

УДК 519.688  
DOI: 10.15827/0236-235X.120.619-624

Дата подачи статьи: 16.08.17  
2017. Т. 30. № 4. С. 619–624

## **АРХИТЕКТУРА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭВОЛЮЦИЕЙ МНОГОСТАДИЙНЫХ ПРОЦЕССОВ В НЕЧЕТКОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СРЕДЕ**

*Б.В. Палюх, д.т.н., профессор, pboris@tstu.tver.ru;*  
*А.Н. Ветров, к.т.н., профессор, vetrov\_48@mail.ru;*  
*И.А. Егерева, к.т.н., доцент, irina.egereva@gmail.com*  
*(Тверской государственный технический университет,  
наб. Аф. Никитина, 22, г. Тверь, 170026, Россия)*

В статье излагаются ключевые элементы подхода к созданию системы интеллектуальной информационной поддержки инноваций на предприятии, основанного на интеграции механизмов поиска инновационных решений, методов управления эволюцией производственно-технологической системы с использованием созданного хранилища инновационных решений, алгоритмов согласованной оптимизации и идентификации технологических параметров. Рассмотрена возможность использования предложенного подхода применительно к базовому варианту модели функционирования производственно-технологической системы.

Проект посвящен фундаментальной научной проблеме создания методов и средств моделей оптимального управления эволюцией многостадийных процессов в условиях динамической неопределенности для повышения их эффективности и долгосрочной устойчивости в течение всего жизненного цикла. Многостадийный процесс рассматривается как многоагентная система, эффективность управления которой зависит от согласованного поведения центра и агентов, их заинтересованности в поиске и внедрении инновационных решений, умения анализировать возможности эволюционного развития.

Подход, лежащий в основе предлагаемого в проекте формального аппарата для оптимального управления эволюцией многостадийных процессов, включает разработку и исследование математической модели управления эволюцией многостадийных процессов в нечеткой динамической среде. Он также предполагает разработку метода решения задачи управления эволюцией многостадийных процессов в виде оптимального (субоптимального) закона управления с обратной связью и исследование асимптотических свойств решений полученного функционального уравнения для автономных систем. Разработка методов согласованной оптимизации при взаимодействии центра и группы агентов в условиях расширения их производственно-технологических возможностей также составляет содержание проекта.

Реализация разрабатываемых методов и моделей предполагает создание прототипа интеллектуальной системы оптимального управления эволюцией многостадийных процессов в нечеткой динамической среде.

**Ключевые слова:** информационная система, управление эволюцией, оптимальное управление, многостадийные процессы.

Формальная модель производственно-технологической системы [1–5] описывает иерархическое взаимодействие между центром и агентами, обеспечивающими функционирование определенной технологической стадии производственного процесса. Каждый агент обладает свойствами активности и автономности и участвует в обеспечении функционирования определенной технологической стадии производственного процесса. Центр принимает плановые решения о производстве продукции на основе анализа состояния производственно-технологической системы. При этом он не имеет точного представления о технологических возможностях агентов. Для формирования согласованного плана в полном объеме с учетом всех глобальных и локальных ограничений, отражающих интересы как центра, так и агентов, необходимо разработать специальные процедуры получения экспертной информации и обмена ею между центром и агентами. В нечеткой динамической среде процесс управления эволюцией характеризуется рядом особенностей, таких как альтернативность и неопределенность путей достижения цели с высоким риском, невозможность точного планирова-

ния, ориентация на прогнозные оценки, противоречивость в сфере экономических отношений и интересов участников процесса [6, 7].

### **Формулировка задачи оптимального управления эволюцией производственно-технологической системы**

Рассмотрим производственно-технологическую систему, состоящую из стадий  $S_1, S_2, \dots, S_N$ . Состояние технической системы на входе  $n$ -й стадии обозначим через  $x_n$ , а на выходе  $x_{n+1}$ . При этом результатные показатели  $n$ -й стадии являются входными для  $(n+1)$ -й стадии. Управление на  $n$ -й стадии обозначим через  $u_{n+1}$ .

