задач пункта-

ми управления одного и того же уровня иерархии одинаковы и каждому пункту данного уровня функционально подчинено одинаковое число пунктов нижестоящего уровня иерархии;

— все потоки информации простейшие, времена поступления и обслуживания задач пунктами распределены по экспоненциальному закону, очереди задач для каждого пункта не ограничены, пункты работают безотказно.

Для расчета опорной однородной структуры решим двухпараметрическую задачу векторной оптимизации в факторном пространстве «время—стоимость» с взаимно противоположными критериями. В качестве показателя эффективности на первом этапе оптимизации выберем показатель T_{sum} суммарных затрат времени на решение задач пунктами управления иерархической структуры.

Тогда прямая задача векторной оптимизации сводится к определению иерархической структуры, при которой

$$\min_{S(m_k)} T_{sum}(S(m_k)),$$

при

$$C_{sum}(S(m_k)) \leq C_{доп}, \quad (1)$$

а обратная задача векторной оптимизации заключается в определении иерархической структуры, при которой

$$\min_{S(m_k)} C_{sum}(S(m_k)),$$

при

$$T_{sum}(S(m_k)) \leq T_{доп}, \quad (2)$$

где $S(m_k)$ — структура СУ; C_{sum} — суммарные затраты на создание и эксплуатацию пунктов управления иерархической структуры; $C_{доп}$, $T_{доп}$ — ограничения по стоимости и времени решения задач.

Выбранные показатели качества (T_{sum} , C_{sum}) связаны с параметрами иерархической структуры следующими соотношениями [14]:

$$T_{sum} = \sum_{k=1}^S (t_k n_k + t_{kk}) = \sum_{k=1}^S \left(\frac{\Lambda \prod_{j=1}^{k-1} g_j}{\mu_k (\mu_k m_k - \Lambda \prod_{j=1}^{k-1} g_j)} + t_{kk} \right),$$

$$n_k = \frac{\lambda_k}{\mu_k - \lambda_k}, \lambda_k = \frac{\Lambda}{m_k} \prod_{j=1}^{k-1} g_j, C_{sum} = \sum_{k=1}^S m_k C_k, \quad (3)$$

где $(t_k n_k)$, t_k , λ_k и n_k — средние затраты времени при решении всех задач, среднее время решения задачи, интенсивность потока поступающих задач и среднее число задач в пунктах управления k -го уровня; Λ — интенсивность суммарного потока задач управления; g_k — коэффициент интеграции, показывающий, какая часть задачи, поступившей на k -й уровень управления, будет передана на вышестоящий уровень; $\mu_k = 1/t_k$ и C_k — интенсивность решения задач и затраты на производство и эксплуатацию пунктов управления k -го уровня иерархии структуры; t_{kk} — среднее время координации действий пунктов управления k -го уровня иерархии со стороны вышестоящих.

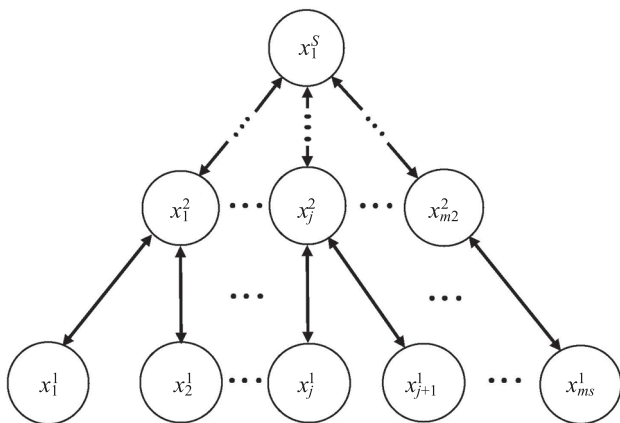


Рис. 1. Иерархическая структура системы управления, представленная в виде графа

Fig. 1. The hierarchical structure of the control system represented as a graph

Прямую и обратную задачи решим аналитически, методом неопределенных множителей Лагранжа. Функция Лагранжа для задачи (1) имеет вид:

$$L(m_k, \beta) = \sum_{k=1}^S (t_k n_k + t_{kk}) + \beta \left(\sum_{k=1}^S C_k m_k - C_{\text{доп}} \right),$$

где β — неопределенный множитель Лагранжа.

Возьмем частные производные по переменным β и m_k ($k = \overline{1, S}$), тогда, с учетом выражений (3), получим систему из $(S + 1)$ уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial L(m_k, \beta)}{\partial m_k} = - \frac{\Lambda \prod_{j=1}^{k-1} g_j}{\left(\mu_k m_k - \Lambda \prod_{j=1}^{k-1} g_j \right)^2} + \beta C_k \\ \frac{\partial L(m_k, \beta)}{\partial \beta} = \sum_{k=1}^S C_k m_k - C_{\text{доп}} \end{cases} \quad (4)$$

В результате решения системы уравнений (4) относительно переменных m_k для различных значений $S = \overline{2, S_{\max}}$ определим иерархические структуры $W_S^* = (S^*, m_k^*; k = \overline{1, S})$, $S = \overline{2, S_{\max}}$ удовлетворяющие условиям задачи (1).

