

## ВЫБОР ЦЕЛЕСООБРАЗНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ ПРИ НАЛИЧИИ НЕОПРЕДЕЛЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ

С. В. Фролов<sup>1</sup>, Т. А. Фролова<sup>2</sup>

*Кафедры: «Биомедицинская техника» (1);  
«Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении» (2),  
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; sergej.frolov@gmail.com*

**Ключевые слова:** имитационное моделирование; критерий оптимального управления; системы автоматизации; системы управления.

**Аннотация:** Предложена методика выбора целесообразных систем управления, основанная на проведении тендера и учитывающая свойства объекта, характеристики технических средств автоматизации, применяемые алгоритмы управления и действия человека-оператора.

---

Важной стадией при внедрении систем автоматизации технологического процесса (ТП) является предпроектный этап [1 – 5] построения системы управления. На данном этапе возникает проблема выбора целесообразной системы из множества систем, способных выполнять одну и ту же задачу управления, но отличающихся друг от друга по ряду показателей: стоимостью, техническим уровнем, надежностью, затратами на сервисное обслуживание, необходимостью присутствия при эксплуатации высококвалифицированного персонала и т.п.

Данный этап является наиболее важным вследствие существенной неопределенности на этой стадии свойств и характеристик автоматизируемого объекта и действующих на него возмущений, а также вследствие значительных ограничений в отношении времени и других ресурсов, отпущенных на предпроектные исследования. Важность этапа заключается в том, что допущенные ошибки в принятых решениях практически всегда не удается скорректировать в процессе дальнейшей разработки, что приводит к внедрению неэффективных систем.

Среди множества методов оценки ожидаемых результатов автоматизации наиболее эффективными являются методы экспертного оценивания и имитационного моделирования.

Выбор целесообразной системы управления является сложной многокритериальной задачей, где право окончательного решения остается за экспертами. Эксперты принимают решения на основе своих знаний, с учетом объективного отечественного и зарубежного опытов эксплуатации систем автоматизации аналогичных или близких ТП, а также с учетом результатов имитационного моделирования сравниваемых систем. Под имитационным моделированием здесь понимается имитация работы изучаемой динамической системы в реальных условиях ее функционирования в ускоренном масштабе времени.

Модель объекта управления динамической системы может быть представлена в виде оператора

$$M_Y : U \times F \rightarrow Y, \quad (1)$$

где  $U, Y$  – множества управляющих и выходных параметров соответственно;  $F$  – множество всех неопределенностей, действующих в объекте.

Модели системы управления соответствует оператор

$$M_U : Y_3 \times Y \times U \times F \times X \times S \rightarrow U, \quad (2)$$

где  $Y_3$  – множество желаемых выходных параметров управляемого объекта;  $X$  – множество возмущающих воздействий;  $S$  – множество структур системы управления, которая в свою очередь определяется согласно оператору

$$M_S : T \times O \times A \rightarrow S. \quad (3)$$

Здесь  $T$  – множество технических средств автоматизации, которое включает весь спектр устройств: датчики, исполнительные механизмы, контроллеры, операторские станции, программное обеспечение (SCADA-программы, операционные системы и т.п.). Учитывая, что при управлении ТП человек не исключается из системы управления, является одним из самых важных ее элементов, тогда  $O$  является множеством, которое определяет характеристики персонала, участвующего в управлении. Множество  $A$  представляет собой множество классов систем (алгоритмов) управления.

Качество функционирования системы управления характеризуется оператором

$$M_\Phi : Y_3 \times Y \times S \rightarrow \Phi, \quad (4)$$

где  $\Phi$  – множество оценок, включающее экономические показатели: стоимость системы, затраты на эксплуатацию, сервисное обслуживание и т.п.; характеристики качества управления: значение критерия оптимального управления; точность поддержания качественных показателей ТП и др.; показатели надежности системы и т.п.

Структура системы управления определяется тройкой векторов  $\langle \mathbf{t}, \mathbf{o}, \mathbf{a} \rangle$ , каждый из которых характеризует соответственно состав технических средств вектор  $\mathbf{t}$ , состав и квалификацию человек-операторов, участвующих в управлении вектор  $\mathbf{o}$ , класс выбранной системы (алгоритмов) управления вектор  $\mathbf{a}$ .