Пусть  $X_0, \dots, X_N$  – соответствующие пространства состояний, а  $U_1, \dots, U_N$  – пространства управлений. Если  $x_{n-1} \in X_{n-1}$  – состояние системы на входе стадии  $n$ , в результате использования управления  $u_n \in U_n$  на выходе стадии  $n$  формируется состояние  $x_n \in X_n$ . Переменные  $x_{n-1}, u_n, x_n$  связаны между собой нечетким отношением  $S_n$  с функцией принадлежности  $\mu_{S_n}(x_{n-1}, u_n, x_n)$  [8].

Будем считать, что цель управления характеризуется нечетким целевым множеством  $G$  в пространстве  $X_N$  с функцией принадлежности  $\mu_G$ . Задача управления заключается в отыскании последовательности управлений  $u_1, u_2, \dots, u_N$ , обеспечивающей наибольшее удовлетворение нечеткой цели  $G$  при условии, что начальное состояние  $x_0$  задано.

Нечеткое множество  $G$  представляет собой цель управления, и задача состоит в отыскании последовательности управлений, обеспечивающей максимальную степень принадлежности состояния  $x_0$  нечеткому множеству  $G$  при условии, что эволюция технологической системы описывается композицией нечетких множеств  $S_1, \dots, S_N$  и  $G$ .

Таким образом, процедура построения оптимального управления нечеткой технологической системой распадается на два уровня (рис. 1).

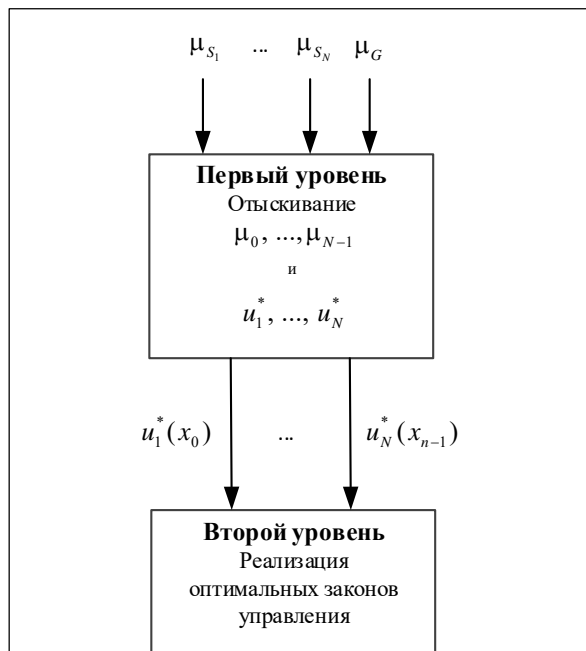


Рис. 1. Процедура построения оптимального управления нечеткой динамической системой

Fig. 1. The procedure for constructing the optimal control of a fuzzy dynamic system

Входными данными первого уровня являются функции принадлежности  $\mu_{S_1}, \dots, \mu_{S_N}, \mu_G$ . На данном уровне определяются оптимальные управления  $u_1^*, \dots, u_N^*$ . При этом, согласно основным принципам теории динамического программирования, управления  $u_1^*, \dots, u_N^*$  всегда можно построить в виде законов управления с обратной связью, то есть  $u_n^* = u_n^*(x_{n-1}), n = 1, \dots, N$ .

Для решения поставленной задачи была разработана структура программного комплекса, позволяющего формировать множество решений, направленных на улучшение производственных показателей каждой стадии технической системы.

### Описание структуры системы оптимального управления эволюцией многостадийной производственно-технологической системы

Предложенная структура программного комплекса управления эволюцией многостадийной производственно-технологической системы включает четыре блока, работа с которыми позволяет решать возникшую в процессе функционирования системы проблемную ситуацию (рис. 2).

