

Применение методов системного анализа и оценивания эффективности информационно-управляющих систем в условиях конфликтного взаимодействия с противоборствующей стороной

Д. А. Первухин¹, О. В. Афанасьева^{2✉}, И. М. Новожилов³

¹ Михайловская военная артиллерийская академия, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ ovaf72@guap.ru

Аннотация. Излагаются подходы к применению методологии системного анализа к исследованию и оцениванию эффективности информационно-управляющих систем, входящих в состав сложных организационно-технических систем, функционирующих в условиях антагонистического конфликтного взаимодействия с противоборствующей стороной. Структура системы управления подобной автоматизированной организационно-технической системы является двухуровневой. Сложные разнородные объекты управления, входящие в их состав, имеют два уровня управления: нижний уровень – уровень непосредственного управления; верхний уровень, обеспечивающий решение функциональных задач. Высокой эффективности функционирования организационно-технической системы можно достичь только при высоком качестве процессов информационного обеспечения и управляющих процессов, которые определяются уровнем качества автоматизированной информационно-управляющей системы как основной составной части организационно-технической системы.

Ключевые слова: организационно-техническая система, система управления, информационно-управляющая система, эффективность функционирования, конфликтное взаимодействие, информационная задача

Для цитирования: Первухин Д. А., Афанасьева О. В., Новожилов И. М. Применение методов системного анализа и оценивания эффективности информационно-управляющих систем в условиях конфликтного взаимодействия с противоборствующей стороной // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 2. С. 49–60. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-2-49-60.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Application of Methods of System Analysis and Estimation of Efficiency of Information-Management Systems in Conditions of Conflict Interaction with the Opposing Party

D. A. Pervukhin¹, O. V. Afanaseva^{2✉}, I. M. Novozhilov³

¹ Mikhailov Military Artillery Academy, Saint Petersburg, Russia

² Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrument Engineering, Saint Petersburg, Russia

³ Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ ovaf72@guap.ru

Abstract. The purpose of the paper is to present approaches to the application of the methodology of system analysis to the study and evaluation of the effectiveness of information and control systems, which are part of complex organizational-technical systems functioning under conditions of antagonistic conflict interaction with the opposing party. The structure of the control system of such an automated organizational-technical system is two-level. Complex heterogeneous control objects, which are part of them, have two levels of control: the lower level – the level of direct control; the upper level, providing the solution of functional tasks. High efficiency of organizational-technical system functioning can be achieved only at high quality of information support processes and control processes, which are determined by the quality level of automated information-management system as the main component of organizational-technical system.

Keywords: organizational-technical system, control system, information-management system, efficiency of functioning, conflict interaction, information task

For citation: Pervukhin D. A., Afanasyeva O. V., Novozhilov I. M. Application of Methods of System Analysis and Estimation of Efficiency of Information-Management Systems in Conditions of Conflict Interaction with the Opposing Party // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 2. P. 49–60. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-2-49-60.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. В настоящее время сложные наукоемкие автоматизированные организационно-технические (человеко-машинные или эргатические) системы решают разнородные задачи практически во всех областях человеческой деятельности. Их ядром, основной управляющей составной частью служат информационно-управляющие системы (ИУС), главная функция которых заключается в информационном обеспечении и контроле управляемой составной части организационно-технической системы (ОТС), представляющей собой сложный распределенный объект управления, который необходимо переводить из текущего в требуемое или желаемое состояние в условиях действия различных ограничений и воздействия возмущений.

Информационно-управляющие системы, как правило, разнородны с точки зрения протекающих в них физических процессов, имеют достаточно высокую степень автоматизации функциональных составных частей, а также интеграцию информационных связей и вычислительных процессов [1].

Таким образом, фактически современная ИУС представляет собой сложный многофункциональный распределенный человеко-машинный регулятор, построенный и организованный на основе интеграции информационных связей и вычислительных процессов, решающий разнородные задачи по сбору, обработке, хранению и распределению информации, необходимой для реализации процессов управления, протекающих в ОТС.

Материалы и методы исследований. Создание эффективных ИУС, удовлетворяющих современным жестким требованиям к назначению и

другим, невозможно без применения методологии, основополагающих принципов и математического инструмента системного исследования. В настоящее время современные методы системного анализа – это то междисциплинарное средство, универсальный инструмент, который позволяет решать такие сложные многоаспектные наукоемкие задачи. Все это обуславливает актуальность настоящей статьи.

Жизненный цикл (ЖЦ) современных, сложных, часто уникальных автоматизированных ОТС составляет тридцать лет и более. Согласно ГОСТ Р 15.000–2016 и ГОСТ РВ 15.203–2001 и по опыту создания сложных, наукоемких ОТС основными стадиями их ЖЦ могут быть [2], [3]: разработка технических предложений по элементам на основе существующих схемно-технических решений прототипов, аналогов и научно-технических заделов; концептуальное, эскизное и техническое проектирование; разработка рабочей конструкторской документации; изготовление составных частей с проведением их предварительных (автономных) испытаний; парные стыковки, комплексные и межведомственные испытания опытного (опытно-поставочного) образца; швартовные, заводские ходовые, летные испытания опытного (опытно-поставочного) образца; государственные испытания и опытная эксплуатация; модернизация и доработка в процессе ее опытной эксплуатации; серийное (мелкосерийное) производство; эксплуатация серийных (мелкосерийных) образцов; модернизация и доработка серийных (мелкосерийных) образцов в процессе эксплуатации; утилизация.

При производстве серийных (мелкосерийных) образцов ОТС проводятся их приемо-сдаточные испытания. В процессе эксплуатации ОТС могут проводиться типовые и периодические испытания их составных частей и элементов. На всех стадиях ЖЦ ОТС решаются различные по своей природе, объему и сложности задачи, направленные на создание и применение ОТС, удовлетворяющей всем предъявляемым к ней требованиям.