Аналогично, решая задачу (2), получим иерархические структуры $W_S^{**} = (S^{**}, m_k^{**}; k = \overline{1, S})$, $S = \overline{2, S_{\max}}$, удовлетворяющие условиям задачи (2), а также оптимальные значения показателей:

$$T^0 = \min T_{\text{sum}}(W_S), C^0 = \min C_{\text{sum}}(W_S), \\ W_S \in \{W_S^*, W_S^{**}; S = \overline{2, S_{\max}}\}.$$

Окончательный выбор опорного варианта иерархической структуры W_{S_0} произведем после нормировки и аддитивной свертки показателей $T_{\text{sum}}, C_{\text{sum}}$:

$$W_{S_0} = \underset{\{W_S^*, W_S^{**}\}}{\operatorname{argmax}} \left\{ \alpha_1 \frac{T^0}{T_{\text{sum}}(W_S)} + \alpha_2 \frac{C^0}{C_{\text{sum}}(W_S)} \right\} = \\ = \underset{\{W_S^*, W_S^{**}\}}{\operatorname{argmax}} \{NOR_{C,T}(W_S)\}, S = \overline{2, S_{\max}}, \quad (5)$$

где α_1, α_2 — коэффициенты равнозначности нормированных показателей времени решения задач управления и стоимости (издержек); $NOR_{C,T}(W_S)$ — значение аддитивной свертки нормированных показателей затрат времени и стоимости СУ.

Таким образом, в результате решения задач (1) и (2) определим оптимальную однородную иерархическую структуру W_{S_0} , принимаемую в качестве опорного варианта для дальнейших исследований.

Оптимизация структуры СУ на основе имитационного моделирования

На основе предложенной постановки задач (1) и (2) и аналитической модели (3) сформируем опорный вариант СУ в виде однородной иерархической структуры W_S , который совершенствуем на основе имитационного моделирования (второй этап оптимизации). При этом СУ из однородной иерархической структуры, как правило, преобразуется в СУ с неоднородной структурой.

На данном этапе оптимизации структуры СУ используем более сложные показатели (чем «время-стоимость»), отражающие целенаправленные процессы, решаемые в СУ, например: пропускная способность СУ, вероятность достижения цели управления, коэффициент сохранения эффективности. Процесс ее преобразования предполагает выполнение нескольких шагов.

Шаг 1. Выполним оценивание показателей эффективности отдельных пунктов обработки информации (узлов) в структуре СУ для ее текущего варианта построения (при первом выполнении — опорный вариант).

Шаг 2. Проведем сравнение показателей. Если полученные показатели эффективности не соответствуют требуемым, то выполним шаг 3. А если соответствует — то структура СУ не требует дальнейшего совершенствования и алгоритм завершается.

Шаг 3. Определим пункты обработки информации, ограничивающие эффективность функционирования СУ — выполним поиск узлов и дуг в графе, «сдерживающие» общий поток информации СУ. В результате найдем путь (множество дуг и узлов) в графе СУ с наименьшей пропускной способностью (находится минимальный разрез графа).

Далее решим задачу перераспределения ресурсов в структуре СУ: выполним изменения количества пунктов обработки информации на уровнях управления и их характеристик; объединение информации в соответствии с логикой работы СУ и перераспределение потоков между пунктами обработки информации с последующим оцениванием показателей эффективности.

Процесс поиска оптимального решения представляет собой проведение нескольких итераций (повторяющихся действий) с шагами 2–4 алгоритма до достижения требуемых показателей эффективности путем направленного перебора. В случае отсутствия искомого результата выбирается новый опорный вариант СУ при менее «жестких» ограничениях задач (1) и (2), т. е. при увеличении допустимого времени решения задач или/и увеличении допустимой стоимости СУ.

Задача определения критического участка в структуре СУ и поиска пунктов обработки информации, ограничивающих поток информации, относится к задачам оценки потоков в сетях и может быть решена на основе определения разреза в графе с минимальной пропускной способностью [20].

Процесс преобразования опорного варианта структуры СУ может быть представлен в виде алгоритма, основанного на нахождении «критических участков» опорного варианта, у которых необходимо улучшить характеристики для достижения требуемых показателей эффективности СУ.

Алгоритм имеет следующие шаги.

Шаг 1. Выполним оценку начального уровня эффективности K_0 опорного варианта СУ. В ходе этой оценки определим начальные значения показателей эффективности $K^{cu} := K_0$ и пунктов управления K_{ks} , где K_{ks} — показатель эффективности k -го узла s -уровня в структуре СУ. В качестве показателей K^{cu} (K_0), K_{ks} , могут быть приняты: пропускная способность СУ и вероятность выполнения задач управления, которые определяются на основе имитационного моделиро-

вания путем подсчета количества решенных задач в каждом пункте управления СУ.

Шаг 2. Проведем проверку условия $K^{СУ} \geq K^{СУтр}$, где $K^{СУтр}$ — требуемое значение показателя эффективности. Если условие выполняется, то при принятых технических решениях СУ удовлетворяет требованиям (завершение работы алгоритма). В противном случае определяются критические участки в структуре СУ (шаг 3).

Шаг 3. Определение «критического участка» в структуре СУ (нахождение минимального разреза графа) и улучшение структуры СУ.