Опишем отдельные блоки, составляющие основу комплекса.

**Блок 1.** Приведение нечетко описанной проблемы к ряду частных задач.

На первом этапе принятия решения необходимо определить, к какому классу технологических систем относится рассматриваемая система, чтобы выявить основные закономерности и тенденции развития подобных систем.

Такой подход позволит сократить затраты на прогнозирование развития технологической системы как до внедрения инновационных решений, так и после, а также обеспечить направленность на получение перспективных решений.

Конечное состояние любой технологической системы  $V_j$  можно описать в виде

$$V_j \rightarrow \begin{pmatrix} c_1(V_j) \\ c_2(V_j) \\ \dots \\ c_h(V_j) \end{pmatrix},$$

где  $V_j$  – технологическая система;  $c_1, c_2, \dots, c_h$  – параметры, характеризующие состояние системы.

Анализ вектора параметров системы  $V_j$ , содержащегося в подсистеме определения класса технологической системы, позволит выполнить подготовительный этап алгоритма управления.

При обнаружении недостатков функционирования системы на любой ее стадии (ошибочное выполнение этапа, несоответствие фактических анализируемых показателей эталонным и т.д.) проблема обычно сформулирована нечетко, что приводит к избыточному количеству возможных методов решений. Поэтому необходимо сформулировать задачу таким образом, чтобы предлагаемые исследователем решения были максимально эффективными.

Считается, что для достижения данной цели необходимо и достаточно ввести ряд ограничений по ресурсам, по техническим и производственным характеристикам:

$$L\varphi \rightarrow \begin{pmatrix} l_1(V_\varphi) \\ l_2(V_\varphi) \\ \dots \\ l_m(V_\varphi) \end{pmatrix},$$

где  $L$  – система ограничений для  $\varphi$ -й технической системы;  $l_1, l_2, \dots, l_m$  – ограничения.

Далее проводится оценка сложности внедрения полученных решений, анализируются степень материальных затрат, необходимость привлечения дополнительных трудовых ресурсов и т.д.

Подсистема оценки сложности внедрения решений предусматривает проведение предварительных расчетов различных затрат при внесении изменений в функционирование технологической системы (см. таблицу).

**Взаимосвязи решений и показателей при анализе сложности внедрения**

**Interrelation of decisions and indicators in the implementation complexity analysis**

Показатель	Решение			
	$A_1$	$A_2$	...	$A_g$
$B_1$	$B_{11}$	$B_{12}$	...	$B_{1g}$
$B_2$	$B_{21}$	$B_{22}$	...	$B_{2g}$
...	...	...	...	
$B_q$	$B_{q1}$	$B_{q2}$	...	$B_{qg}$

Примечание:  $A_1, A_2, \dots, A_g$  – предложенные решения задач;  $B_1, B_2, \dots, B_q$  – анализируемые показатели, позволяющие оценить сложность внедрения.

Каждое пересечение  $A_g$  и  $B_q$  предусматривает проведение ряда расчетных и аналитических исследований.

**Блок 2.** Известно, что управление сложной технической системой в целом состоит из решений частных задач, при исследовании которых необходимо выяснить следующее:

- из каких частей состоит рассматриваемая система и как они взаимодействуют между собой;
- на какой стадии функционирования системы наблюдается наибольшее количество проблем;
- какие стадии и этапы стадий можно корректировать и изменять;
- какие связи между стадиями и этапами можно корректировать;
- какие изменения, предположительно, приведут к повышению эффективности функционирования системы, а какие к понижению.

Особое внимание уделяется рассмотрению технического противоречия [1], заключающегося в высокой вероятности улучшения одного параметра за счет ухудшения другого.