На ранних стадиях ЖЦ – создания ОТС, решаются задачи обоснования тактико-технических (технических) требований к ОТС и ее элементам, на более поздних – испытаний и эксплуатации реальной ОТС – задачи ее сопровождения и подтверждения тактико-технических (технических) требований. При этом на ранних стадиях ЖЦ (создания ОТС) в условиях неопределенности и ограниченного объема информации решаются исследовательские задачи как анализа, так и синтеза ОТС, на этапах испытаний и эксплуатации – в основном задачи анализа.

Кроме того, на всех стадиях ЖЦ ОТС осуществляется решение оптимизационных задач, задач управления (обоснования и выбора стратегий поведения) оценивания состояния, качества и эффективности функционирования, прогнозирования и управления их развитием [2], [3].

На всех стадиях ЖЦ основным инструментом исследования ОТС служат методы системного анализа и системного моделирования. Огромный объем исследовательских задач, решаемых на всех стадиях ЖЦ современной ОТС, позволяет акцентировать внимание лишь на наиболее актуальных аспектах методологии их системного исследования.

Одна из главных задач, решаемых при создании ОТС, – обеспечение требуемой эффективности их функционирования, т. е. применения по прямому назначению. При этом, с точки зрения теории управления, на ИУС как основную, управляющую составную часть ОТС возложено решение задач информационного обеспечения и управления сложной разнородной управляемой составной частью системы, представляющей собой объект управления, который необходимо переводить из текущего в требуемое или желаемое состояние в условиях действия различных ограничений [4].

Глобальная и многоаспектная (с точки зрения спектра компонент) проблема обеспечения требуемой эффективности ОТС на различных этапах ее жизненного цикла может быть решена только с позиций комплексного подхода, предполагающего использование методологических положений системных исследований, позволяющих учитывать разные факторы и условия применения системы по прямому назначению при решении возложенных на нее задач [5], [6].

Проблема обеспечения требуемой эффективности ОТС – сложная многоуровневая иерархическая, обладающая свойствами интегративности или эмерджентности, и принципиально неформализуемая метасистемой, исследование составляющих которой на различных уровнях иерархии возможно лишь при использовании основополагающих принципов внешнего дополнения и декомпозиции. Обобщенная схема ее исследований может быть представлена в виде совокупности известных этапов, приведенных на рис. 1 [6].

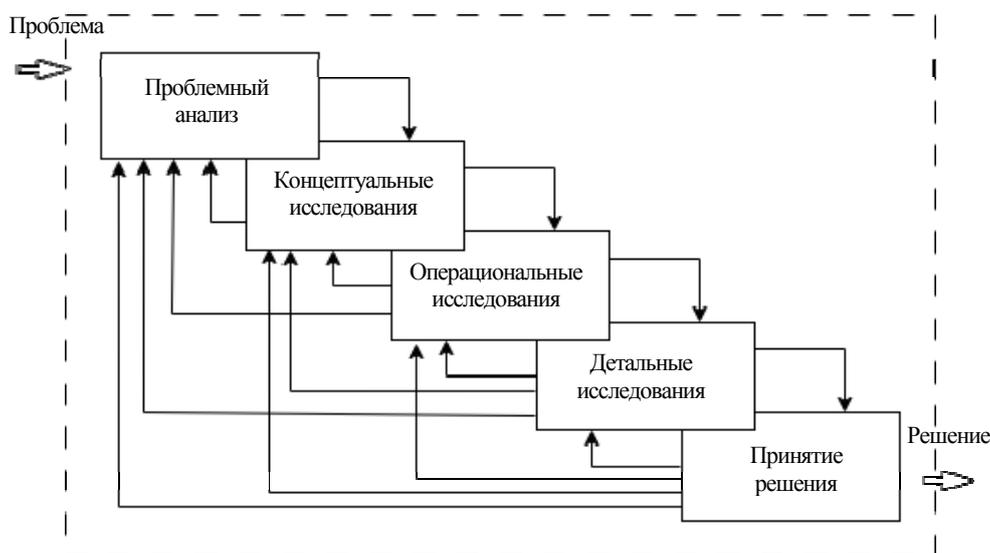


Рис. 1. Основные этапы исследования эффективности ОТС
Fig. 1. Main stages of the study of OTS efficiency

Этапы имеют последовательный характер выполнения и характеризуются поступательным накоплением и уточнением информации во времени при проведении исследования.

Под эффективностью ОТС понимается наиболее общее ее свойство, определяющее степень приспособленности к решению возложенной задачи по прямому назначению, характеризующее соответствие достигнутого результата требуемому (ожидаемому). С точки зрения исследования операций в оптимизационной постановке проблема исследования эффективности ОТС может быть представлена в виде следующих двух обобщенных вариантов задач [5]:

$$\begin{cases} Z = W(\mathbf{X}, \mathbf{S}, C, \mathbf{U}, t) \rightarrow \max; \\ C \leq C_{\text{доп}}; \\ X_{\min} \leq \mathbf{X} \leq X_{\max}; \\ U_{\min} \leq \mathbf{U} \leq U_{\max}; \\ t \leq T_{\text{зад}} \end{cases} \quad (1)$$

или

$$\begin{cases} Z = C(\mathbf{X}, \mathbf{S}, W, \mathbf{U}, t) \rightarrow \min; \\ W \geq W_{\text{тр}}; \\ X_{\min} \leq \mathbf{X} \leq X_{\max}; \\ U_{\min} \leq \mathbf{U} \leq U_{\max}; \\ t \leq T_{\text{зад}}, \end{cases} \quad (2)$$

где Z – оптимизируемая целевая функция ОТС; W – эффективность ОТС; \mathbf{X} – вектор состояния ОТС; \mathbf{S} – вектор состояния внешней среды; C – ресурсы, расходуемые на функционирование ОТС; \mathbf{U} – вектор управлений (стратегий) ОТС; t – время функционирования ОТС; $C_{\text{доп}}$, $W_{\text{тр}}$, X_{\min} , X_{\max} , U_{\min} , U_{\max} , $T_{\text{зад}}$ – ограничения на соответствующие параметры ОТС.