В узлах критического участка структуры СУ последовательно по мере возрастания стоимости путем моделирования исследуем варианты изменения информационных связей между пунктами управления «критического участка» и/или замены технических средств с улучшенными характеристиками. Для нового варианта структуры рассчитаем стоимость C_{sum} в соответствии с выражением (3) и показатель эффективности $K^{СУ}$:

$$K^{СУ} = K^{СУ} + \sum_{(k)} \sum_{(j)} \sum_{(r)} \Delta K_{kjr} \geq K^{СУтр},$$

где ΔK_{kjr} — прирост значения показателя эффективности j -го узла, k -уровня в структуре СУ за счет применения r -го технического средства.

Шаг 4. Осуществим проверку условия завершения алгоритма.

Если выявленный «критический участок» в структуре СУ остался прежним (при этом выполнено условие $K^{СУ} < K^{СУтр}$), то выполним переход к выбору нового опорного варианта (это является признаком окончания работы алгоритма), так как все мероприятия по улучшению структуры исчерпаны.

Если выявленный «критический участок» в структуре СУ — новый (т. е. за счет этого участка улучшение структуры СУ происходит впервые), то выполним переход к следующей итерации, к шагу 2, для улучшения структуры при нахождении нового «критического участка».

Таким образом, сформирован вариант структуры СУ, обеспечивающий минимум ее стоимости при требуемом показателе эффективности:

$$\min_{S(m_k)} C_{sum}(S(m_k)), \text{ при } K^{СУ} \geq K^{СУтр}.$$

Выбранный вариант структуры СУ отвечает критерию достаточности по показателю эффективности.

Пример оптимизации структуры системы управления

В соответствии с двухступенчатой процедурой оптимизации первоначально найдем опорный вариант структуры СУ. По условиям решения задачи выбора опорного варианта структуры (1), (2) известны следующие исходные данные (табл. 1).

Результаты решения системы уравнений (4) относительно переменных m_k для значений $S = 2, 3, 4$ и удовлетворяющие условиям задачи (1), по минимуму времени решения задач в СУ с учетом ограничения по стоимости, представлены в табл. 2. В каждой строке таблицы

Таблица 1. Исходные данные для расчета опорной однородной структуры системы управления

Table 1. Initial data for the calculation of the reference homogeneous control system structure

S	k	g_k	μ_k , 1/ч	t_{kk} , ч	C_k , тыс. усл. ед.
2	1	0,45	10,0	0,02	25
	2	1,0	15,0	0,01	30
3	1	0,3	10,0	0,02	25
	2	1,0	15,0	0,01	30
	3	1,0	15,0	0,01	35
4	1	0,3	10,0	0,02	25
	2	1,0	15,0	0,01	30
	3	1,0	15,0	0,01	35
	4	1,0	15,0	0,01	49

Примечание: $\Lambda = 22,0$ 1/ч; $\alpha_1 = \alpha_2 = 0,5$; $S_{\max} = 4$; $C_{\text{доп}} = 300$ тыс. усл. ед., $T_{\text{доп}} = 0,2$ ч.

для выбранного $C_{\text{доп}}$ представлены: количество пунктов управления (т. е. вариант структуры СУ) на каждом уровне иерархии m_1-m_2 (при $S = 2$), $m_1-m_2-(m_3)$ (при $S = 3$), $m_1-m_2-(m_3)-(m_4)$ (при $S = 4$), а также затраты на создание и эксплуатацию пунктов управления иерархической структуры C_{sum} , суммарное время на решение задач пунктами управления иерархической структуры T_{sum} и значение аддитивной свертки нормированных показателей затрат времени и стоимости СУ — $NOR_{C,T}$. Расчет C_{sum} , T_{sum} и $NOR_{C,T}$ выполним в соответствии с выражениями (3) и (5). Если $T_{sum} > T_{\text{доп}}$ или $C_{sum} > C_{\text{доп}}$, то в ячейке таблицы вместо $NOR_{C,T}$ будет указано соответствующее, невыполненное, условие по $T_{\text{доп}}$ или $C_{\text{доп}}$.

Анализ расчетов показал, что варианты структуры СУ, удовлетворяющие ограничению задачи (1), $C_{sum} \leq C_{\text{доп}}$, соответствуют множеству $W_S^* = (S^*, m_k^* : k = \overline{1, S})$, $S = \overline{2, S_{\max}}$ и в табл. 2 отмечены двойной линией:

$$W_S^* = (9-1, 10-1, 6-2-(1), 7-2-(1), 7-3-(1)).$$

Результаты решения задачи (2), по минимуму стоимости с учетом ограничения по времени решения задач, представлены в табл. 3. В каждой строке таблицы для выбранного $T_{\text{доп}}$ приведены варианты структуры СУ ($m_1-m_2-(m_3)-(m_4)$ и т. д.) по форме, аналогичной табл. 2.