В нечеткой технологической системе процесс управления характеризуется рядом особенностей, таких как альтернативность и неопределенность путей достижения цели, невозможность точного

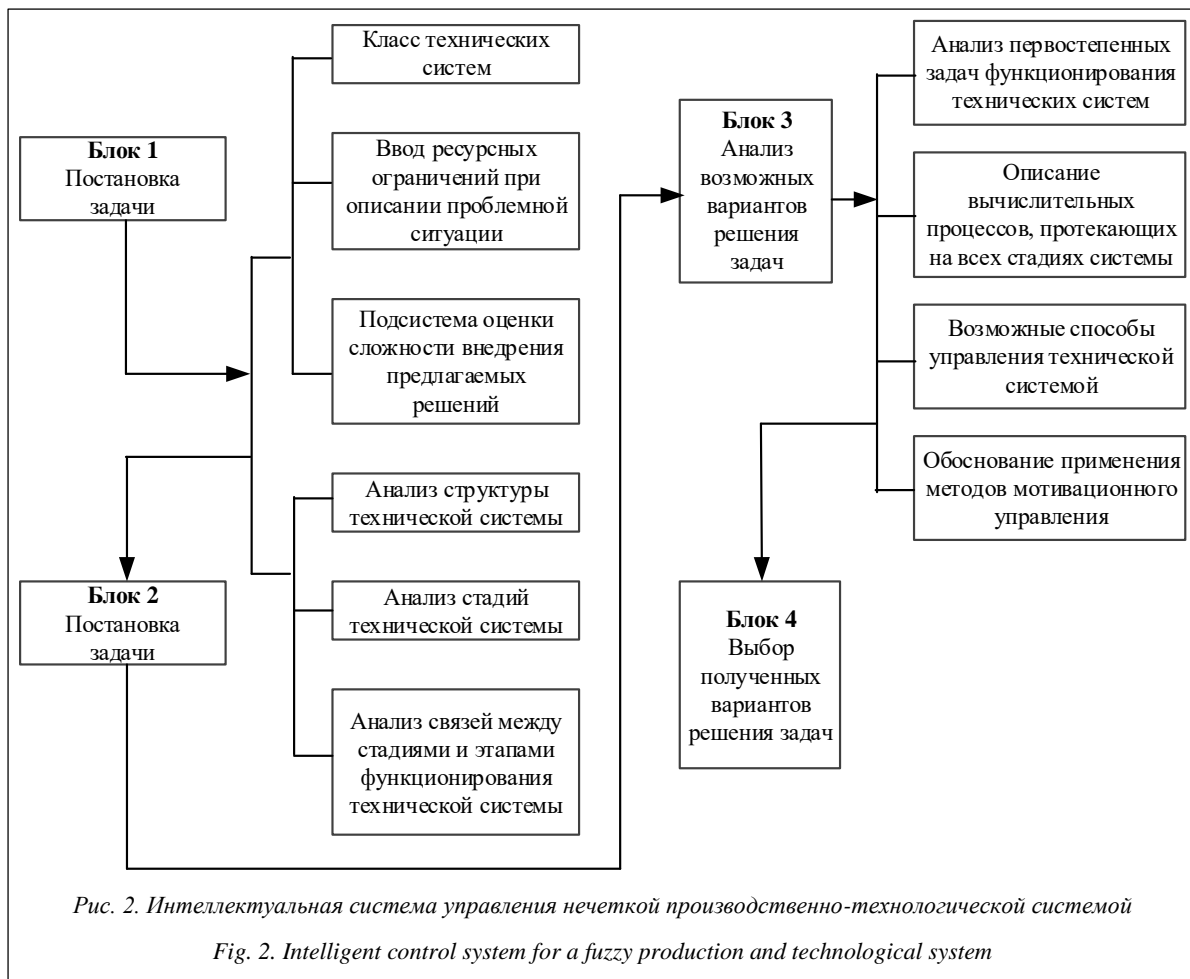


Рис. 2. Интеллектуальная система управления нечеткой производственно-технологической системой

Fig. 2. Intelligent control system for a fuzzy production and technological system

планирования, ориентация на прогнозные оценки, противоречивость в сфере экономических отношений и интересов участников процесса. В связи с этим возникает необходимость разработки алгоритмического обеспечения исследования рассматриваемой задачи.

