

13. Anchurin S.A., Maksimov V.N., Morozov E.S., Golovan' A.S., Shilov V.F. Blok inertsi-al'nykh datchikov [Unit inertial sensors], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and Microsystem technology], 2011, No. 1, pp. 50-53.
14. Elwenspoek M., Wiegerink R. Silicon micro accelerometers, *Mechanical microsensors*, 2005, pp. 230-236.
15. Lysenko I.E. Modeling of the micromachined angular rate and linear acceleration sensors LL-type with redirect of drive and sense axis, *World Applied Sciences Journal*, 2013, No. 27 (6), pp. 759-762.
16. Lysenko I.E. Integral'nyy sensor uglovykh skorostey i lineynykh uskoreniy [Integrated sensor of angular velocities and linear accelerations], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering journal of Don], 2010, No. 3. Available at: <http://ivdon.ru/magazine/> (free access).
17. Lysenko I.E., Lysenko A.V. Integral'nye sensory uglovykh skorostey i lineynykh uskoreniy LR-tipa na osnove uglernodnykh nanotrubok // *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering journal of Don], 2012, No. 4. Available at: <http://ivdon.ru/magazine/> (free access).
18. Lysenko I.E., Ezhova O.A. Kriterii ravenstva sobstvennykh chastot kolebaniy chuvstvitel'nykh elementov mikromekhanicheskikh giroskopov-akselerometrov [The criteria of equality of the natural frequencies of oscillation of the sensitive elements of micromechanical gyroscopes-accelerometers], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering journal of Don], 2014, No. 2. Available at: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2475> (free access).
19. Lysenko I.E. Funktsional'no integrirovannyye mikro- i nanomekhanicheskie sensory uglovykh skorostey i lineynykh uskoreniy [Functionally integrated micro - and nanomechanical sensors of angular velocities and linear accelerations]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2013, 167 p.
20. Lysenko I.E., Kulikova I.V., Polishchuk E.V., Khayrulina V.A. Modelirovanie elementov mikrosistemnoy tekhniki v programme ANSYS [Modeling elements of Microsystems technology in the ANSYS program]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2007, 42 p.
21. Abramov I.I. Problemy i printsipy fiziki i modelirovaniya pribornykh struktur mikro- i nanoelektroniki. Ch. II. Modeli poluklassicheskogo podkhoda [Problems and principles of physics and modeling of device structures of micro- and nanoelectronics. Part II. Model semiclassical approach], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and Microsystem technology], 2006, No. 9, pp. 26-36.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Б.Г. Коноплев.

**Лысенко Игорь Евгеньевич** – Южный федеральный университет; e-mail: [ielysenko@sfedu.ru](mailto:ielysenko@sfedu.ru); 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371603; кафедра конструирования электронных средств; д.т.н.; зав. кафедрой.

**Ежова Ольга Александровна** – e-mail: [ezhova.08.05@gmail.com](mailto:ezhova.08.05@gmail.com); кафедра конструирования электронных средств; аспирант.

**Lysenko Igor Evgenievich** – Southern Federal University, e-mail: [ielysenko@sfedu.ru](mailto:ielysenko@sfedu.ru); 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371603; the department of electronic apparatuses design; professor.

**Ezhova Olga Aleksandrovna** – email: [ielysenko@sfedu.ru](mailto:ielysenko@sfedu.ru); the department of electronic apparatuses design; postgraduate student.

УДК 519.711

DOI 10.23683/2311-3103-2017-4-232-245

**С.В. Фролов, Т.А. Фролова**

## **МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ГЛОБАЛЬНОЙ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ИЕРАРХИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИНТЕРВАЛЬНОЙ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТЬЮ**

*В большинстве практических случаев для неопределённых параметров технологических процессов нахождение характеристик законов распределения и функций принадлежности является затруднительным. Обычно для неопределённых параметров известны только интервалы их значений. Целью исследования является разработка теоретических*

