

УДК: 519.71

DOI: 10.53816/23061456_2022_5-6_13

**МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ
К «ЦИФРОВЫМ ДВОЙНИКАМ» В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ
СЛОЖНЫМИ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ**

**METHODOLOGY FOR JUSTIFICATION OF REQUIREMENTS
FOR «DIGITAL TWINS» IN THE CONTROL SYSTEM
OF COMPLEX ORGANIZATIONAL AND TECHNICAL SYSTEMS**

Канд. техн. наук А.Е. Привалов, канд. воен. наук А.М. Зубачёв, канд. техн. наук В.В. Кравцов

Ph.D. A.E. Privalov, Ph.D. A.M. Zubachev, Ph.D. V.V. Kravtsov

ВКА им. А.Ф. Можайского

В статье рассматривается вопрос оценивания эффективности применения «цифровых двойников» при управлении сложными организационно-техническими системами, ответ на который позволяет предложить методику обоснования общих требований к «цифровым двойникам». Задачами, решаемыми в рамках указанного вопроса, являются: выявление и обоснование показателя эффективности применения «цифрового двойника», определение соответствующих критериев, а также разработка и использование модели оценивания эффективности его применения. В основе модели лежит представление функционирования организационно-технической системы в виде графа состояний, переходы между которыми, в свою очередь, описаны системой дифференциальных уравнений, составленной по правилу Колмогорова. Благодаря полученным решениям на представленные задачи разработана методика, которая и позволяет сформировать вектор требований к «цифровым двойникам».

Ключевые слова: эффективность управления, цифровые двойники, показатель эффективности, ситуационная осведомлённость, правило Колмогорова, требования к характеристикам.

The article considers the issue of evaluating the effectiveness of the use of «digital twins» in the management of complex organizational and technical systems, the answer to which allows us to propose a methodology for substantiating the general requirements for «digital twins». The tasks to be solved within the framework of this issue are the identification and justification of the indicator of the effectiveness of the use of the «digital double», the definition of appropriate criteria, as well as the development and use of a model for evaluating the effectiveness of its application. The model is based on the representation of the functioning of the organizational and technical system in the form of a graph of states, the transitions between which, in turn, are described by a system of differential equations compiled according to Kolmogorov's rule. Thanks to the solutions obtained for the presented tasks, a methodology has been developed that allows us to form a vector of requirements for «digital doubles».

Keywords: management efficiency, digital doubles, performance indicator, situational awareness, Kolmogorov rule, performance requirements.

Введение

К эффективности управления сложными организационно-техническими системами (ОТС) военного назначения предъявляются все более жесткие требования, обусловленные постоянным усложнением условий их применения и динамикой изменения данных условий. Одной из серьезных проблем процесса управления современными ОТС является большой объем информации, необходимой для принятия решений, а также сжатые сроки для ее сбора и обработки (вплоть до режима реального времени). Одним из эффективных путей решения данной проблемы, открываемым современными достижениями в области вычислительной техники и имитационного моделирования, выступает создание «цифровых двойников» (ЦД) объекта управления. Под ЦД в общем случае понимается интеллектуальный аппаратно-программный комплекс, объединяющий возможности математических и физических имитационных моделей объекта управления с возможностями интеллектуальных систем поддержки принятия решений, обеспечивающий управление объектом в реальном времени, моделирование и оценивание эффективности его работы, а также синхронизацию имитационных моделей с состоянием реального объекта за счет непрерывной обработки информации об объекте [1]. Концепция ЦД в настоящее время применяется и активно развивается в различных сферах [2]. Вместе с тем ЦД является лишь моделью объекта управления, которая отличается от реального объекта. Следовательно, управление, основанное на информации, полученной от ЦД, сопряжено с ошибками. В статье предложена новая аналитическая модель оценивания эффективности применения ЦД для управления ОТС военного назначения и методика обоснования общих требований к ЦД, основанная на этой модели.

Обоснование показателя эффективности применения «цифрового двойника»

Для успешного функционирования системы управления (СУ) ОТС требуется определенный объем информации, с увеличением которого эффективность управления повышается. Однако после накопления определенного объема ин-

формации дальнейшее ее увеличение не так существенно. Вместе с тем с изменением объема информации длительность цикла управления изменяется по-разному. В условиях недостатка информации цикл управления удлиняется за счет необходимости рассмотрения множества альтернативных вариантов действий, выбора из них наиболее отвечающих обстановке и возможному развитию событий. По мере увеличения объема используемой информации число альтернативных вариантов уменьшается, а эффективность управления значительно возрастает. Дальнейшее увеличение объема информации приводит к увеличению цикла управления за счет увеличения времени, необходимого на обработку информации и оценку обстановки. Таким образом, максимальная эффективность управления достигается при наличии некоторого необходимого объема информации, что составляет сущность закона зависимости эффективности управления от объема получаемой информации [3]. Для совершенствования СУ ОТС (например, применения ЦД в структуре СУ ОТС), в части ее соответствия данному закону управления необходима разработка формального критерия принятия решения.