**Блок 3.** Анализ возможных вариантов решения задачи. Управление технологической системой включает в себя:

- анализ первостепенных задач функционирования технологической системы;
- описание вычислительных процессов, протекающих на различных стадиях действия системы;
- описание возможных способов управления технологической системой;
- обоснование применения элементов мотивационного управления.

Программный комплекс управления нечеткой технологической системой, кроме описанных выше блоков 1 и 2, включает еще и ряд компонент:

- компоненты первичной и вторичной обработки нечеткой информации;
- комплекс организации обмена информацией с аппаратурой, системой контрольно-измерительных приборов;
- комплекс контроля технического состояния оборудования;
- комплекс планирования работ;
- комплекс поиска инновационных решений по управлению эволюцией технологической системы;
- комплекс контроля результатов производства (экономическая составляющая, соответствие качества продукции заданным характеристикам и т.п.).

Более подробно приведенные компоненты и комплексы, а также схема обработки информации и управления эволюцией нечеткой технической системой рассмотрены в работе [2].

**Блок 4.** Выбор предложенных вариантов решений задач. В результате работы программного комплекса получаем множество параметров  $p_j \in P$ , оценивающих содержание вариантов решений и их эффективность. Пользователь устанавливает приоритетные требования к полученным решениям задачи  $P = \{p_1(a_j), p_2(a_j), \dots, p_r(a_j), j=1, \dots, k\}$ .

Для простоты обозначим пересечение нечетких множеств  $A$  и  $P$  как  $Y = A \cap P$ , пересечение множеств  $S$  и  $L$  как  $H = S \cap L$ .

Для построения функции принадлежности  $\mu_Y$  множества  $Y$  каждому  $y_i(x_j)$  поставим в соответствие число  $\mu_{y_i}(x_j)$ , где  $i = 1, \dots, k, j = 1, \dots, n, 0 \leq \mu_{y_i}(x_j) \leq 1$ .

Аналогичным образом для построения функции принадлежности  $\mu_X$  множества  $X$  каждому  $h_i(x_i)$  по-

ставим в соответствие число  $\mu_{h_i}(x_j)$ , где  $i = 1, \dots, l, j = 1, \dots, n, 0 \leq \mu_{h_i}(x_j) \leq 1$ . При  $\mu_{y_i}(x_j) = 0$  и  $\mu_{h_i}(x_j) = 0$  по данному описанию решение точно не подходит, при  $\mu_{y_i}(x_j) = 1$  и  $\mu_{h_i}(x_j) = 1$  решение точно подходит, при  $0 < \mu_{y_i}(x_j) < 1$  и  $0 < \mu_{h_i}(x_j) < 1$  – промежуточные варианты.

Будем считать, что решение – это сформированное в процессе функционирования многошаговой системы поиска вариантов множество решений  $D$ , максимально отвечающее поставленным в запросе условиям.

Тогда положим

$$\mu_Y(x_n) = \min\{\mu_{y_k}(x_n), \dots, \mu_{y_k}(x_k)\}$$

$$\text{и } \mu_H(x_n) = \min\{\mu_{h_k}(x_n), \dots, \mu_{h_k}(x_l)\}.$$

Таким образом, для поиска подходящего решения из множества  $D$  выбирается тот вариант, у которого функция принадлежности будет наибольшей:  $\mu_D(x) = \min\{\mu_Y(x), \mu_H(x)\}$ .

#### Пример реализации программного комплекса управления нечеткой технологической системой

Применение программного комплекса управления нечеткой технологической системой предполагает формирование списка возможных вариантов решения задачи с указанием коэффициента соответствия предложенного варианта требуемому результату, учитывая данные, полученные на этапе применения блока 3 (рис. 3).