Таким образом, для исследования эффективности ОТС в общем случае необходимо: обосновать и выбрать систему показателей, осуществить постановку задачи в виде (1) или (2), обосновать и выбрать критерии эффективности.

Эффективность, как интегральное обобщенное свойство ОТС, включает в себя системы свойств более низкого уровня иерархии. В силу эмерджентности системы исследования эффективности ОТС ее цель может быть достигнута решением совокупности частных задач. Поэтому указанная система в общем случае количественно может быть выражена через комплексный векторный показатель вида [6]

$$\mathbf{W} = \|W_1, W_2, \dots, W_i, \dots, W_m\|^T, \quad i = \overline{1, m},$$

где W_i – частный показатель эффективности ОТС; m – число частных показателей эффективности (свойств ОТС).

Частный показатель W_i для ОТС может представляться через совокупность разнородных по своей физической сущности определенных вероятностных, пространственных, временных, точностных и других характеристик.

Частные задачи (определение частных показателей W_i) при исследовании эффективности ОТС решаются, как правило, отдельными подсистемами, входящими в общую систему ее исследований, и тогда W_i есть показатель эффективности i -й подсистемы.

Процесс функционирования ОТС в том, что касается частных задач исследования эффективности, – это сложный процесс, который представляется в виде совокупности последовательных этапов функционирования элементов ОТС в условиях конфликтного взаимодействия с противоборствующей стороной. В этом случае имеется возможность свертки частных показателей W_i в интегральный показатель и исследования количественной взаимосвязи между ними на основе существующих подходов, изложенных в [7]–[9].

Обычно интегральный (комплексный, обобщенный) показатель выражается в виде средневзвешенного в аддитивной, геометрической, гармонической или квадратичной форме:

$$Q = f(K_i, \lambda_i), \quad i = \overline{1, m}, \quad (3)$$

где m – количество единичных показателей (свойств); K_i , λ_i – нормированное значение и коэффициент весомости i -го единичного показателя соответственно. Для количественной оценки взаимосвязи свойств K_i между собой и интегрального показателя Q выбирается вид модели (3) и определяются веса λ_i . Задача обоснования способов определения λ_i достаточно сложна и предполагает возможность использования экспертных методов или различных вычислительных алгоритмов.

Для оценки взаимосвязи свойств K_i , определяющих этапы последовательного функционирования ОТС, часто применяется следующий подход.

Приоритет свойств задается рядом $I = \{1, 2, \dots, m\}$ и вектором $\mathbf{V} = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ приоритета; вектором весовых коэффициентов $\mathbf{\Lambda} = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m\}$. Параметры v_i и λ_i удовлетворяют условиям:

$$\begin{cases} v_i \geq 1, i \in \overline{1, m}; \\ 0 \leq \lambda_i \leq 1, i \in \overline{1, m}; \\ \sum_{i=1}^m \lambda_i = 1 \end{cases}$$

и связаны между собой соотношениями, определяемыми зависимостью

$$\lambda_i = \prod_{q=i}^m v_q / \sum_{i=1}^m \prod_{q=i}^m v_q. \quad (4)$$

Свойства K_i , определяющие этапы последовательного функционирования ОТС, распределены по приоритету от завершающего W_m до начального W_1 этапа в сторону уменьшения по условию последовательности выполнения этапов функционирования ОТС.

Другой подход базируется на ранжировании весов λ_i по важности и их вычислении с использованием оценок Фишберна [9]

$$\lambda_i = \frac{2(m-i+1)}{m(m+1)}, i \in \overline{1, m}. \quad (5)$$

Для проведения ранжирования весов λ_i по важности перед их расчетом могут быть проведены экспертные процедуры.

В ряде случаев при сравнении различных вариантов построения ОТС или сравнительной оценке различных ОТС от сравнения по частным показателям эффективности W_i переходят к сравнению по совокупности тактико-технических характеристик x_i : $W_i \Rightarrow x_i, i \in \overline{1, m}$, и оперируют понятиями уровня качества или технического уровня ОТС. В этом случае для определения весов λ_i возможно применение метода, получившего название «метод потенциального распределения вероятностей» [10].

Его сущность заключается в том, что большие веса λ_i приобретают те частные показатели эффективности ОТС W_i , которые имеют большую стабильность. Тогда веса λ_i могут быть определены через нормированные значения показателей следующим образом:

$$\lambda_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^n r_{ij}} \frac{1}{\sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{\sum_{j=1}^n r_{ij}} \right)}, i \in \overline{1, m}, j \in \overline{1, n},$$

где n – число вариантов построения ОТС или количество сравниваемых ОТС. В этом случае воз-

можен переход к аддитивной свертке интегрального (комплексного) показателя (3) и сведение его к следующему безразмерному виду:

$$Q_j = \sum_{i=1}^m r_{ij} \lambda_i, i \in \overline{1, m}, j \in \overline{1, n}.$$

В качестве примера в таблице представлены результаты расчета весовых коэффициентов $\lambda_i^j, i \in \overline{1, 7}, j \in \overline{1, 2}$ при равноценных свойствах с применением двух подходов:

- λ_i^1 – основанного на последовательности этапов функционирования ОТС с применением зависимости (4);
- λ_i^2 – с применением оценок Фишберна по формуле (5).

Результаты расчета весовых коэффициентов
Results of calculation of weighting coefficients

I	λ_i^1	λ_i^2
1	0.504	0.250
2	0.252	0.214
3	0.126	0.179
4	0.063	0.143
5	0.031	0.107
6	0.016	0.071
7	0.008	0.036

Таким образом, исследование эффективности ИУС как основной составной части ОТС осуществляется в неразрывной связи и в ее составе.