Степень владения информацией органом управления характеризуется термином «ситуационная осведомленность» (СО), под которой понимается восприятие элементов окружающей среды и их характеристик во времени и в пространстве, понимание их значения и прогнозирование изменения в ближайшем будущем [4, 5]. Состояние СО является необходимым (но не достаточным) условием максимума эффективности, а достижение данного состояния СУ ОТС, а также поддержание в этом состоянии является целью применения ЦД.

Согласно модели М.Р. Эндсли [5] СО является результатом процесса анализа и оценки окружающей среды, и включает три уровня: восприятие, осмысление и прогнозирование ситуации. Типовой цикл управления состоит из следующих этапов [6]:

1. Сбор информации об объекте управления и внешней среде;
2. Уяснение задачи управления и оценки обстановки;
3. Прогнозирование динамики изменения обстановки;

4. Планирование действий в изменяющихся условиях;

5. Выработка и принятие решения по управлению;

6. Формирование управляющих сигналов, команд, распоряжений, приказов;

7. Доведение управляющих сигналов, команд, приказов и распоряжений.

Первый уровень СО — восприятие ситуации — включает в себя наблюдение множества N параметров, характеризующих состояние объекта управления и внешней среды. Информацию о значениях этих параметров условно можно разделить на:

– информацию о текущей обстановке, поступающей от подчиненных систем, а также от автоматизированных систем управления войсками (I_t);

– информацию о плановом ходе процесса функционирования ОТС (эталонный процесс), источником которой являются планы, сетевые графики и т.п., а также информацию о прогнозе изменения внешней среды (I_n).

Формирование первого уровня соответствует этапу сбора информации об объекте управления и внешней среде. Сущность данного этапа заключается в получении значений параметров объекта управления и внешней среды (путем измерения, наблюдения и т.д.) и сравнении их с плановыми (прогнозируемыми) значениями.

Формирование второго уровня СО выполняется на этапе уяснения задачи управления и оценки обстановки, и включает в себя анализ поступившей информации и задачи управления, отнесение ситуации к одному из классов, требующих того или иного управляющего воздействия.

Формирование третьего уровня СО соответствует этапу прогнозирования динамики изменения обстановки. При осмыслении ситуации и прогнозировании динамики ее изменения возможно возникновение ошибок, причинами которых является недостаточная достоверность представляемой информации. Соответствие уровней модели М.Р. Эндсли этапам принятия решений представлено на рис. 1.

Достижение и поддержание состояния СО органов управления ОТС является целью информационного процесса первых трех этапов цикла управления, выполняемых с применением ЦД. В связи с этим, закон зависимости эффективности управления от объема поступающей информации может быть выражен коэффициентом достижения СО [7]

$$K_{co} = \frac{\mathcal{E}_y^{(PЦД)}}{\mathcal{E}_y^{(ИЦД)}}, \quad (1)$$

где $\mathcal{E}_y^{(PЦД)}$ — показатель эффективности управления с реальным ЦД;