Анализ расчетов (табл. 3), показал, что варианты структуры, удовлетворяющие ограничению задачи (2), $T_{sum} \leq T_{\text{доп}}$, соответствуют множеству $W_S^{**} = (S^{**}, m_k^{**} : k = \overline{1, S})$, $S = \overline{2, S_{\max}}$ — отмечены двойной линией:

$$W_S^{**} = (7-3-(1), 8-2-(1), 7-2-(1), 6-2-(1), 10-1, 9-1).$$

Проведем окончательный выбор опорного варианта иерархической структуры W_{S0} из полученных множеств W_S^* , W_S^{**} по критерию максимума значения аддитивной свертки нормированных показателей затрат времени и стоимости СУ T_{sum} , C_{sum} в соответствии с выражением (5):

$$W_{S0} = \underset{\{W_S^*, W_S^{**}\}}{\operatorname{argmax}} \{NOR_{C,T}(W_S)\} = (S^0 = 3, m_k^0 = (7-3-1))$$

при $NOR_{C,T}(W_{S0}) = 0,519$.

Таблица 2. Результаты расчета опорной однородной структуры системы управления по минимуму времени решения задач с учетом ограничения по стоимости

Table 2. The calculation results of the reference homogeneous control system structure by minimizing the processing time with a cost constraint

$C_{\text{доп}}$, тыс. усл. ед.	Содержание ячейки таблицы	$S = 2$	$S = 3$	$S = 4$
240	$m_1-m_2-(m_3)-(m_4)$ C_{sum} T_{sum} $NOR_{C,T}$	8-1 230 0,201 $T_{\text{sum}} > T_{\text{доп}}$	7-1-(1) 240 0,210 $T_{\text{sum}} > T_{\text{доп}}$	5-1-(1)-(1) 239 0,296 $T_{\text{sum}} > T_{\text{доп}}$
260	$m_1-m_2-(m_3)-(m_4)$ C_{sum} T_{sum} $NOR_{C,T}$	9-1 255 0,195 0,478	6-2-(1) 245 0,176 0,516	5-1-(1)-(1) 239 0,296 $T_{\text{sum}} > T_{\text{доп}}$
280	$m_1-m_2-(m_3)-(m_4)$ C_{sum} T_{sum} $NOR_{C,T}$	10-1 280 0,191 0,465	7-2-(1) 270 0,164 0,518	5-2-(1)-(1) 269 0,262 $T_{\text{sum}} > T_{\text{доп}}$
300	$m_1-m_2-(m_3)-(m_4)$ C_{sum} T_{sum} $NOR_{C,T}$	10-1 280 0,191 0,465	7-3-(1) 300 0,153 0,519	6-2-(1)-(1) 294 0,241 $T_{\text{sum}} > T_{\text{доп}}$
320	$m_1-m_2-(m_3)-(m_4)$ C_{sum} T_{sum} $NOR_{C,T}$	11-1 305 0,188 $C_{\text{sum}} > C_{\text{доп}}$	9-2-(1) 320 0,150 $C_{\text{sum}} > C_{\text{доп}}$	7-2-(2)-(1) 354 0,196 $C_{\text{sum}} > C_{\text{доп}}$

В табл. 2 и 3 оптимальная однородная иерархическая структура СУ W_{S0} , с соответствующими значениями $C_{\text{sum}} = 300$ тыс. усл. ед., $T_{\text{sum}} = 0,153$ ч, $NOR_{C,T} = 0,519$, отмечена двойной «жирной» линией.

Таким образом, найден опорный вариант структуры СУ, в которой получено три уровня управления: 7 пунктов управления на первом уровне, три пункта управления — на втором и один пункт управления — на третьем. Так как 7 пунктов управления первого уровня не распределяются равномерно между пунктами второго уровня, то на один из пунктов управления второго уровня будет замыкаться три пункта управления первого уровня (рис. 2, а). Данная неоднородность будет учтена при имитационном моделировании — на втором этапе оптимизации.

На втором этапе оптимизации структуры СУ использованы показатели эффективности, в качестве которых рассмотрены пропускные способности [21] пунктов управления — K_j^k и СУ в целом — $K^{\text{СУ}}$. Под пропускной способностью в данном примере понимаем долю задач, решенных на пунктах управления (в СУ) относительно всех поступивших за время моделирования $T_{\text{мод}}$ задач. Зададим требуемые значения пропускных способностей пунктов управления — $K_j^{k \text{ тр}}$, и СУ в целом — $K^{\text{СУ тр}}$. Кроме того, в отличие от первого этапа, время обслуживания задач на пунктах управления примем распределенным по нормальному закону с параметрами a_j^k и σ_j^k , что устраняет принятое ранее упрощение об экспоненциальном законе распределения времени обслуживания задач.

С учетом исходных данных первого этапа (табл. 1), выбранного опорного варианта структуры СУ $W_S^0 =$

$= (7-3-(1))$ и выражения (3) для λ_k , получим значения исходных данных имитационного моделирования (табл. 4).

Получены результаты имитационного моделирования (пропускные способности пунктов управления) опорного варианта структуры СУ: $K_1^3 = 0,69$; $K_1^2 = K_2^2 = 0,89$; $K_3^2 = 0,84$; $K_1^1 - K_7^1 = 0,76$. В соответствии с алгоритмом поиска определены пункты управления, ограничивающие пропускную способность СУ, а именно x_1^3 с пропускной способностью $K_1^3 = K^{\text{СУ}} = 0,69$, что меньше требуемого значения $K^{\text{СУ тр}} = 0,7$.