Достаточно часто функционирование ОТС осуществляется в конфликтной ситуации с противоборствующей стороной. В этом случае антагонистическое взаимодействие ОТС и противоборствующей стороны описывается следующим образом.

Стороны осуществляют выбор стратегий поведения u и v из множеств допустимых стратегий U и V ($u \in U, v \in V$). Тогда система исследования эффективности ОТС в общем виде может быть представлена посредством комплексного показателя:

$$W(u, v) = M \{ \rho[y(u, v), y_{\text{тр}}] \},$$

где M – условное математическое ожидание функции соответствия ρ реального результата исследования $y(u, v)$ требуемому $y_{\text{тр}}$.

В соответствии с теорией игр указанное взаимодействие характеризуется как парная стратегическая бескоалиционная конечная некооперативная игра, действия сторон в которой рацио-

нальны (разумны) и направлены на достижение целей [11], [12]. Модель проблемной ситуации в этом случае представляется в виде

$$\langle U, V, W_1, W_2, Q_1, Q_2 \rangle, \quad (6)$$

где W_1 и W_2 – показатели эффективности, представляющие собой выигрыши игроков; Q_1 и Q_2 – их системы предпочтений. На ситуации игры $(u, v) \in U \times V$ они представляются в виде

$$\begin{cases} (u_1, v_1) \geq (u_2, v_2) \Leftrightarrow W_1(u_1, v_1) \geq W_1(u_2, v_2); \\ (u_1, v_1) \geq (u_2, v_2) \Leftrightarrow W_2(u_1, v_1) \geq W_2(u_2, v_2). \end{cases}$$

Так как в исследуемом конфликтном взаимодействии имеет место строгое соперничество, а показатели W_1 и W_2 можно свести к однородным, то системы предпочтений игроков на всех парах ситуаций строго противоположны:

$$\begin{array}{cc} \text{I} & \text{II} \\ (u_i, v_j) \geq (u_k, v_l) \Leftrightarrow (u_i, v_j) \leq (u_k, v_l), \forall (u, v) \in U \times V, \end{array}$$

где i, j, k и l характеризуют различные сочетания вариантов игровых ситуаций, и выполняется условие:

$$W_1(u, v) + W_2(u, v) = 0, \forall (u, v) \in U \times V,$$

что характеризует исследуемый процесс как игру с нулевой суммой, т. е. каждый из игроков выигрывает ровно столько, сколько проигрывает ему другой. Тогда модель проблемной ситуации (6) упрощается и сводится к виду

$$\langle U, V, W \rangle.$$

Формальное выражение систем предпочтений игроков основывается на двух базовых принципах рационального поведения: наибольшего гарантированного результата и равновесия по Нэшу.

Согласно этому противоборствующая сторона выбирает стратегии, исходя из минимизации положительного эффекта ОТС. Тогда для каждой стратегии ОТС $u \in U$ справедливо

$$W(u) = \min_{v \in V} M \{ \rho[y(u, v), y_{\text{тр}}] \}.$$

Таким образом, показатель $W(u)$ – это нижняя граница функции соответствия реального результата желаемому (требуемому):

$$W(u) \leq W(u, v).$$

Выбор критериев при исследовании эффективности ОТС в условиях конфликтного взаимодействия с противоборствующей стороной необ-

ходимо осуществлять в соответствии с концепцией оптимизации рационального поведения, формирующей целеустремленную (но негибкую из-за отсутствия информации о текущем состоянии процесса взаимодействия) систему действий по выбору оптимальной стратегии $u^* \in U$ (совокупность оптимальных стратегий $U^* \in U$), обеспечивающую получение максимального эффекта [11], [12]:

$$\begin{aligned} W(u^*) &= \max W(u), \\ u &\in U. \end{aligned}$$

Таким образом, из результатов анализа указанных подходов и допущений вытекает основополагающий принцип исследования эффективности функционирования ОТС в условиях конфликтного взаимодействия с противоборствующей стороной – принцип максимина. При этом максиминная стратегия выбирается, исходя из условия

$$u^* : \max \min_{v \in V} M \{ \rho[y(u, v), y_{\text{тр}}] \}.$$

Для непрерывной функции $W(u, v)$, замкнутых, выпуклых и ограниченных множеств U и V справедливо следующее. Игра имеет седловую точку при выполнении условия

$$W(u, v_0) \leq W(u_0, v_0) \leq W(u_0, v),$$

где u_0 и v_0 – представляют собой оптимальные стратегии игроков.

При решении прикладных задач (конечных множествах U и V) достаточно часто игра может быть сведена к следующей форме:

$$\begin{aligned} \mathbf{W} &= \|w_{ij}\|, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n}, \\ w_{ij} &= W(u_i, v_j). \end{aligned}$$

Данная форма – это матричная форма игры, и она определяет наличие седловой точки:

$$\min_i \max_j w_{ij} = \min_j \max_i w_{ij}.$$

Конечное число вариантов исходов игры при данном подходе позволяет применять не только чистые, но и смешанные стратегии (вероятностные распределения w_{ij}), реализующие принцип адаптации к поведению противника.