основ построения системы управления сложным химико-технологическим процессом в условиях интервальной неопределённости параметров. Сложный химико-технологический процесс совместно с системой управления представляет собой сложную химико-технологическую систему. Первый или нижний уровень управления иерархической структуры составляют аппараты или машины совместно с локальными системами управления, построенными на основе программируемых микроконтроллеров. Элементы нижнего уровня иерархии объединяются по технологическому принципу в блоки, которые вместе с системой управления блоком образуют второй уровень иерархии. Третий или верхний уровень иерархии составляет совокупность элементов второго уровня и система управления этой совокупностью. Управление подпроцессами второго уровня иерархии осуществляют координирующие станции, которые получают координирующие сигналы от системы управления третьего уровня, информационные сигналы с нижнего уровня и подают управляющие сигналы на нижний уровень иерархии. Координирующая станция верхнего уровня управляет системами второго уровня. Поставлены глобальные задачи управления распределённой трёхуровневой иерархической системой с интервальными параметрами: задача получения удовлетворительных решений и задача оптимизации. Задача получения удовлетворительных решений сводится к поиску управлений, при которых для любых значений неопределённых параметров из заданных интервалов выполняются установленные технологические требования. Глобальная задача оптимизации дополняется условием достижения критерием оптимального значения в условиях неопределённости. Сформулированы принципы, предложены методы и алгоритмы декомпозиции глобальной задачи управления, позволяющие в технологических процессах с интервальной неопределённостью параметров решение глобальной задачи свести к параллельно решаемым задачам управления. Изложенный подход дает возможность на стадии разработки для каждой задачи применить принцип модульности. Этот принцип заключается в том, что при формализации, постановке и алгоритмизации каждой задачи может участвовать свой независимый разработчик, которому не обязательно знакомиться с содержанием других задач. Принцип модульности позволяет изменять или модифицировать задачу, не вызывая каких-либо последствий в других задачах. Результаты работы являются теоретической основой для проектирования новых и модернизации существующих систем управления производствами, характеризующихся множеством стадий, энерго- и материалоемкостью, наличием большого количества параметров и возмущений.

*Химико-технологический процесс; интервальная неопределённость; иерархическая система управления; декомпозиция задачи управления; задача оптимизации.*

**S.V. Frolov, T.A. Frolova**

#### **METHODS FOR SOLVING THE GLOBAL CONTROL PROBLEMS FOR DISTRIBUTED HIERARCHICAL SYSTEMS WITH THE INTERVAL UNCERTAINTY**

*Finding the characteristics of distribution and membership functions is difficult in most practical cases for uncertain parameters of technological processes. Usually only the intervals of uncertain parameters values are known. A complex chemical-technological process together with a control system is considered as a complex chemical-technological system. The first or the lower level of control of the hierarchical structure is composed of machines or machines in conjunction with local control systems based on programmable microcontrollers. Elements of the lower level of the hierarchy are coupled according to the technological principle into blocks, which together with the block management system form the second level of the hierarchy. The third or upper level of the hierarchy is the set of the elements of the second level and the control system. Control of the second-level sub-processes of the hierarchy is carried out by coordinating stations that receive coordinating signals from the third-level control system, information signals from the lower level, and provide control signals to the lower level of the hierarchy. The coordinating station of the top controls the systems of the second level. The aim of the study is the formulation of theoretical foundations for the development of the control system for complicated chemical processes with interval parameter uncertainties. Global control problems are formulated for a three-level hierarchical system with interval uncertainty of parameters: the problem of obtaining satisfactory solu-*

*tions and the optimization problem. The problem of obtaining satisfactory solutions reduces to the search control in which for all values of uncertain parameters from the specified intervals the technological requirements are fulfilled. The global optimization problem is supplemented for achieving optimal value criterion under uncertainty. The principles are formulated; methods and algorithms are proposed for decomposition of the global control problems, which allow reducing a global control problem to a set of control problems, which could be solved in parallel for technological processes with the interval uncertainty of parameters. The presented approach makes it possible to apply the modularity principle for each task at the development stage. This principle is that each of the tasks can be formalized, set up and algorithmized by an independent developer who does not need to get acquainted with the content of other tasks. The modularity principle allows modifying a task without causing any consequences in other tasks. The results are the theoretical basis for the design of new and modernization of existing control systems for production, which is characterized by a plurality of stages, energy and materials consumption, the presence of a large number of parameters and disturbances.*

*Chemical-technological process; interval uncertainty; hierarchical control system; decomposition of control problem; optimization problem.*

**Введение.** При управлении современными технологическими процессами существует проблема высокой размерности и неопределенности их параметров [1]. Проблему размерности решает иерархическое построение систем управления, декомпозиция задачи управления и параллельная организация вычислительного процесса [2, 3].

Другая характеристика – неопределенность неизбежно присутствует практически в любой задаче проектирования и управления (принятия решения) [4, 5]. Под неопределенностью будем понимать неоднозначность исходных данных, относящихся к технологическому процессу, на основе которых вырабатываются управляющие воздействия.