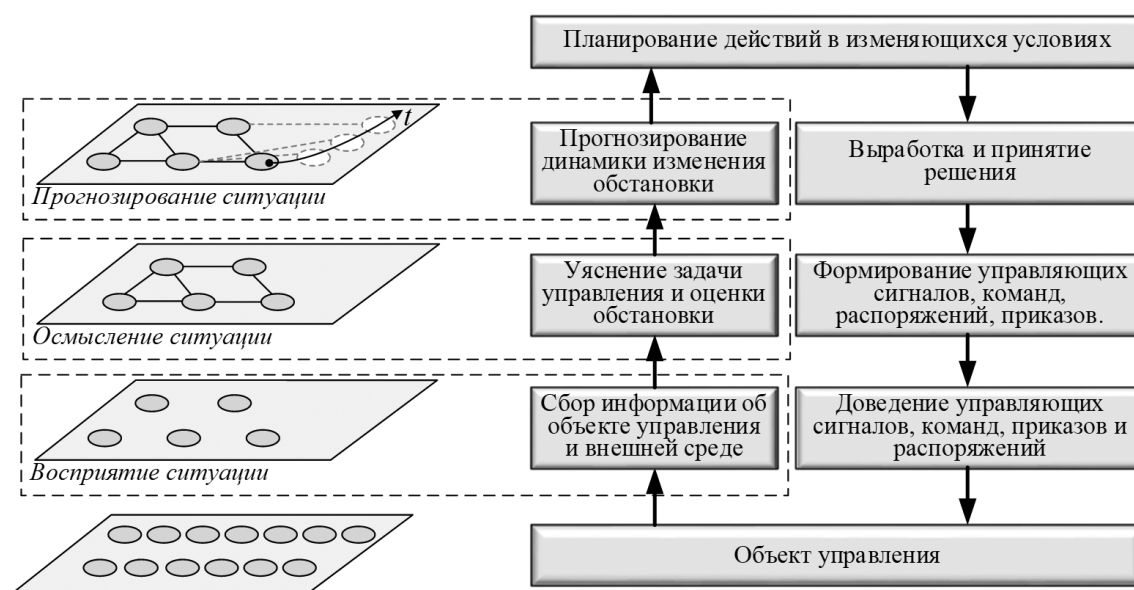


Рис. 1. Соответствие уровней ситуационной осведомленности этапам принятия решений

$\mathcal{E}_y^{(инд)}$ — показатель эффективности управления с идеальным ЦД.

Критерием принятия решения о соответствии СУ ОТС рассматриваемому закону управления может выступать:

– критерий пригодности (в случае анализа одного варианта)

$$K_{co} \geq K_{co}^{треб}, \quad (2)$$

где $K_{co}^{треб}$ — требуемое значение показателя K_{co} ;
– критерий оптимальности (в случае необходимости выбора из нескольких альтернатив)

$$K_{co} \rightarrow \max. \quad (3)$$

Модель оценивания эффективности применения «цифрового двойника»

В процессе функционирования ОТС находится в различных состояниях, которые можно разделить на три класса (рис. 2).

1. S_1 — плановое состояние ОТС. В данном состоянии все параметры системы и внешней среды находятся в плановых (ожидаемых) пределах, управляющих воздействий не требуется.

2. S_2 — управляемое состояние ОТС — состояние, в котором один или несколько параметров системы или внешней среды выходят за пределы ожидаемых значений и со стороны СУ ОТС требуется и существует управляющее воздействие, направленное на перевод системы в состояние S_1 .

3. S_3 — неуправляемое состояние ОТС — состояние, в котором один или несколько параметров системы или внешней среды выходят за пределы ожидаемых значений, но управляющего воздействия, переводящего систему в состояние S_1 , не существует.

Интенсивность перехода из состояния S_1 в состояние S_2 зависит от динамики изменения обстановки, а также от вероятности ошибочного управляющего воздействия

$$\lambda_{12} = \frac{1}{t_{ио}} + \alpha \frac{1}{t_y},$$

где $t_{ио}$ — среднее время изменения обстановки — параметр, характеризующий динамику из-

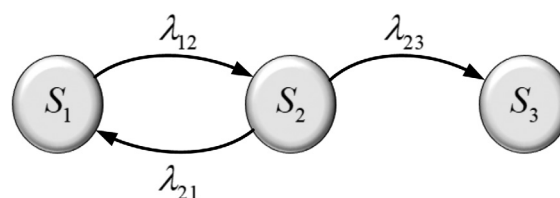


Рис. 2. Граф состояний ОТС

менения обстановки на объекте управления или во внешней среде;

t_y — средняя длительность цикла управления — параметр, отражающий динамические характеристики СУ ОТС;

α — вероятность формирования ошибочного управляющего воздействия в состоянии S_1 (ошибка первого рода).

Интенсивность перехода из состояния S_2 в состояние S_1 зависит от длительности цикла управления при условии правильного управляющего воздействия

$$\lambda_{21} = (1 - \beta) \frac{1}{t_y},$$

где β — вероятность формирования ошибочного управляющего воздействия в состоянии S_2 (ошибка второго рода).

Интенсивность перехода из состояния S_2 в состояние S_3 зависит от динамики развития обстановки и ее перерастания в неуправляемую

$$\lambda_{23} = \frac{1}{t_k},$$

где t_k — среднее время перехода ОТС в неуправляемое состояние.