В этом случае первая сторона выбирает каждую из своих альтернатив i с вероятностью p_i , а вторая – j с вероятностью q_j . Тогда математическое ожидание размера выигрыша ОТС определится:

$$M[W(\hat{u}, \hat{v})] = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n w_{ij} p_i q_j, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n}.$$

При $\mathbf{p} = \|p_1, p_2, \dots, p_m\|^T$ и $\mathbf{q} = \|q_1, q_2, \dots, q_n\|^T$, а также условиях

$$p_i \geq 0, \quad \sum_{i=1}^m p_i = 1;$$

$$q_j \geq 0, \quad \sum_{j=1}^n q_j = 1;$$

$$M[W(\hat{u}, \hat{v})] = \mathbf{p}^T \mathbf{W} \mathbf{q}.$$

Стратегии сторон выбираются так, чтобы вероятности выборов альтернативных вариантов в процессе многократного повторения игры образовывали пару $\langle p^*, q^* \rangle$, соответствующую седловой точке. Стратегии игроков выбираются, исходя из следующего:

$$\min_{i^*} \max_{j^*} w_{ij} = \min_{j^*} \max_{i^*} w_{ij}.$$

Очень часто в процессе конфликтного взаимодействия игроков, поступления обновляемой текущей информации, может меняться множество допустимых стратегий ОТС U . В этих условиях целесообразно применять адаптивные стратегии $u(t) \in U(t, \tau)$:

$$W_t[u^*(t), \tau] \geq W_t^{\text{тр}}[u(t), \tau]$$

или

$$W_t[u^*(t), \tau] = \max_{u \in U} W_t[u(t), \tau],$$

где t, τ – текущее время и временной интервал прогноза, соответственно.

Особенностью данной ситуации при информационном взаимодействии состоит в том, что стратегия ОТС \mathbf{u} выбирается, исходя из прогнозируемой стратегии поведения противоборствующей стороны на основе текущей информации о ней [12].

Наличие текущей информации о поведении противоборствующей стороны играет ключевую роль в достижении цели управления ОТС. Одна из важнейших функций ИУС как основной управляющей части ОТС – сбор, обработка информации о поведении (управлении) противоборствующей стороны.

Таким образом, в условиях конфликтного взаимодействия ОТС и противоборствующей стороны необходимо решать совокупность специфических задач, в том числе и информационных, для

повышения эффективности функционирования ОТС. Чем более точная и достоверная текущая информация о поведении противоборствующей стороны будет находиться в распоряжении ОТС, тем более оптимальное управление можно определить для нее.

Высокой эффективности функционирования ОТС можно достичь только одновременно при высоком качестве процессов информационного обеспечения и управляющих процессов, которые определяются уровнем качества, прежде всего автоматизированной ИУС как основной составной части ОТС. С точки зрения теории управления ИУС, служащая неотъемлемой, главной, управляющей частью ОТС, решает задачи информационного обеспечения и управления ОТС по поддержанию и переводу из текущего в требуемое или желаемое состояние [4], [13], [14].

Результаты проведенного анализа существующих автоматизированных ОТС свидетельствуют о том, что сложные разнородные объекты управления, входящие в их состав, фактически имеют минимум два уровня управления:

- нижний уровень, или уровень непосредственного управления;

- верхний уровень, обеспечивающий решение функциональных задач, возложенных на ОТС по ее прямому предназначению.

Типовая обобщенная двухуровневая структура системы управления подобной ОТС представлена на рис. 2.

Автоматизированная ИУС функционально представляет собой эргатическую человеко-машинную систему, включает в свой состав комплекс технических устройств и экипаж (операторов, обслуживающий персонал), обеспечивающий решение возложенных задач как на нижнем, так и на верхнем уровнях управления. Таким образом, ИУС по своему составу также разделена на два уровня управления [1].

На нижнем уровне автоматизированной ИУС – уровне непосредственного управления, подавляющее большинство задач решается в автоматическом режиме. На структуре, показанной на рис. 2, на нижнем уровне реализован комбинированный принцип управления: одновременно по отклонению и возмущению [13], [14].

При этом регулятор P нижнего уровня управления включает в себя усилительно-преобразующее устройство УПУ, включенное в прямой контур управления нижнего уровня и преобразующее вектор ошибки управления Δx в вектор

управляющего сигнала u , подаваемый на объект управления ОУ, и компенсирующее устройство КУ, реализующее алгоритм управления с упреждением, измеряющее вектор возмущений F и формирующее сигнал управления, подаваемый на входной сумматор контура управления.

Контур управления осуществляет минимизацию или сведение к нулю вектора ошибки управления Δx , равного разности векторов задающего входного воздействия $X_{п}$ и выходных параметров X контура управления.

Верхний уровень автоматизированной ИУС – уровень координационного, стратегического, оперативного управления и принятия управленческих решений. На данном уровне лицами, принимающими решения (ЛПР), на основе имеющейся в их распоряжении информации решаются функциональные задачи ОТС и формируются

соответствующие управляющие воздействия для подсистем нижнего уровня управления. В настоящее время информационное обеспечение верхнего уровня управления ИУС бурно развивается на основе внедрения новых информационных технологий, компьютерных и вычислительных средств обработки информации, систем поддержки принятия решений, роботизированных систем, искусственного интеллекта [1].

На верхнем уровне ИУС – уровне программного устройства ПУ, при помощи задающего устройства ЗУ формируется вектор задающего входного воздействия $X_{п}$, подаваемого на вход контура нижнего уровня управления. В зависимости от функциональных задач, решаемых ОТС, на верхнем уровне управления формируются программные, следящие или стабилизирующие алгоритмы [13], [14].