Неопределенность может вызываться стохастическим поведением объекта (действие неконтролируемых внутренних и внешних возмущений), погрешностями датчиков, исполнительных механизмов, информационных каналов, неточностью математической модели объекта и т.п.

Для работы в условиях неопределенности известны три основные методологии: теория нечетких множеств [6], стохастический подход [5] и интервальный анализ [4, 5, 7].

В большинстве практических случаев для параметров технологических процессов определение характеристик законов распределения и функций принадлежности является затруднительным. Обычно для неопределённых параметров известны только интервалы их значений [4, 5, 7].

Актуальной задачей является разработка новых методов управления сложными технологическими процессами с интервальной неопределённостью параметров на основе распределённых систем, построенных по иерархическому принципу.

**1. Принципы построения и функционирования иерархических систем управления технологическими процессами.** В терминологии общей теории систем [8, 9] технологические процессы, которые обеспечивают превращение исходного сырья в целевой продукт путем прохождения материальных потоков через определенное число функционально различных ступеней переработки, относятся к классу сложных систем. На основе общепринятой терминологии, эти системы называются химико-технологическими системами (ХТС) [10, 11].

Элементом ХТС считается аппарат или машина, в которых протекает химико-технологический процесс, качественно (или) и количественно преобразующий физические переменные входных материальных и энергетических потоков в физические переменные выходных материальных и энергетических потоков. Таким образом, каждый элемент ХТС осуществляет преобразование, которое представляется типовым технологическим оператором (ТТО).

Процесс, составляющий отдельную единицу ХТС, в общем случае формализуется как физико-химическая система (ФХС) [11]. Оператор ТТО является суперпозицией целого ряда элементарных технологических операторов, и имеет смешанную детерминированно-стохастическую природу.

В соответствии с [10] ХТС совместно с системой управления (АСУ ТП) образует сложную ХТС (СХТС). Эта СХТС представляет собой трехуровневую иерархическую систему (рис. 1). Под иерархической системой будем понимать систему, состоящую из взаимосвязанных подсистем, каждая из которых в свою очередь является иерархической по своей структуре.

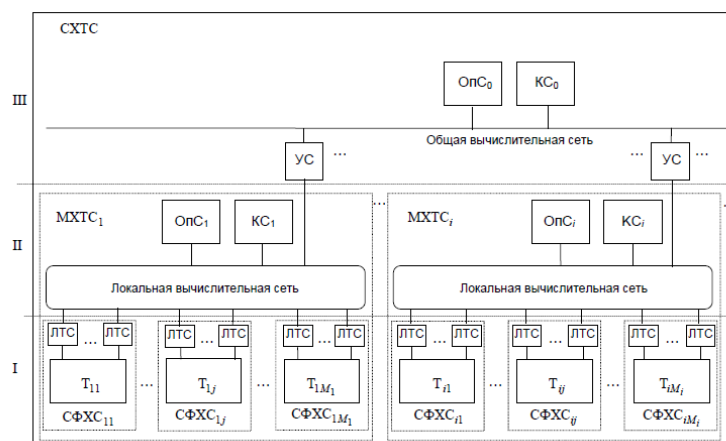


Рис. 1. Иерархическая трехуровневая структура СХТС

Первый или нижний уровень иерархической структуры СХТС составляют ТТО и локальные системы управления. Средством нижнего уровня управления ТТО является локальная технологическая станция (ЛТС) [12–17], которая непосредственно соединяется с датчиками, исполнительными устройствами и решает автономные задачи управления ТТО. В современной терминологии ЛТС представляет собой программируемый контроллер или микропроцессорный регулятор [18], снабженный средствами для работы в составе сети. Совокупность ТТО ( $T_{ij}$ ) (рис. 1) и локальной системы управления, включающей ряд ЛТС, будем называть сложной ФХС (СФХС).

Сложная ХТС (СХТС) разделяется на отдельные блоки, выделенные по технологическому принципу. Блок  $i$  ( $i = \overline{1, N}$ ) состоит из совокупности  $\langle \text{СФХС}_{i1}, \text{СФХС}_{i2}, \dots, \text{СФХС}_{ij}, \dots, \text{СФХС}_{iM_i} \rangle$ , образующей подпроцесс  $P_i$ , и системы управления подпроцессом  $P_i$ . Каждый блок называется малой ХТС (МХТС) [11], а множество  $\langle \text{МХТС}_1, \text{МХТС}_2, \dots, \text{МХТС}_i, \dots, \text{МХТС}_N \rangle$  образует второй уровень иерархии СХТС.