В соответствии с правилом Колмогорова построим систему дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \dot{p}_1 = -\lambda_{12}p_1 + \lambda_{21}p_2; \\ \dot{p}_2 = \lambda_{12}p_1 - (\lambda_{21} + \lambda_{23})p_2; \\ \dot{p}_3 = \lambda_{23}p_2, \end{cases} \quad (4)$$

где p_1, p_2, p_3 — вероятности состояний S_1, S_2, S_3 соответственно. Данная система является однородной, следовательно, воспользовавшись методом Эйлера для решения подобных систем, можно получить аналитическое решение, которое выглядит следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} p_1 = \\ = \frac{1}{k_5 - k_6} \left((k_1 - k_6)e^{k_5 t} - (k_1 - k_5)e^{k_6 t} \right); \\ p_2 = \\ = -\frac{(k_1 - k_5)(k_1 - k_6)}{k_2(k_5 - k_6)} (e^{k_5 t} - e^{k_6 t}); \\ p_3 = \\ = -\frac{k_5(k_1 - k_5)(k_1 - k_6)}{k_2 k_5 k_6} \left(\frac{1}{k_5 - k_6} (k_6 e^{k_5 t} - k_5 e^{k_6 t}) + 1 \right), \end{array} \right.$$

где $k_1 = -\lambda_{12}$, $k_2 = \lambda_{21}$, $k_3 = \lambda_{12}$, $k_4 = -(\lambda_{21} + \lambda_{23})$, $k_5 = \lambda_{23}$,

$$k_5 = \frac{k_1 + k_4 - \sqrt{(k_1 + k_4)^2 + 4(k_2 k_3 - k_1 k_4)}}{2},$$

$$k_6 = \frac{k_1 + k_4 + \sqrt{(k_1 + k_4)^2 + 4(k_2 k_3 - k_1 k_4)}}{2}.$$

Эффективность управления определяется как свойство процесса управления, характеризующее его приспособленность к достижению цели [8]. Если цель функционирования ОТС можно определить состоянием S_1 , то цель управления ОТС представляет собой выдачу управляющих воздействий, направленных на перевод ОТС в состояние S_1 , т.е. непопадание в поглощающее состояние S_3 . Очевидно, что СУ ОТС не в состоянии поддерживать ОТС в целевом состоянии бесконечно долго, следовательно, эффективность управления целесообразно рассматривать на некотором этапе применения ОТС. Таким образом,

$$\mathcal{E}_y = 1 - p_3(\tau_{\text{ПР}}),$$

где $\tau_{\text{ПР}}$ — длительность этапа применения ОТС;

p_3 — вероятность невыполнения задачи СУ.

Методика обоснования требований к ЦД

Методика обоснования требований к ЦД основывается на модели оценивания эффективности применения ЦД и включает в себя следующие этапы:

1. Оценка динамических характеристик объекта управления и внешней среды $t_{\text{ИЮ}}$ и t_K ;
2. Оценка длительности этапа применения ОТС $\tau_{\text{ПР}}$;
3. Оценка суммарной длительности этапов цикла управления, выполняемых без применения ЦД $t_y^{(\text{ИЦД})}$.
4. Формулирование требований к эффективности применения ЦД по критериям (1) или (2);
5. Проведение анализа технологических возможностей создания ЦД с целью выявления ограничений

$$t_y \geq t_y^{(\min)}, \alpha \geq \alpha^{(\min)}, \beta \geq \beta^{(\min)}; \quad (5)$$

6. Оценка эффективности применения идеального ЦД по формуле (4). Под идеальным ЦД будем понимать ЦД, который обеспечивает отсутствие ошибок первого и второго рода ($\alpha = \beta = 0$), а также предоставление и прогнозирование информации (об объекте управления, внешней среде) в режиме реального времени. Следовательно, для идеального ЦД длительность цикла управления определяется операциями, не зависящими от ЦД $t_y^{(\text{ИЦД})}$;

7. Определение вектора требований к характеристикам ЦД (t_y, α, β) , таких, чтобы эффективность его применения $K_{\text{CO}}(t_y, \alpha, \beta)$, определенная по формуле (1), удовлетворяет ограничениям (5) и критерию (2):

$$\left(\begin{array}{l} t_y, \alpha, \beta | t_y \geq t_y^{(\min)}, \alpha \geq \alpha^{(\min)}, \\ \beta \geq \beta^{(\min)}, K_{\text{CO}}(t_y, \alpha, \beta) \geq K_{\text{CO}}^{\text{треб}} \end{array} \right)$$

или критерию (3):

$$\left(\begin{array}{l} t_y, \alpha, \beta | t_y \geq t_y^{(\min)}, \alpha \geq \alpha^{(\min)}, \\ \beta \geq \beta^{(\min)}, K_{\text{CO}}(t_y, \alpha, \beta) = \max \end{array} \right).$$

Следует отметить, что ввиду наличия аналитического выражения для $K_{\text{CO}}(t_y, \alpha, \beta)$, решение данной задачи может осуществляться с применением известных методов оптимизации.