Данный узел (x_1^3) находится в составе «критического участка» структуры СУ, включающего следующие пункты управления: $x_1^3 - x_3^2 - (x_5^1 - x_7^1)$ (рис. 2, а). Дальнейшее улучшение структуры выполним путем изменения информационных связей между пунктами управления «критического участка» и замены технических средств с улучшенными характеристиками:

- x_5^1 переклещивается на x_1^2 , x_6^1 переклещивается на x_2^2 ;
- x_3^2 исключается из структуры СУ, а оставшийся пункт управления x_7^1 подключается непосредственно к x_1^3 ;

- за счет стоимости исключенного пункта управления x_3^2 , улучшаются характеристики x_1^2 и x_2^2 (уменьшается коэффициент интеграции $g_2 = 0,5$, показывающий какая часть задачи, поступившей на 2-й уровень управления, будет передана на вышестоящий уровень x_1^3) в пределах заданной стоимости СУ $C_{\text{доп}} = 300$ тыс. усл. ед.

С учетом проведенных изменений структура СУ представлена на рис. 2, б, а исходные данные для имитационного моделирования — в табл. 5.

Таблица 3. Результаты расчета опорной однородной структуры системы управления по минимуму стоимости с учетом ограничения по времени решения задач

Table 3. The calculation results of the reference homogeneous control system structure by minimizing the cost with a processing time constraint

$T_{\text{доп}}, \text{ч}$	Содержание ячейки таблицы	$S = 2$	$S = 3$	$S = 4$
0,150	$m_1-m_2-(m_3)-(m_4)$ C_{sum} T_{sum} $NOR_{C,T}$	$C_{\text{sum}} > C_{\text{доп}}$	9-2-(1) 320 0,150 $C_{\text{sum}} > C_{\text{доп}}$	15-4-(3)-(1) 649 0,149 $C_{\text{sum}} > C_{\text{доп}}$
0,155	$m_1-m_2-(m_3)-(m_4)$ C_{sum} T_{sum} $NOR_{C,T}$	$C_{\text{sum}} > C_{\text{доп}}$	7-3-(1) 300 0,153 0,519	14-4-(3)-(1) 624 0,151 $C_{\text{sum}} > C_{\text{доп}}$
0,160	$m_1-m_2-(m_3)-(m_4)$ C_{sum} T_{sum} $NOR_{C,T}$	99-1 2005 0,159 $C_{\text{sum}} > C_{\text{доп}}$	8-2-(1) 295 0,156 0,518	14-3-(2)-(1) 559 0,160 $C_{\text{sum}} > C_{\text{доп}}$
0,165	$m_1-m_2-(m_3)-(m_4)$ C_{sum} T_{sum} $NOR_{C,T}$	66-1 1680 0,165 $C_{\text{sum}} > C_{\text{доп}}$	7-2-(1) 270 0,164 0,518	13-3-(2)-(1) 534 0,163 $C_{\text{sum}} > C_{\text{доп}}$
...	...	...	...	...
0,195	$m_1-m_2-(m_3)-(m_4)$ C_{sum} T_{sum} $NOR_{C,T}$	10-1 280 0,191 0,465	6-2-(1) 245 0,176 0,516	8-2-(2)-(1) 379 0,188 $C_{\text{sum}} > C_{\text{доп}}$
0,200	$m_1-m_2-(m_3)-(m_4)$ C_{sum} T_{sum} $NOR_{C,T}$	9-1 255 0,195 0,478	6-2-(1) 245 0,176 0,516	7-2-(2)-(1) 354 0,196 $C_{\text{sum}} > C_{\text{доп}}$
0,205	$m_1-m_2-(m_3)-(m_4)$ C_{sum} T_{sum} $NOR_{C,T}$	8-1 230 0,201 $T_{\text{sum}} > T_{\text{доп}}$	5-2-(1) 220 0,203 $T_{\text{sum}} > T_{\text{доп}}$	7-2-(2)-(1) 354 0,196 $C_{\text{sum}} > C_{\text{доп}}$

Таблица 4. Исходные данные для имитационного моделирования опорного варианта структуры системы управления

Table 4. Initial data for the simulation modeling of the reference variant of the control system structure

S	x_j^k	g_k	$\lambda_k, 1/\text{ч}$	$a_j^k, \text{мин}$	$\sigma_j^k, \text{мин}$	$C_k, \text{тыс. усл. ед.}$
3	x_1^3	1,0	6,59	4,0	1,5	35
2	x_1^2, x_2^2 x_3^2	1,0 1,0	1,89 2,83	4,0 4,0	1,5 1,5	30 30
1	$x_1^1, \dots, x_7^1$	0,3	3,14	6,0	2,0	25

Примечание: $\Lambda = 22,0 \text{ 1/ч}$; $C_{\text{доп}} = 300 \text{ тыс. усл. ед.}$; $K_j^k \text{ тр} = K^{\text{сутр}} = 0,7$; $T_{\text{мод}} = 500 \text{ ч}$.