В состав системы управления второго уровня иерархии входит операторская станция (ОпС<sub>ᵢ</sub>) и координирующая станция (КС<sub>ᵢ</sub>) ( $i = \overline{1, N}$ ) [12–17]. Операторская станция выполнена в виде промышленного компьютера и выполняет функции диспетчерского управления, визуализации процесса, сбора и архивации данных, обеспечивает связь между оператором и ТТО, а также служит задачам по программированию, настройке и контролю за работой ЛТС. Координирующая стан-

ция предназначается для решения сложных прикладных вычислительных задач и является промышленным компьютером большой вычислительной мощности. Связь между первым и вторым уровнем иерархии в рамках МХТС осуществляется через локальную вычислительную сеть (ЛВС), к которой подключены ЛТС, ОпС<sub>*i*</sub> и КС<sub>*i*</sub> ( $i = \overline{1, N}$ ).

Третий или верхний уровень иерархии СХТС составляет совокупность  $\langle \text{МХТС}_1, \text{МХТС}_2, \dots, \text{МХТС}_i, \dots, \text{МХТС}_N \rangle$  и система управления этой совокупностью. В состав системы управления верхнего уровня СХТС входят связанные по общей вычислительной сети ОпС<sub>0</sub> и КС<sub>0</sub>. Станции верхнего уровня выполняют функции по управлению МХТС, которые аналогичны задачам, решаемым ОпС<sub>*i*</sub> и КС<sub>*i*</sub> на втором уровне иерархии. Связь между вторым и третьим уровнями осуществляется через устройства связи (УС).

Таким образом, СХТС соответствует определенному технологическому процессу (ТП), обеспечивающему превращение исходного сырья в готовый для реализации конечный продукт, т.е. исходные и конечные продукты СХТС являются товарными.

Пусть *i*-ый подпроцесс, которому соответствует совокупность  $\langle \text{СФХС}_{i1}, \text{СФХС}_{i2}, \dots, \text{СФХС}_{ij}, \dots, \text{СФХС}_{iM_i} \rangle$  задается отображением:

$P_i: U_i \times X_i \times B_i \times F \rightarrow Y_i, i = \overline{1, N}$ , где  $U_i$  – множество управляющих сигналов  $u_i$ , приходящих с КС<sub>*i*</sub>;  $X_i$  – множество контролируемых возмущений  $x_i$ ;  $B_i$  – множество входов  $b_i$ , посредством которых подпроцесс  $P_i$  связывается с другими подпроцессами;  $F$  – множество неопределенностей, связанных со всеми факторами  $f$  ( $f \in F$ ), влияющими на выход  $y_i$  подпроцесса  $P_i$ ;  $Y_i$  – множество выходов  $y_i$  подпроцесса  $P_i$ .

Будем считать, что множество неопределенных параметров определяется интервальным вектором, т.е.  $[\mathbf{f}] \equiv F$ .

Будем рассматривать *i*-ую координирующую станцию КС<sub>*i*</sub> (рис. 2) как локальную систему управления подпроцессом  $P_i$ .

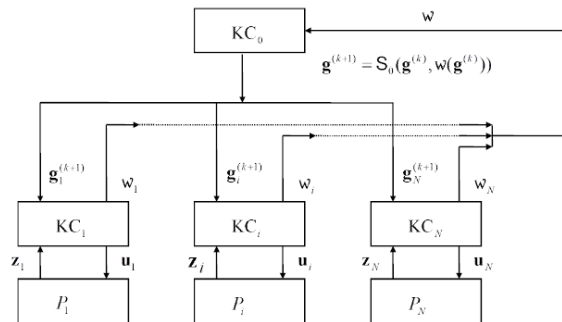


Рис. 2. Иерархия процесса решения глобальной задачи СХТС

К системе КС<sub>*i*</sub> поступают сигналы двух видов: координирующий сигнал  $g_i$  ( $g_i \in G_i$ ) от вышестоящей системы управления КС<sub>0</sub> и информационный сигнал обратной связи  $z_i$  ( $z_i \in Z_i$ ) от подпроцесса  $P_i$ . Множества  $G_i$  и  $Z_i$  образуют соответственно множества координирующих и сигналов обратной связи. Выходом КС<sub>*i*</sub> является локальное управление  $u_i$ , выбираемое из множества управлений  $U_i$  ( $u_i \in U_i$ ). Считается, что КС<sub>*i*</sub> реализует отображение:

$$KC_i: G_i \times Z_i \rightarrow U_i$$

или

$$\mathbf{u}_i = KC_i(\mathbf{g}_i, \mathbf{z}_i) \\ i = \overline{1, N}.$$

Множества управляющих сигналов  $U$ , информационных сигналов  $Z$  и выходов  $Y$  в масштабах всей СХТС представляются в виде декартова произведения:

$$U = U_1 \times U_2 \times \dots \times U_i \times \dots \times U_N,$$

$$Z = Z_1 \times Z_2 \times \dots \times Z_i \times \dots \times Z_N,$$

$$Y = Y_1 \times Y_2 \times \dots \times Y_i \times \dots \times Y_N.$$

Составляющие  $\mathbf{g}_i$  выходного сигнала  $\mathbf{g}$  станции  $KC_0$  являются координирующими для станций  $KC_1, \dots, KC_i, \dots, KC_N$ , где

$$\mathbf{g} = \langle \mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2, \dots, \mathbf{g}_i, \dots, \mathbf{g}_N \rangle, \quad G = G_1 \times G_2 \times \dots \times G_i \times \dots \times G_N, \quad \mathbf{g} \in G.$$

Системы управления можно подразделить на жесткие и адаптивные. Жесткой системой будем называть систему, имеющую неизменяемый оператор, который устанавливает связь между векторами входных параметров и выходным вектором управлений. Адаптивной системой будем считать систему, в которой оператор, связывающий вход и выход, меняется в зависимости от входных параметров. В рассматриваемом случае имеется отображение вида:

$$K_i: G_i \times Z_i \rightarrow A_i$$

или

$$KC_i = K_i(\mathbf{g}_i, \mathbf{z}_i), \\ i = \overline{1, N},$$

где  $A_i$  – множество операторов управления. Для жесткой системы множество операторов управления состоит из одного элемента:  $A_i = \{KC_i\}$ .

Станция  $KC_0$  осуществляет отображение:  $KC_0: \mathcal{W} \rightarrow G$ , в котором  $\mathcal{W} = \mathcal{W}_1 \times \mathcal{W}_2 \times \dots \times \mathcal{W}_i \times \dots \times \mathcal{W}_N$ , где  $\mathcal{W}_i$  – множество поступающих со станции  $KC_i$  информационных сигналов, с помощью которых осуществляется обратная связь. Сигнал обратной связи  $\mathbf{z}_i$ , поступающий на вход локальной системы управления  $KC_i$ , содержит информацию относительно поведения подпроцесса  $P_i$  и связан функциональной зависимостью с управляющим сигналом  $\mathbf{u}_i$ , интервальным вектором неопределенных параметров и выходом  $\mathbf{y}_i$ :

$$F_i: U_i \times F \times Y_i \rightarrow Z_i, \\ i = \overline{1, N}.$$

Поступающий по каналам обратной связи информационный сигнал  $\mathcal{W}$  направляется в вышестоящую систему управления  $KC_0$ , содержит в себе информацию относительно поведения нижестоящих систем управления и задается отображением:

$$F_0: G \times Z \times U \rightarrow \mathcal{W}, \quad \text{где } \mathcal{W} \text{ – множество информационных сигналов}$$

$\mathcal{w}$  ( $\mathcal{w} \in \mathcal{W}$ ). Информационный сигнал  $\mathcal{w} = \langle \mathcal{w}_1, \mathcal{w}_2, \dots, \mathcal{w}_i, \dots, \mathcal{w}_N \rangle$ , ( $\mathcal{w} \in \mathcal{W}$ ) является функцией координирующего сигнала  $\mathbf{g}$ , информационного сигнала обратной связи  $\mathbf{z} = \langle \mathbf{z}_1, \dots, \mathbf{z}_i, \dots, \mathbf{z}_N \rangle$ , ( $\mathbf{z} \in Z$ ) от нижестоящих систем и управляющего воздействия  $\mathbf{u} = \langle \mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_i, \dots, \mathbf{u}_N \rangle$ , ( $\mathbf{u} \in U$ ), поступающего на нижестоящие системы.