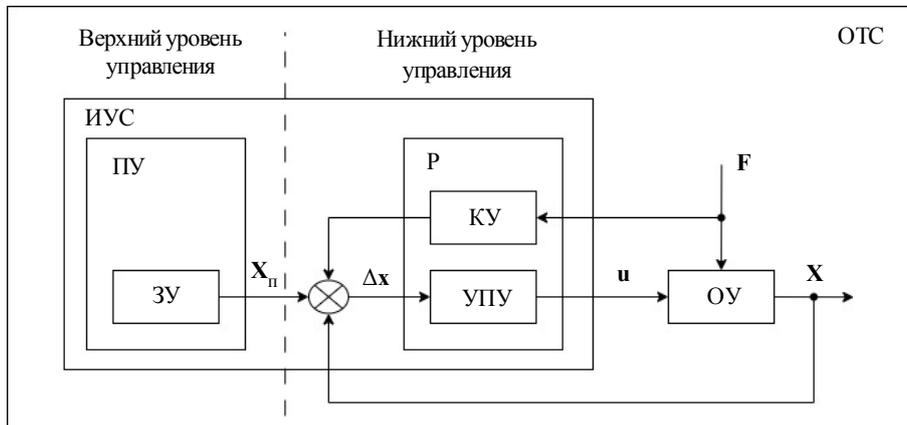


Рис. 2. Обобщенная двухуровневая структура системы управления ОТС
 Fig. 2. Generalized two-level structure of the OTS control system

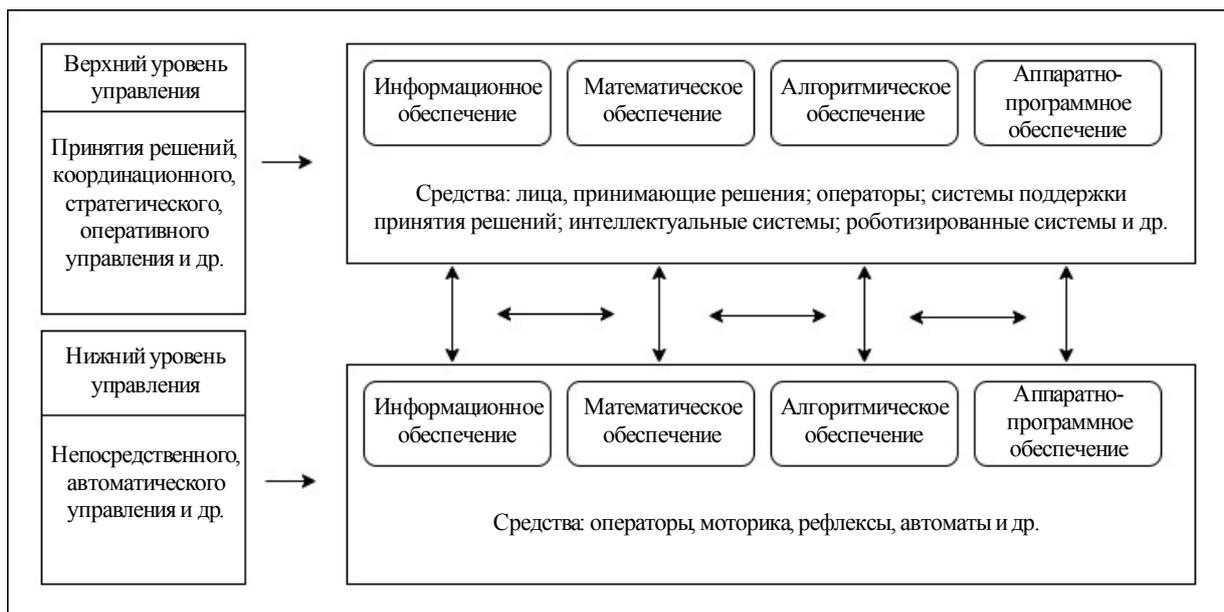


Рис. 3. Схема взаимодействия видов обеспечения процессов управления в ИУС
 Fig. 3. Scheme of interaction of types of support of management processes in the IMS

Для повышения качества управления в автоматизированных ИУС необходимо выполнение следующих основных принципов:

- максимальное использование для управления ОТС всей имеющейся информации;
- сбалансированность различных видов обеспечения процессов управления между собой и между уровнями управления ИУС.

На рис. 3 показана схема взаимодействия различных видов обеспечения процессов управления между собой и между уровнями управления в ИУС.

Чем больше объем, точность и достоверность информации, используемой для управления ОТС на всех уровнях, тем выше качество управления всеми ее процессами и, в конечном итоге, эффективность функционирования ОТС в целом.

На нижнем уровне расширение размерности вектора управления u может дать существенный выигрыш в качестве процессов автоматического управления. Например, введение в контур системы автоматического управления информации о пространственном распределении объекта управления позволяет решать задачи управления сложными пространственно протяженными объектами, полями и др., используя инструменты теории систем с распределенными параметрами [15]. Корректное применение математического аппарата функционального анализа в задачах управления может также дать существенный выигрыш в качестве решения задач управления сложными нелинейными нестационарными объектами управления и др.

На верхнем уровне для реализации процессов управления в ОТС должен использоваться весь спектр имеющейся информации: априорной (исходной); текущей, поступающей в реальном масштабе времени, первично и вторично обработанной; апостериорной, получаемой при проведении вычислительных экспериментов на моделях и по реальным данным; от интеллектуальных систем поддержки принятия решений; экспертной и др. Чем большим объемом информации располагает ИУС на верхнем уровне управления, чем выше ее точность и достоверность, тем корректнее можно задать вектор задающего входного воздействия X_{II} для нижнего уровня управления, а значит, повысить качество управления ОТС и эффективность ее применения по назначению.

При решении ИУС некоторых специфических задач информация, используемая для управления на верхнем уровне, играет определяющую роль в

достижении цели управления ОТС. Например, при решении задач в условиях конфликтного антагонистического взаимодействия двух противоборствующих сторон, а также в дуэльных ситуациях почти всегда реализуется принцип «первым обнаружил – победил». Та сторона, которая первой получила информацию о противнике, формирует вектор X_{II} , обеспечивающий достижение цели терминального управления ОТС – поражения противоборствующей стороны.

В теории дифференциальных игр, в игровых задачах «наведения–уклонения» в дуэльных ситуациях в условиях полной информации о противоборствующей стороне, которой располагает каждая из сторон, достаточно часто задача решается в чистых стратегиях, когда имеется полная определенность у каждой из сторон о поведении противника.