Таблица 5. Исходные данные для имитационного моделирования скорректированного варианта структуры системы управления

Table 5. Initial data for the simulation modeling of the corrected variant of the control system structure

S	x_j^k	g_k	$\lambda_k, 1/\text{ч}$	$a_j^k, \text{мин}$	$\sigma_j^k, \text{мин}$	$C_k, \text{тыс. усл. ед.}$
3	x_1^3	1,0	3,77	4,0	1,5	35
2	x_1^2, x_2^2	0,5	2,83	4,0	1,5	45
1	$x_1^1, \dots, x_7^1$	0,3	3,14	6,0	2,0	25

Примечание: $\Lambda = 22,0 \text{ 1/ч}$; $C_{\text{доп}} = 300 \text{ тыс. усл. ед.}$; $K_j^k \text{ тр} = K^{\text{сутр}} = 0,7$; $T_{\text{мод}} = 500 \text{ ч}$

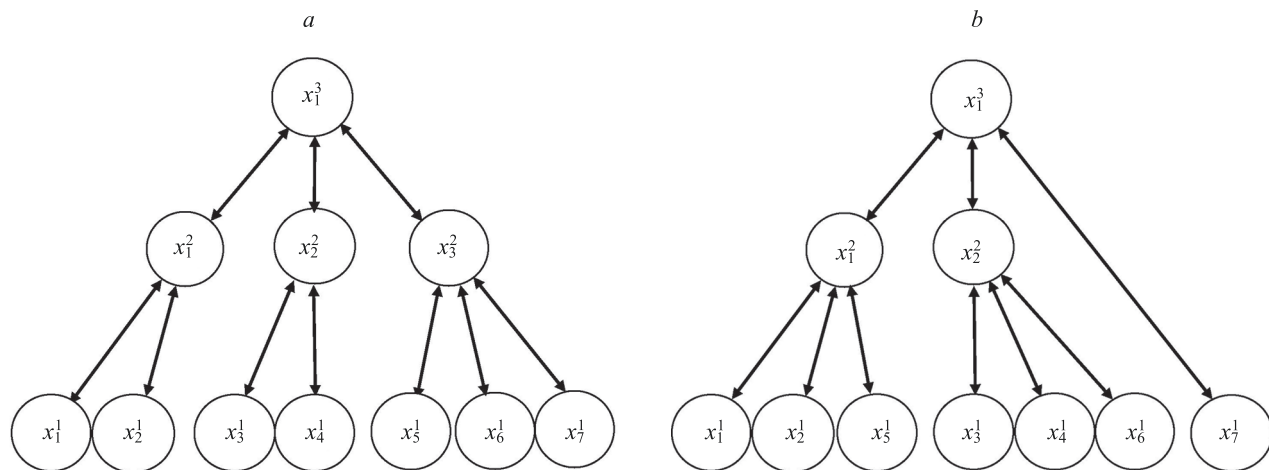


Рис. 2. Опорный вариант структуры системы управления (а), скорректированный (по результатам имитационного моделирования) вариант структуры системы управления (б)

Fig. 2. The reference variant of the control system structure (a), corrected variant of the control system structure (based on the results of simulation modeling) (b)

В результате имитационного моделирования скорректированного варианта структуры СУ получены значения пропускной способности пунктов управления: $K_1^3 = 0,79$; $K_1^2 = K_2^2 = 0,84$; $K_1^1 - K_7^1 = 0,76$. Полученные показатели эффективности пунктов управления — K_j^k и СУ в целом — $K^{СУ}$ больше требуемых значений $K_j^{k\text{тр}} = K^{СУ\text{тр}} = 0,7$.

Таким образом, сформирован вариант структуры СУ, соответствующий критерию достаточности по показателю эффективности — $K^{СУ} \geq K^{СУ\text{тр}}$.

Заключение

Совершенствование технических средств обработки и передачи данных привело к качественному изменению принципов управления в системах целенаправленных процессов, что в значительной мере расширило возможности отдельных элементов в структуре систем управления при решении задач управления. В связи с этим вопросы моделирования и исследования на моде-

лях различных вариантов структур систем управления с учетом взаимного влияния составных частей — актуальны и требуют разработки новых методов исследования с учетом декомпозиции структуры и нахождения новых нетрадиционных подходов.

Предложенный метод представляет собой двухуровневую процедуру оптимизации, позволяющую на основе аналитической модели систем управления выбрать наилучший базовый (опорный) вариант ее построения для частного случая, когда структура является иерархической и однородной. Далее, с помощью декомпозиции структуры, можно осуществить переход к исследованию системы управления с произвольной структурой и последующей ее оптимизации. Метод основан на определении критического участка в структуре систем управления с точки зрения обеспечения требуемой эффективности управления с последующим перераспределением вычислительных ресурсов и формированием очередного плана для исследований до достижения требуемых показателей эффективности.