Таким образом, экспертам, принимающим решения по выбору целесообразной системы управления, для  $W$  вариантов структур систем  $\langle \mathbf{t}_1, \mathbf{o}_1, \mathbf{a}_1 \rangle$ ,  $\langle \mathbf{t}_2, \mathbf{o}_2, \mathbf{a}_2 \rangle$ , ...,  $\langle \mathbf{t}_i, \mathbf{o}_i, \mathbf{a}_i \rangle$ , ...,  $\langle \mathbf{t}_W, \mathbf{o}_W, \mathbf{a}_W \rangle$ , предлагается множество оценок данных систем, полученных на основе операторов (1) – (4). Вектор оценок  $\mathbf{g} = (g_1, g_2, \dots, g_j, \dots)$ ,  $\mathbf{g} \in \Phi$ , для конкретной структуры  $\mathbf{s}$  ( $\mathbf{s} \in S$ ) находится в результате взаимодействия моделей: объекта управления (1), системы управления (2), структуры системы (3) и модели (4) для вычисления вектора оценок.

Вектор неопределенностей  $\mathbf{f}$  характеризует как неопределенность параметров математической модели объекта (1), так и реальные возмущения, действующие на объект: конкретные колебания качества сырьевых компонент и параметров сырьевых потоков, состояния внешней среды [6 – 8]. Вектор  $\mathbf{s}$ , который определяется из модели (3), характеризует в свою очередь точность работы измерительных цепей, управляющих органов, действий человека-оператора и т.п.

Учитывая, что  $\mathbf{f}$  и  $\mathbf{s}$  являются стохастическими величинами, то и вектор оценок  $\mathbf{g} = (g_1, g_2, \dots, g_j, \dots)$ ,  $\mathbf{g} \in \Phi$ , состоит из стохастических составляющих.

В связи с тем, что на мировом рынке идет жесткая конкурентная борьба между фирмами-разработчиками, производителями систем автоматизации и программного обеспечения, и на отечественном рынке предложение в области средств автоматизации значительно превышает спрос, а также, что реальная сис-

тема управления имеет высокую стоимость, фирмы, работающие в сфере автоматизации, настойчиво предлагают свои услуги промышленным предприятиям [2, 3]. Поэтому принятие окончательного решения по выбору структуры  $\langle \mathbf{t}_i, \mathbf{o}_i, \mathbf{a}_i \rangle$ , системы управления должно осуществляться на основе тендера (соревнования различных вариантов) под руководством специальных консалтинговых фирм [5].

Вся процедура проведения тендера может подразделяться на ряд последовательно выполняемых этапов.

1. Формирование перечня участвующих в тендере вариантов  $\langle \mathbf{t}_1, \mathbf{o}_1, \mathbf{a}_1 \rangle$ ,  $\langle \mathbf{t}_2, \mathbf{o}_2, \mathbf{a}_2 \rangle$ , ...,  $\langle \mathbf{t}_i, \mathbf{o}_i, \mathbf{a}_i \rangle$ , ...,  $\langle \mathbf{t}_W, \mathbf{o}_W, \mathbf{a}_W \rangle$ .

2. Разработка технического задания (ТЗ) на тендер. Четкое описание задачи, которую надо решить в результате проведения тендера.

3. Проработка и предоставление документации по каждому  $i$ -му варианту, где должны быть отражены все требования ТЗ на тендер, и достаточно полно описан предлагаемый вариант  $\langle \mathbf{t}_i, \mathbf{o}_i, \mathbf{a}_i \rangle$  для его подробного анализа.

4. Анализ всей документации по каждому  $i$ -му варианту. Сбор добавочных материалов, фиксирующих отдельные требования ТЗ, приведение всей документации к виду, допускающему сопоставление отдельных вариантов по любым выбранным критериям и характеристикам, коррекция документации по отдельным вариантам в целях получения идентичной формы представления различных вариантов.

5. Обоснование совокупности критериев, по которым должны оцениваться сравниваемые варианты. Выбор полного набора этих критериев и ранжировка заказчиком каждого критерия  $g_j$  по важности в виде вектора  $\mathbf{g} = (g_1, g_2, \dots, g_j, \dots, g_D)$ .

6. Выбор и назначение группы, состоящей из  $B$  независимых экспертов в области решаемой задачи, целью работы которых является объективный и обоснованный анализ и сопоставление представленных вариантов по каждому из критериев, указанных заказчиком.

7. Тестирование экспертов в целях определения степени их компетентности, которая выражается для каждого эксперта коэффициентом  $k_b$ ,  $0 \leq k_b \leq 1$ ,  $b = \overline{1, B}$ .

Коэффициент компетентности является нормированной величиной  $\sum_{b=1}^B k_b = 1$ .

8. Определение  $\forall j$  веса  $q_j$ , характеризующего значимость критерия  $g_j$ .