В реальных же задачах «наведения–уклонения» уклоняющаяся сторона всегда находится в выигрышной ситуации по отношению к стороне, решающей задачу наведения. Это обусловлено тем, что уклоняющаяся сторона имеет полную информацию о своем управлении в текущий момент времени и прогнозную информацию об оптимальном (наилучшем) поведении противника. Сторона же, решающая задачу наведения, располагает только текущей информацией об изменении наблюдаемых интегральных параметров уклоняющейся стороны, получаемых с запаздыванием и ошибками в результате решения задачи фильтрации. В этом случае задача решается уже в смешанных стратегиях [11], [12].

При решении задач автоматического управления различными сложными техническими объектами достаточно часто применяют теорему разделения общей задачи управления на две последовательно решаемых: информационную задачу оптимальной фильтрации и, непосредственно, оптимального управления объектом. Применение же теоремы разделения при управлении высокоскоростным объектом, наводящимся на высокоскоростную цель при скоростях взаимного сближения, исчисляемых километрами в секунду, загрубаляет и резко ухудшает качество общего решения задачи управления таким объектом, что необходимо учитывать при создании подобных реальных систем [16].

Заключение. Таким образом, информация в процессах управления ИУС играет важнейшую роль в обеспечении заданной эффективности функционирования ОТС.

Все процессы управления в ИУС должны основываться на следующих видах обеспечения: информационном; математическом; алгоритмическом; аппаратно-программном (см. рис. 3). Указанные виды обеспечения процессов управления тесно взаимосвязаны между собой и с уровнями управления ИУС.

Например, увеличение объема информации, повышение ее размерности приводит к усложнению математического аппарата. В свою очередь, более сложное математическое обеспечение повышает точность и достоверность решения задач управления и требует более сложных вычислительных алгоритмов. Усложнение алгоритмического обеспече-

ния вызывает соответствующие изменения к требованиям аппаратно-программного обеспечения и др.

Сбалансированность различных видов обеспечения процессов управления между собой и между уровнями управления ИУС – необходимое ключевое требование, обеспечивающее высокую эффективность функционирования ОТС.

Реализация же двухуровневой системы управления на единой аппаратно-программной базе может позволить достичь тесной интеграции и сбалансированности различных видов обеспечения процессов управления и создать по-настоящему надежную высококачественную интегрированную ИУС.

Список литературы

1. Пьявченко Т. А., Финаев В. И. Автоматизированные информационно-управляющие системы. Таганрог: изд-во ТРТУ, 2007. 271 с.
2. ГОСТ Р 15.000–2016. Система разработки и постановки продукции на производство. Основные положения. М.: Стандартиформ, 2016.
3. ГОСТ РВ 15.203–2001. Система разработки и постановки продукции на производство. Военная техника. Порядок выполнения опытно-конструкторских работ по созданию изделий и их составных частей. М.: Госстандарт России, 2001.
4. Справочник по теории автоматического управления / А. Г. Александров, В. М. Артемьев, В. И. Афанасьев, А. А. Ашимов, И. И. Белоглазов, В. Н. Буков, С. Н. Земляков, В. В. Казакевич, А. А. Красовский, Г. А. Медведев, Л. А. Растригин, В. Рутковский, Р. М. Юсупов, И. Б. Ядыкин, В. А. Якубович; под ред. А. А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712 с.
5. Акофф Р., Сасиени М. Основы исследования операций. М.: Мир, 1971. 536 с.
6. Надежность и эффективность в технике: Справочник в 10 т. Т. 3. Эффективность технических систем / В. У. Торбин, Г. Н. Охотников, Е. С. Егоров, Ю. В. Крючков, С. Н. Воробев, А. Б. Назаров, В. В. Раздорский, А. В. Ильичев, В. И. Кузнецов, В. Н. Харитонов, А. И. Яковлев; под общ. ред. В. Ф. Уткина, Ю. В. Крючкова. М.: Машиностроение, 1988. 328 с.
7. Федулов А. А., Федулов Ю. Г., Цыгичко В. Н. Введение в теорию статистически ненадежных решений. М.: Статистика, 1979. 279 с.
8. Каменев А. Ф. Технические системы: Закономерности развития. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-е, 1985. 216 с.
9. Фишберн П. С. Теория полезности для принятия решений / пер. с англ. В. Н. Воробьевой, А. Я. Кируты; под ред. Н. Н. Воробьева. М.: Наука, 1978. 352 с.
10. Experimental study results processing method for the marine diesel engines vibration activity caused by the cylinder-piston group operations / О. Afanaseva, О. Bezyukov, D. Pervukhin, D. Tukeev // Inventions. 2023. № 8(3). Art. 71. P. 1–19. doi: 10.3390/inventions8030071.
11. Айзекс Р. Дифференциальные игры / пер. с англ. В. И. Аркина, Э. Н. Симаковой; под ред. М. И. Зеликина. М.: Мир, 1967. 479 с.
12. Красовский Н. Н. Игровые задачи о встрече движений. М.: Наука, 1970. 420 с.
13. Устройства и элементы систем автоматического регулирования и управления. Техническая кибернетика. Кн. 3. Исполнительные устройства и сервомеханизмы / под ред. засл. деятеля науки и техники РСФСР, д-ра техн. наук проф. В. В. Солодовникова. М.: Машиностроение, 1976. 735 с. URL: <https://djuv.online/file/PWssOhALfAJ9L> (дата обращения: 11.07.2024).
14. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Профессия, 2004. 747 с.
15. Першин И. М., Малков А. В. Системы с распределенными параметрами: Анализ и синтез. М.: Научный мир, 2012. 472 с.
16. Максимов М. В., Меркулов В. И. Радиоэлектронные следящие системы: Синтез методами оптимального управления. М.: Радио и связь, 1990. 255 с.