Заключение

Применение «цифрового двойника» объекта управления в настоящее время является одним из эффективных путей совершенствования СУ ОТС военного назначения. Ключевым элементом так-

тико-технического задания на разработку ЦД является раздел «Тактико-технические требования», который должен включать количественные требования к значениям показателей качества ЦД. Для обоснования данных требований в статье был выявлен показатель эффективности применения ЦД в составе СУ ОТС, разработана аналитическая модель оценивания данного показателя и предложена методика обоснования требований к ЦД в СУ ОТС военного назначения. Данная методика может быть использована органами военного управления, выступающими в качестве заказчика научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию ЦД, на этапе разработки тактико-технического задания.

Литература

1. Жилияев А.А. Методы и средства построения «цифровых двойников» процессов управления предприятиями на основе онтологий и мультиагентных технологий: дис. канд. техн. наук. — Самара. 2021. 137 с.
2. Прохоров А.Н., Лысачев М.Н. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. — М.: ООО «АльянсПринт», 2020. 401 с.
3. Алтухов П.К. Основы теории управления войсками / П.К. Алтухов, И.А. Афонский, И.В. Рыболовский, А.Е. Татарченко; под ред. П.К. Алтухова. — М.: Воениздат, 1984. 221 с.
4. Привалов А.Е. Обоснование архитектуры интерактивной информационной модели процесса подготовки ракеты космического назначения к пуску / А.Е. Привалов, П.Ю. Бугайченко // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2019. Т. 18. № 3. С. 118–130.
5. Kokar M.M. et al. Ontology-based situation awareness // ScienceDirect. Information Fusion 10. 2009. P. 83–98.
6. Автоматизированные системы управления войсками: Учебник. Часть 1: Математическое обеспечение функционирования АСУВ / С.А. Васьков, В.Ф. Волков, А.В. Галанкин, С.А. Тихонов, В.Г. Цыбрин, С.И. Шаныгин. МО РФ. 2010. 392 с.
7. Минаков Е.П. Методы исследования эффективности применения организационно-технических систем космического назначения: учебник / Е.П. Минаков, И.Ш. Шафигуллин, А.М. Зубачев. — СПб: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. 244 с.
8. Петухов Г.Б. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем / Г.Б. Петухов, В.И. Якунин. — М.: АСТ, 2006. 504 с.

References

1. Zhilyaev A.A. Methods and tools for constructing «digital twins» of enterprise management processes based on ontologies and multi-agent technologies: dissertation thesis. — Samara. 2021. 137 p.
2. Prokhorov A.N., Lysachev M.N. Digital twin. Analysis, trends, world experience. — М.: ООО «AlliancePrint», 2020. 401 p.
3. Altukhov P.K. Fundamentals of the theory of command and control / P.K. Altukhov, I.A. Afonsky, I.V. Rybolovsky, A.E. Tatarchenko; ed. P.C. Altukhova. — Moscow: Military Publishing, 1984. 221 p.
4. Privalov A.E. Substantiation of the architecture of an interactive information model of the preparation of a space rocket for launch / A.E. Privalov, P.Yu. Bugaychenko // Bulletin of the Samara University. Aerospace engineering, technology and mechanical engineering. 2019. T. 18. № 3. P. 118–130.
5. Kokar M.M. Ontology-based situation awareness // ScienceDirect. Information Fusion 10. 2009. P. 83–98.
6. Automated command and control systems: Textbook. Part 1: Mathematical support of ACCS functioning / S.A. Vaskov, V.F. Volkov, A.V. Galankin, S.A. Tikhonov, V.G. Tsybrin, S.I. Shanygin. Ministry of Defense of the Russian Federation. 2010. 392 p.
7. Minakov E.P. Methods for studying the effectiveness of the use of organizational and technical systems for space purposes: textbook / E.P. Minakov, I.Sh. Shafigullin, A.M. Zubachev. — SPb: VKA named after A.F. Mozhaisky. 2016. 244 p.
8. Petukhov G.B. Methodological bases of external design of purposeful processes and purposeful systems / G.B. Petukhov, V.I. Yakunin. — М.: АСТ, 2006. 504 p.