В качестве примера приведем задачу, которая решалась при управлении технологическим процессом на целлюлозно-бумажном комбинате. При анализе качественных характеристик целлюлозы было выявлено, что ее оптические показатели не соответствуют требуемым. В результате функционирования программного комплекса был сформирован ряд вариантов решения задачи и подсчитаны коэффициенты, определяющие эффективность предлагаемых изменений в технологии. Наилучший вариант (коэффициент подбора варианта равен 0,7) предполагает добавление дополнительных отбеливающих веществ в волокнистую массу, таких как пероксид водорода и дитионит натрия (рис. 3).

Рассматриваемый вариант обладает следующей особенностью: эффективность отбеливающего действия пероксида водорода определяется его эффективной концентрацией. Реализация нового варианта технологии позволила улучшить качество выпускаемой продукции без снижения объемов производства.

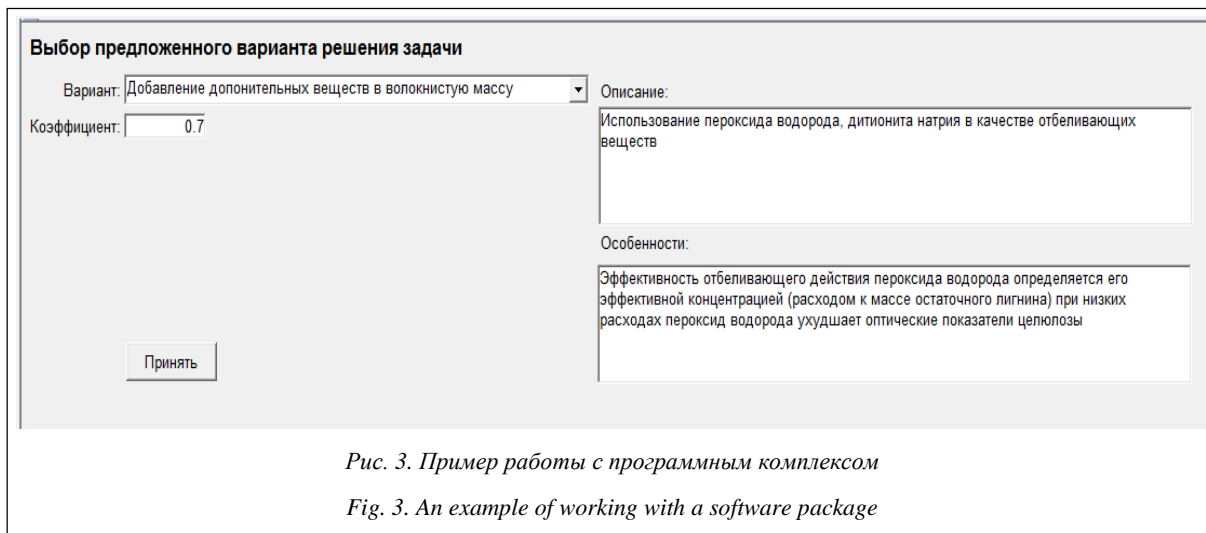


Рис. 3. Пример работы с программным комплексом

Fig. 3. An example of working with a software package

### Заключение

Интеллектуальная информационная поддержка инноваций на предприятии, основанная на интеграции механизмов поиска инновационных решений, моделей и методов управления эволюцией производственно-технологической системы, применения алгоритмов согласованной оптимизации и идентификации производственно-технологических параметров, позволяет улучшить технологические и экономические показатели функционирования промышленного предприятия. Пример использования предлагаемого подхода к управлению эволюцией химико-технологической системы на основе инноваций приведен в [9]. Использование информационной системы поддержки инноваций позволило найти и принять решение о включении в технологическую схему дополнительных операций и ступеней обработки сырья. Также на основе анализа дополнительной информации было принято решение о необходимости замены некоторых веществ, участвующих в технологическом процессе, на аналогичные, но обладающие улучшенными свойствами. Это позволило увеличить объем выпускаемой продукции, повысить показатели качества готовой продукции. При этом себестоимость готовой продукции снизилась за счет снижения затрат на закупку вспомогательных веществ, также применяемых на данной стадии. За счет улучшения вышеперечисленных показателей функционирования промышленного предприятия произошло увеличение прибыли.