Литература

1. Иванов Д.А., Иванова М.А., Соколов Б.В. Анализ тенденций изменения принципов управления предприятиями в условиях развития технологий Индустрии 4.0 // Труды СПИИРАН. 2018. № 5(60). С. 97–127. <https://doi.org/10.15622/sp.60.4>
2. Цветков В.Я., Алпатов А.Н. Проблемы распределенных систем // Перспективы науки и образования. 2014. № 6(12). С. 31–36.
3. Шведенко В.Н., Мозохин А.Е. Концепция управления сетевой структурой интеллектуальных устройств в условиях цифровой трансформации энергетической отрасли // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21. № 5. С. 748–754. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-5-748-754>
4. Tang B., Chen Z., Hefferman G., Wei T., He H., Yang Q. A hierarchical distributed fog computing architecture for big data analysis in smart cities // Proc. of the ASE BigData & SocialInformatics. 2015. P. 28. <https://doi.org/10.1145/2818869.2818898>
5. Oesterreich T.D., Teuteberg F. Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of research agenda for the

References

1. Ivanov D.A., Ivanova M.A., Sokolov B.V. Analysis of transformation trends in enterprise management principles in the era of industry 4.0 technology. *SPIIRAS Proceedings*, 2018, no. 5(60), pp. 97–127. (in Russian). <https://doi.org/10.15622/sp.60.4>
2. Tsvetkov V.Y., Alpatov A.N. Problems of distributed systems. *Perspectives of Science and Education*, 2014, no. 6(12), pp. 31–36. (in Russian)
3. Shvedenko V.N., Mozokhin A.E. The concept of managing the network structure of intelligent devices in the digital transformation of the energy industry. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 5, pp. 748–754. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-5-748-754>
4. Tang B., Chen Z., Hefferman G., Wei T., He H., Yang Q. A hierarchical distributed fog computing architecture for big data analysis in smart cities. *Proc. of the ASE BigData & SocialInformatics*, 2015, pp. 28. <https://doi.org/10.1145/2818869.2818898>
5. Oesterreich T.D., Teuteberg F. Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A