Информация об авторах

Первухин Дмитрий Анатольевич – д-р техн. наук, профессор, старший научный сотрудник 3 НИО НИЦ (РВиА) Михайловской военной артиллерийской академии МО РФ, ул. Комсомола, 22, Санкт-Петербург, 195009, Россия.
E-mail: pervuchin@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3547-2932>

Афанасьева Ольга Владимировна – канд. техн. наук, доцент кафедры высшей математики и механики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, Большая Морская ул., 67, Санкт-Петербург, 190000, Россия.

E-mail: ovaf72@guap.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3169-4781>

Новожилов Игорь Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации процессов управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: novozhilovim@list.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2056-3930>

References

1. P'javchenko T. A., Finaev V. I. Avtomatizirovannye informacionno-upravljajushhie sistemy. Taganrog: izd-vo TRTU, 2007. 271 s. (In Russ.).
2. GOST R 15.000–2016. Sistema razrabotki i postanovki produkcii na proizvodstvo. Osnovnye polozhenija. M.: Standartinform, 2016. (In Russ.).
3. GOST RV 15.203–2001. Sistema razrabotki i postanovki produkcii na proizvodstvo. Voennaja tehnika. Porjadok vypolnenija opytno-konstruktorskih rabot po sozdaniyu izdelij i ih sostavnyh chastej. M.: Gosstandart Ros-sii, 2001. (In Russ.).
4. Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravlenija / A. G. Aleksandrov, V. M. Artem'ev, V. I. Afanas'ev, A. A. Ashimov, I. I. Beloglazov, V. N. Bukov, S. N. Zemljakov, V. V. Ka-zakevich, A. A. Krasovskij, G. A. Medvedev, L. A. Rastrigip, V. Rutkovskij, R. M. Jusupov, I. B. Jadykin, V. A. Jakubovich; pod red. A. A. Krasovskogo. M.: Nauka, 1987. 712 s. (In Russ.).
5. Akoff R., Sasieni M. Osnovy issledovanija operacij. M.: Mir, 1971. 536 s. (In Russ.).
6. Nadezhnost' i jeffektivnost' v tehnike: Spravochnik v 10 t. T. 3. Jeffektivnost' tehniceskikh sistem / V. U. Torbin, G. N. Ohotnikov, E. S. Egorov, Ju. V. Krjuchkov, S. N. Vorobev, A. B. Nazarov, V. V. Razdorskij, A. V. Il'ichev, V. I. Kuznecov, V. N. Haritonov, A. I. Jakovlev; pod obshh. red. V. F. Utkina, Ju. V. Krjuchkova. M.: Mashinostroenie, 1988. 328 s. (In Russ.).
7. Fedulov A. A., Fedulov Ju. G., Cygichko V. N. Vvedenie v teoriju statisticheski nenadezhnyh reshenij. M.: Statistika, 1979. 279 s. (In Russ.).
8. Kamenev A. F. Tehniceskie sistemy: Zakonomernosti razvitija. L.: Mashinostroenie, Leningr. otd-e, 1985. 216 s. (In Russ.).
9. Fishbern P. S. Teorija poleznosti dlja prinjatija reshenij / per. s angl. V. N. Vorob'evoj, A. Ja. Kiruty; pod red. N. N. Vo-rob'eva. M.: Nauka, 1978. 352 s. (In Russ.).
10. Experimental study results processing method for the marine diesel engines vibration activity caused by the cylinder-piston group operations / O. Afanaseva, O. Bezyukov, D. Pervukhin, D. Tukeev // Inventions. 2023. № 8(3). Art. 71. P. 1–19. doi: 10.3390/inventions8030071.
11. Ajzeks R. Differencial'nye igry / per. s angl. V. I. Arkina, Je. N. Simakovoj; pod red. M. I. Zelikina. M.: Mir, 1967. 479 s. (In Russ.).
12. Krasovskij N. N. Igrovyje zadachi o vstreche dvi-zhenij. M.: Nauka, 1970. 420 s. (In Russ.).
13. Ustrojstva i jelementy sistem avtomaticheskogo regulirovanija i upravlenija. Tehniceskaja kibernetika. Kn. 3. Iсполnitel'nye ustrojstva i servomehanizmy / pod red. zasl. dejatelja nauki i tehniki RSFSR, d-ra tehn. nauk prof. V. V. Solodovnikova. M.: Mashinostroenie, 1976. 735 s. URL: <https://djvu.online/file/PWssOhAlfAJ9L> (data obrashenija: 11.07.2024). (In Russ.).
14. Besekerskij V. A., Popov E. P. Teorija sistem avtomaticheskogo regulirovanija. M.: Professija, 2004. 747 s. (In Russ.).
15. Pershin I. M., Malkov A. V. Sistemy s rasprede-lenymi parametrami: Analiz i sintez. M.: Nauchnyj mir, 2012. 472 s. (In Russ.).
16. Maksimov M. V., Merkulov V. I. Radiojelektronnyje sledjashhie sistemy: Sintez metodami optimal'nogo upravlenija. M.: Radio i svjaz', 1990. 255 s. (In Russ.).

Information about the authors

Dmitry A. Pervukhin – Dr Sci. (Eng.), Professor, Senior Researcher, 3rd Scientific Research Institute, Scientific Research Center (RViA), Mikhaylovskaya Military Artillery Academy, Komsomol St., 22, Saint Petersburg, 195009, Russia.

E-mail: pervuchin@rambler.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3547-2932>

Olga V. Afanaseva – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Higher Mathematics and Mechanics, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Bolshaya Morskaya St., 67, St. Petersburg, 190000, Russia.

E-mail: ovaf72@guap.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3169-4781>

Igor M. Novozhilov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Automation of Control Processes of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: novozhilovim@list.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2056-3930>

Статья поступила в редакцию 08.10.2024; принята к публикации после рецензирования 24.12.2024; опубликована онлайн 28.02.2025.

Submitted 08.10.2024; accepted 24.12.2024; published online 28.02.2025.