Таким образом, интеллектуальная информационная поддержка инноваций на предприятии, основанная на интеграции механизмов поиска инновационных решений, моделей и методов управления эволюцией промышленного производства, применение алгоритмов согласованной оптимизации производственно-технологических параметров

позволяют стимулировать поиск инноваций и тем самым улучшать технологические и экономические показатели функционирования промышленного предприятия.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 17-07-01339 А.*

### Литература

1. Занг В.Б. Синергетическая экономика. Время и перемены в нелинейной экономической теории; [пер. с англ.]. М.: Мир, 1999. 335 с.
2. Palyukh B.V., Vetrov A.N., Egereva I.A., Kozlova Yu.G. The information model of evolution control of multistage processes of production and technical systems in fuzzy dynamic environments. Open Semantic Technologies for Intelligent Systems, Belarus, Minsk, 2017.
3. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. М.: Физматлит, 2012. 604 с.
4. Божитский С.С., Семенкин Е.С., Семенкина О.Э. Гибридный эволюционный алгоритм для задач выбора эффективных вариантов систем управления // Автоматизация и современные технологии. 2005. № 11. С. 24–31.
5. Аржаков М.В., Цыганов В.В. Адаптивные механизмы функционирования интегрированных производственных систем // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта: тез. докл. конф. М., 2005. С. 127–131.
6. Голов Р.С., Мельник А.В. Инновационно-синергетическое развитие промышленных организаций (теория и методология). М.: Дашков и Ко, 2013. 420 с.
7. Акбердина В.В. Синергетические модели формирования и развития экономико-технологической реальности: монография. Екатеринбург: Изд-во Ин-та экономики УрО РАН, 2010. 248 с.
8. Паллох Б.В., Дзюба С.М., Егерев И.А. Простейшая задача терминального управления нечеткими динамическими системами // Обобщенные постановки и решения задач управления (GSSCP-2014): сб. трудов Междунар. симпоз. М.: Физматлит, 2014. С. 72–80.
9. Паллох Б.В., Виноградов Г.П., Егерев И.А. Управление эволюцией химико-технологической системы // Теоретические основы химической технологии. 2014. Т. 48. № 3. С. 1–7.
10. Manning C.D., Raghavan P., Schütze H. Introduction to information retrieval. Cambridge Univ. Press, 2008, 482 p.

**ARCHITECTURE OF AN INTELLIGENT OPTIMAL CONTROL SYSTEM  
FOR MULTI-STAGE PROCESSES EVOLUTION IN A FUZZY DYNAMIC ENVIRONMENT****B.V. Palyukh**<sup>1</sup>, *Dr.Sc. (Engineering), Professor, pboris@tstu.tver.ru***A.N. Vetrov**<sup>1</sup>, *Ph.D. (Engineering), Professor, vetrov\_48@mail.ru***I.A. Egereva**<sup>1</sup>, *Ph.D. (Engineering), Associate Professor, irina.egereva@gmail.com*<sup>1</sup> *Tver State Technical University, Nikitin Quay 22, Tver, 170026, Russian Federation*

**Abstract.** The article considers key elements of the approach to creating a system of intellectual information support of innovations at the enterprise. The approach is based on the integration of search mechanisms for innovative solutions and methods of industrial-technological system evolution control using the created store of innovative solutions, algorithms of coordinated optimization and process parameters identification. The paper examines the possibility of using the proposed approach with respect to the base version of the industrial-technological system functioning model.