- construction industry // *Computers in Industry*. 2016. V. 83. P. 121–139. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.09.006>
6. Чуканов С.Н. Моделирование структуры сложной системы на основе оценивания меры взаимодействия подсистем // Компьютерные исследования и моделирование. 2020. Т. 12. № 4. С. 707–719. <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2020-12-4-707-719>
 7. Доронина Ю.В., Скاتков А.В. Каскадно-иерархическое моделирование в задачах анализа динамики ресурсных характеристик сложных систем // Информационно-управляющие системы. 2020. № 3(106). С. 48–58. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2020-3-48-58>
 8. Новиков Д.А. Аналитическая сложность и погрешность решения задач управления организационно-техническими системами // Автоматика и телемеханика. 2018. № 5. С. 107–118.
 9. Буков В.Н., Бронников А.М., Агеев А.М., Гамаюнов И.Ф. Аналитический подход к формированию конфигураций технических систем // Автоматика и телемеханика. 2017. № 9. С. 67–83.
 10. Трегубов Р.Б., Алексиков Ю.Г., Сaitов С.И. Представление иерархических многоуровневых маршрутизируемых систем в теоретико-множественном базисе // Труды СПИИРАН. 2016. № 3(46). С. 139–168. <https://doi.org/10.15622/SP.46.15>
 11. Ашимов А.А., Гейда А.С., Лысенко И.В., Юсупов Р.М. Эффективность функционирования и другие операционные свойства систем: задачи и метод оценивания // Труды СПИИРАН. 2018. № 5(60). С. 241–270. <https://doi.org/10.15622/sp.60.9>
 12. Нетес В.А. Двусторонние оценки коэффициента сохранения эффективности систем с выходным эффектом, зависящим от числа исполнительных элементов // Автоматика и телемеханика. 2018. № 11. С. 99–105. <https://doi.org/10.31857/S000523100002746-9>
 13. Доронина Ю.В., Рябовая В.О., Чесноков Д.И. Применение модельно-ориентированного проектирования для решения задачи структурного синтеза // Труды СПИИРАН. 2016. № 6(49). С. 122–143. <https://doi.org/10.15622/sp.49.7>
 14. Багрецов С.А., Везилов В.Н., Львов В.М. и др. Технология синтеза организационных структур сложных систем управления. М. ГУП «ВНИИ межотраслевой информации – федеральный информационно-аналитический центр оборонной промышленности», Академия оборонных отраслей промышленности, ГУП «Межотраслевой центр эргономических исследований и разработок в военной технике «Эргоцентр», 1998. 224 с.
 15. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. М.: Физматлит, 2009. 280 с.
 16. Рапопорт Э.Я., Плешивцева Ю.Э. Метод многокритериальной оптимизации управляемых систем с распределенными параметрами // Труды СПИИРАН. 2018. № 5(60). С. 64–96. <https://doi.org/10.15622/sp.60.3>
 17. Губко М.В. Модели и методы оптимизации структуры иерархических систем обработки информации: диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук: 05.13.01 / Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. М., 2014. 372 с.
 18. Кандырин Ю.В., Шкурина Г.Л. Формирование частичных порядков вариантов для выбора оптимальных альтернатив в однородных множествах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 3. С. 476–482. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2015-15-3-476-482>
 19. Тимофеева Г.А. Вероятностные решения задач условной оптимизации // Труды института математики и механики УРО РАН. 2020. Т. 26. № 1. С. 198–211. <https://doi.org/10.21538/0134-4889-2020-26-1-198-211>
 20. Форд А., Фалкерсон Д. Потоки в сетях. М.: Мир, 1966. 276 с.
 21. Вентцель Е.С. Исследование операций. М.: Советское радио, 1972. 407 с.
 - triangulation approach and elements of research agenda for the construction industry. *Computers in Industry*, 2016, vol. 83, pp. 121–139. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.09.006>
 6. Chukanov S.N. Modeling the structure of a complex system based on estimation of the measure of interaction of subsystems. *Computer Research and Modeling*, vol. 12, no. 4, pp. 707–719. (in Russian). <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2020-12-4-707-719>
 7. Doronina Y., Skatkov A. Cascade-hierarchical modeling in analyzing the dynamics of complex system resource characteristics. *Information and Control Systems*, 2020, no. 3(106), pp. 48–58. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2020-3-48-58>
 8. Novikov D.A. Analytical complexity and errors of solving control problems for organizational and technical systems. *Automation and Remote Control*, 2018, vol. 79, no. 5, pp. 860–869. <https://doi.org/10.1134/s0005117918050077>
 9. Bukov V.N., Bronnikov A.M., Ageev A.M., Gamayunov I.F. An analytic approach to constructing configurations of technical systems. *Automation and Remote Control*, 2017, vol. 78, no. 9, pp. 1600–1613. <https://doi.org/10.1134/s0005117917090053>
 10. Tregubov R.B., Aleksikov Y.G., Saitov S.I. Representation of the hierarchical multilayer routing systems in a set-theoretic base. *SPIIRAS Proceedings*, 2016, no. 3(46), pp. 139–168. (in Russian). <https://doi.org/10.15622/SP.46.15>
 11. Ashimov A.A., Geida A.S., Lysenko I.V., Yusupov R.M. System functioning efficiency and other system operational properties: research problems, evaluation method. *SPIIRAS Proceedings*, 2018, no. 5(60), pp. 241–270. (in Russian). <https://doi.org/10.15622/sp.60.9>
 12. Netes V.A. Bilateral estimates of the effectiveness retention ratio of the systems with output effect depending on the number of executive elements. *Automation and Remote Control*, 2018, vol. 79, no. 11, pp. 2033–2037. <https://doi.org/10.1134/S0005117918110073>
 13. Doronina J.V., Ryabovaya V.O., Chesnokov D.I. Using model-based design for solving structural synthesis problems. *SPIIRAS Proceedings*, 2016, no. 6(49), pp. 122–143. (in Russian). <https://doi.org/10.15622/sp.49.7>
 14. Bagretov S.A., Vezirov V.N., L'vov V.M. et al. *Synthesis Technology of the Organizational Framework of the Complex Control Systems*. Moscow, VIMI of Federal State Unitary Enterprise, “Ergocentr”, 1998, 224 p. (in Russian)
 15. Kaliev I.A., Gaiduk A.R., Kapustian S.G. *Models and Algorithms of the Shared Control in Robot Teams*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009, 280 p. (in Russian)
 16. Rapoport E.Y., Pleshivtseva Y.E. Method of multiobjective optimization of controlled systems with distributed parameters. *SPIIRAS Proceedings*, 2018, no. 5(60), pp. 64–96. (in Russian). <https://doi.org/10.15622/sp.60.3>
 17. Gubko M.V. *Model and Methods for Optimizing the Structure of Hierarchical Information Processing Systems*. Thesis for the degree of doctor of physical and mathematical sciences. Institute of Control Sciences V.A. Trapeznikov Academy of Sciences. Moscow, 2014, 327 p. (in Russian)
 18. Kandyrin Yu.V., Shkurina G.L. Creation of partial orders of variants for selection of optimal alternatives in homogeneous sets. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 3, pp. 476–482. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2015-15-3-476-482>
 19. Timofeeva G.A. Probabilistic solutions of conditional optimization problems. *Trudy Instituta Matematiki i Mekhaniki UrO RAN*, 2020, vol. 26, no. 1, pp. 198–211. (in Russian). <https://doi.org/10.21538/0134-4889-2020-26-1-198-211>
 20. Ford L.R., Fulkerson D.R. *Flows in Networks*. Princeton University Press, Oxford University Press, 1962, 212 p.
 21. Venttsel E.S. *Operations Research*. Moscow, Sovetskoe Radio Publ., 1972. 407 c. (in Russian)

Авторы

Онуфрей Андрей Юрьевич — доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-6189-5886>, vka@mil.ru
Разумов Александр Владимирович — доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-1208-2368>, vka@mil.ru

Authors

Andrey Yu. Onufrey — D.Sc., Professor, Leading Researcher, Mozhaisky Military Aerospace Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-6189-5886>, vka@mil.ru
Alexander V. Razumov — D.Sc., Professor, Senior Researcher, Mozhaisky Military Aerospace Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-1208-2368>, vka@mil.ru

Какаев Виталий Викторович — доктор военных наук, доцент, начальник управления, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация,  57195929078, <https://orcid.org/0000-0001-9898-2740>, vka@mil.ru

Vitaliy V. Kakaev — D.Sc. (Military Science), Associate Professor, Principal Staff Scientist, Mozhaisky Military Aerospace Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation,  57195929078, <https://orcid.org/0000-0001-9898-2740>, vka@mil.ru

Статья поступила в редакцию 12.06.2022
Одобрена после рецензирования 07.12.2022
Принята к печати 18.01.2023

Received 12.06.2022
Approved after reviewing 07.12.2022
Accepted 18.01.2023



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»