Коэффициенты весов  $q_j$  находятся экспертным путем. Если  $q_{jb}$  – коэффициент веса  $j$ -го критерия, даваемого  $r$ -м экспертом, то средний коэффициент веса  $j$ -го критерия по всем экспертам равен  $q_j = \sum_{b=1}^B q_{jb} k_b$ ,  $j = \overline{1, D}$ . Коэффициент веса  $q_{jb}$

назначается каждым экспертом методом непосредственной оценки, которая представляет собой процедуру приписывания критерию  $g_j$  числового значения в шкале интервалов, например на отрезке  $[0, 1]$ . Коэффициенты весов  $q_j$ , как и коэффициенты компетентности  $k_b$ , являются нормированными величинами

$$\sum_{j=1}^D q_j = 1.$$

9. Проведение имитационных исследований на основе (1) – (4) в целях определения значений  $(g_1, g_2, \dots, g_j, \dots, g_D)$  для каждого варианта  $\langle \mathbf{t}_i, \mathbf{o}_i, \mathbf{a}_i \rangle$ ,  $i = \overline{1, W}$ , системы управления.

10. Подготовка для экспертов сводных материалов по вариантам  $\langle \mathbf{t}_i, \mathbf{o}_i, \mathbf{a}_i \rangle$ ,  $i = \overline{1, W}$ , в основе которых лежат результаты имитационных исследований по определению  $(g_1, g_2, \dots, g_j, \dots, g_D)$ .

11. Работа отобранной группы экспертов. Ознакомление их со сводными материалами и с исходной документацией по всем вариантам. Оценка каждым экспертом всех вариантов отдельно по каждому критерию. Результаты оценки представляются в виде величин  $d_{ib}^j$ ,  $i = \overline{1, W}$ ,  $b = \overline{1, B}$ ,  $j = \overline{1, D}$ , которые назначает эксперт из заданной шкалы оценок, например из отрезка  $[0, 1]$ .

12. Решение полученной задачи многокритериального выбора путем вычисления средней оценки для каждого варианта  $\langle \mathbf{t}_i, \mathbf{o}_i, \mathbf{a}_i \rangle$ ,  $i = \overline{1, W}$ , системы управления по формуле  $d_i = \sum_{j=1}^D \sum_{b=1}^B q_j d_{ib}^j k_b$ ,  $i = \overline{1, W}$ .

13. Ранжировка вариантов  $\langle \mathbf{t}_i, \mathbf{o}_i, \mathbf{a}_i \rangle$ ,  $i = \overline{1, W}$ , согласно вычисленным оценкам  $\mathbf{d}_i$  на этапе 12.

14. Обсуждение экспертами полученного результата. Его утверждение либо обоснованный отказ от его принятия и повторение этапов 9 – 14 для повторных оценок по отдельным критериям с последующим утверждением результата. Например, отказ может быть вызван наличием недостоверных данных, полученных в результате имитационных исследований на компьютере. Требования экспертов могут заключаться в уточнении математических моделей и повторении расчетов по некоторым вариантам систем управления.

15. Рассмотрение заказчиком результатов проведения тендера. Возможны следующие окончательные результаты данной работы:

- утверждение и начало реализации лучшего варианта;
- утверждение с более подробным рассмотрением нескольких вариантов (например, повторные имитационные исследования с уточненными математическими моделями), занявших первые места в общей ранжировке;
- утверждение, но отсрочка реализации варианта из-за выявившихся в результате проведения тендера новых, не учтенных ранее обстоятельств.

Необходимость при выборе целесообразных систем управления сочетания методов экспертного оценивания и имитационного моделирования объясняется следующим. С одной стороны, каждый элемент вектора  $\mathbf{g}$  для  $i$ -го варианта системы управления из-за неопределенностей математических моделей, лежащих в основе имитационных исследований, и стохастичности самого ТП, является стохастической величиной. В этих условиях задача векторной оптимизации трудно формализуема. Участие опытных экспертов в данном случае позволяет принять правильное решение. С другой стороны, имитационные исследования дают экспертам объективную информацию для анализа вариантов.

#### *Список литературы*

1. Ицкович, Э. Л. Эффективность автоматизации химико-технологического производства: предпроектный анализ / Э. Л. Ицкович, Ю. Л. Клоков, Н. В. Шестаков. – М. : Химия, 1990. – 128 с.