The project is dedicated to a fundamental scientific problem of developing methods and model means of optimal control of multi-step processes evolution under conditions of dynamic uncertainty to enhance their effectiveness and long-term sustainability throughout their life cycle. The authors consider a multistage process as a multi-agent system, its effective management depends on consistent behavior of the center and agents, their interest in finding and implementing innovative solutions, ability to analyze the possibilities of evolutionary development.

The approach behind the proposed in the project of a formal apparatus for optimal control of multi-step process evolution includes development and study of a mathematical model of managing multi-stage processes evolution in a fuzzy dynamic environment. It also involves development of a method of solving the problem of managing multi-stage processes evolution in the form of the optimal (suboptimal) control law with feedback and the study of asymptotic properties of solutions for a functional equation obtained for autonomous systems. The project content also includes development of methods for coordinated optimization when the center interacts with agent groups in terms of expanding their production and technological capabilities.

Implementation of the developed methods and models involves creating a prototype of an intelligent system for optimum control of a multi-stage processes evolution in a fuzzy dynamic environment.

**Keywords:** informational system, evolution managing, optimal control, multistage processes.

**Acknowledgements.** *The work has been supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 17-07-01339 A.*

**References**

1. Zhang V.B. *Synergetic economics: Time and changes in nonlinear economic theory*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg Publ., 1991, 246 p. (Russ. ed.: Mir Publ., 1999, 335 p.).
2. Palyukh B.V., Vetrov A.N., Egereva I.A., Kozlova Yu.G. The information model of evolution control of multistage processes of production and technical systems in fuzzy dynamic environments. *Open Semantic Technologies for Intelligent Systems*. Belarus, Minsk, 2017.
3. Novikov D.A. *Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami* [The theory of managing organizational systems]. 3rd ed. Moscow, Fizmatlit Publ., 2012, 604 p.
4. Bezhitsky S.S., Semenkina E.S., Semenkina O.E. A hybrid evolutionary algorithm for selecting effective control system options. *Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii* [Automation. Modern Technologies]. 2005, no. 11, pp. 24–31 (in Russ.).
5. Argakov M.V., Tsyganov V.V. Adaptive mechanisms of integrated production systems functioning. *Tez. dokl. conf. "Systemy proektirovaniya, tekhnologicheskoy podgotovki i upravleniya etapami zhiznennogo tsykla promyshlennogo produkta"* [Systems of Design, Technological Preparation of Manufacture and Management of Industrial Product Life Cycle Stages: Thesis Report Conf.]. Moscow, IPU RAN Publ., 2005, pp. 127–131 (in Russ.).
6. Golov R.S., Mylnik A.V. *Innovatsionno-sinergeticheskoe razvitiye promyshlennykh organizatsiy (teoriya i metodologiya)* [Innovative-Synergetic Development of Industrial Organizations (Theory and Methodology)]. "Dachkov i Ko" Publ., 2013, 420 p.
7. Akberdina V.V. *Sinergeticheskie modeli formirovaniya i razvitiya ekonomiko-tekhnologicheskoy realnosti* [Synergetic Models for Economic and Technological Reality Formation and Development]. Monograph. Ekaterinburg, Institut ekonomiki UrO RAN Publ., 2010, 248 p.
8. Palyukh B.V., Dzyuba S.M., Egereva I.A. The simplest task for terminal management of fuzzy dynamic systems. *Obobshchennye postanovki i resheniya zadach upravleniya. Sb. tr. mezhdunar. simp. GSSCR-2014* [Generalized Statements and Solutions to Management Problems (GSSCP-2014)]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2014, pp. 72–80 (in Russ.).
9. Palyukh B.V., Vinogradov G.P., Egereva I.A. Management of the chemical and technological system evolution. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Engineering]. Nauka Publ., 2014, vol. 48, no. 3, pp. 1–7 (in Russ.).
10. Manning C.D., Raghavan P., Schütze H. *Introduction to Information Retrieval*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, England, 2008, 482 p.