2. Корнеева, А. И. Программно-технические комплексы, контроллеры и SCADA-системы / А. И. Корнеева, В. Г. Матвейкин, С. В. Фролов. – М. : ЦНИИТЭнефтехим, 1996. – 219 с.
3. Фролов, С. В. Тенденции развития систем управления технологическими процессами / С. В. Фролов // Приборы и системы управления. – 1996. – № 9. – С. 6 – 8.
4. Фролов, С. В. Методы решения глобальной задачи управления для распределенных иерархических систем с интервальной неопределенностью / С. В. Фролов, Т. А. Фролова // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 4 (189). – С. 232 – 245. doi: 10.23683/2311-3103-2017-4-232-245
5. Ицкович, Э. Л. Новая сфера деятельности – консалтинг предприятий в области КИП, автоматизации и компьютеризации / Э. Л. Ицкович // Приборы и системы управления. – 1994. – № 11. – С. 17 – 19.
6. Дворецкий, С. И. Современные методы синтеза энерго- и ресурсосберегающих процессов и аппаратов / С. И. Дворецкий // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 3. – С. 584 – 590.
7. Дворецкий, С. И. Интегрированное проектирование гибких автоматизированных химико-технологических процессов при наличии неопределенности / С. И. Дворецкий, Д. С. Дворецкий // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2004. – Т. 10, Юбилейный, № 2. – С. 379 – 396.
8. Фролова, Т. А. Решение интервальных математических моделей технологических процессов [Электронный ресурс] / Т. А. Фролова, С. В. Фролов, Д. С. Туляков // Электрон. науч.-техн. изд. «Наука и образование». – Сентябрь 2012. – № 09. – С. 343 – 360. – Режим доступа : <http://technomag.edu.ru/doc/454499.html> (дата обращения: 25.09.2018).

---

## Selecting the Process Control System Subject to Uncertain Parameters

S. V. Frolov<sup>1</sup>, T. A. Frolova<sup>2</sup>

*Departments of Biomedical Technology (1),  
Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering (2),  
TSTU, Tambov, Russia; sergej.frolov@gmail.com*

**Keywords:** simulation modeling; optimal control criterion; automation systems; control systems.

**Abstract:** The paper proposes a methodology for selecting appropriate control systems. The proposed methodology involves tender management and takes into account the properties of an object, the characteristics of technical automation equipment, the applied control algorithms and the human operator actions.

### *References*

1. Itskovich E.L., Klokov Yu.L., Shestakov N.V. *Effektivnost' avtomatizatsii khimiko-tekhnologicheskogo proizvodstva: predproyektnyy analiz* [Automation Efficiency of Chemical-Technological Production: Pre-Project Analysis], Moscow: Khimiya, 1990, 128 p. (In Russ.)
2. Korneyeva A.I., Matveykin V.G., Frolov S.V. *Programmno-tekhnicheskiye komplekсы, kontrollery i SCADA-sistemy* [Program-Technical Complexes, Controllers and SCADA-systems], Moscow: TSNIITeneftkhim, 1996, 219 p. (In Russ.)

3. Frolov S.V. [Trends in the Development of Process Control Systems], *Pribory i sistemy upravleniya* [Instruments and Control Systems], 1996, no. 9, pp. 6-8. (In Russ.)

4. Frolov S.V., Frolova T.A. [Methods for Solving the Global Control Problem for Distributed Hierarchical Systems with Interval Uncertainty], *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskkiye nauki* [Izvestiya SFU. Technical Science], 2017, no. 4 (189), pp. 232-245, doi: 10.23683/2311-3103-2017-4-232-245

5. Itskovich E.L. [New Field of Activity – Consulting Enterprises in the Field of Instrumentation, Automation and Computerization], *Pribory i sistemy upravleniya* [Devices and Control Systems], 1994, no. 11, pp. 17-19. (In Russ.)

6. Dvoretzkiy S.I. [Modern Methods of Synthesis of Energy- and Resource-Saving Processes and Devices], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2008, vol. 14, no. 3, pp. 584-590. (In Russ., abstract in Eng.)

7. Dvoretzkiy S.I., Dvoretzkiy D.S. [Integrated Design of Flexible Automated Chemical-Technological Processes in the Presence of Uncertainty], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2004, vol. 10, Yubileynyy, no. 2, pp. 379-396. (In Russ., abstract in Eng.)

8. <http://technomag.edu.ru/doc/454499.html> (accessed 25 September 2018).

---

### **Die Auswahl des zweckmäßigen Steuersystems der technologischen Prozesse bei Vorhandensein der unbestimmten Parameter**

**Zusammenfassung:** Es ist die Methodik der Auswahl der zweckmäßigen Steuersysteme angeboten, die auf der Durchführung des Tenders gegründet ist und die die Eigenschaften des Objektes, die Charakteristiken der technischen Mittel der Automatisierung, die verwendeten Steuerungsalgorithmen und die Handlungen des menschlichen Operators berücksichtigt.

---

### **Choix d'un système de gestion de processus approprié en présence des paramètres indéfinis**

**Résumé:** Est proposée une méthode de la sélection des systèmes du contrôle appropriés basée sur l'appel d'offres et tenant compte des propriétés de l'objet, du fonctionnement des moyens techniques d'automatisation, des algorithmes du contrôle utilisés et des actions de l'opérateur humain.

---

**Авторы:** *Фролов Сергей Владимирович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Биомедицинская техника»; *Фролова Татьяна Анатольевна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**Рецензент:** *Туголуков Евгений Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.