Предполагается, что существует связанная с системой управления  $KC_0$  решаемая задача  $D_0(\mathbf{W})$  и множество решений  $G$ , таких, что для любого  $\mathbf{w} \in \mathcal{W}$  выход  $\mathbf{g} = KC_0(\mathbf{w})$  ( $\mathbf{g} \in G$ ) есть решение задачи  $D_0(\mathbf{w})$ . Таким образом, сигнал обратной связи  $\mathbf{w}$  конкретизирует задачу  $D_0(\mathbf{w})$ . Аналогично координирующий сигнал  $\mathbf{g}$  и сигнал обратной связи  $\mathbf{z}$  конкретизирует совокупность задач  $\{D_1(\mathbf{g}_1, \mathbf{z}_1), \dots, D_i(\mathbf{g}_i, \mathbf{z}_i), \dots, D_N(\mathbf{g}_N, \mathbf{z}_N)\}$ . Задача  $D_i(\mathbf{g}_i, \mathbf{z}_i)$  связана с нижестоящей системой управления  $KC_i$  так, что для каждой пары  $(\mathbf{g}_i, \mathbf{z}_i)$  из множества  $G_i \times Z_i$  вектор управлений  $\mathbf{u}_i$ , определяемый как  $\mathbf{u}_i = \mathbf{d}_i(\mathbf{g}_i, \mathbf{z}_i)$ , является решением задачи  $D_i(\mathbf{g}_i, \mathbf{z}_i)$ .

Для упрощения дальнейших выкладок определим  $P(\mathbf{u}, D)$ , где  $D$  - произвольно решаемая задача (совокупность задач), как предикат:

$P(\mathbf{u}, D) \equiv \mathbf{u}$  есть решение задачи (совокупности задач)  $D$ .

Пусть с СХТС связана глобальная задача  $\hat{D}$ . Задачи  $\{D_1(\mathbf{g}_1, \mathbf{z}_1), \dots, D_i(\mathbf{g}_i, \mathbf{z}_i), \dots, D_N(\mathbf{g}_N, \mathbf{z}_N)\}$ , которые решаются нижестоящими системами управления  $KC_i$  ( $i = \overline{1, N}$ ), координируемы относительно глобальной задачи  $\hat{D}$ , если справедливо следующее предложение:

$$(\exists \mathbf{g}), (\exists \mathbf{u}) : [P(\mathbf{u}, \{D_1(\mathbf{g}_1, \mathbf{z}_1), \dots, D_i(\mathbf{g}_i, \mathbf{z}_i), \dots, D_N(\mathbf{g}_N, \mathbf{z}_N)\}) \text{ и } P(\mathbf{u}, \hat{D})] \quad (1)$$

Координируемость относительно глобальной задачи  $\hat{D}$  означает, что система управления (координатор)  $KC_0$  может влиять с помощью сигналов  $\mathbf{g} = \langle \mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2, \dots, \mathbf{g}_i, \dots, \mathbf{g}_N \rangle$  на нижестоящие системы управления  $KC_i$  ( $i = \overline{1, N}$ ) так, чтобы их результирующее воздействие  $\mathbf{u} = \langle \mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_i, \dots, \mathbf{u}_N \rangle$  на процесс в целом давало решение глобальной задачи  $\hat{D}$ .

Координирующие сигналы  $\mathbf{g}$  из  $G$  могут содержать прогноз связующих входов подпроцессов  $P_i$ , которые будут иметь место в связи с подачей управляющих воздействий  $\mathbf{u} = \langle \mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_i, \dots, \mathbf{u}_N \rangle$ . Прогноз связующих входов представляется в виде оценочной области  $B^g = B_1^g \times B_2^g \times \dots \times B_i^g \times \dots \times B_N^g$ , которой принадлежит вектор связующих входов  $\mathbf{b}^g \in B^g$ , ( $\mathbf{b}^g = \langle \mathbf{b}_1^g, \mathbf{b}_2^g, \dots, \mathbf{b}_i^g, \dots, \mathbf{b}_N^g \rangle$ ). Оценочную область  $B^g$  будем представлять в виде интервального вектора, т.е.  $[\mathbf{b}]^g \equiv B^g$  и  $[\mathbf{b}_i]^g \equiv B_i^g$ ,  $i = \overline{1, N}$ .

Связующие сигналы  $\mathbf{b} = \langle \mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \dots, \mathbf{b}_i, \dots, \mathbf{b}_N \rangle$ , поступающие на входы подпроцессов  $P_i$ , могут быть функционально связаны с управляющими воздействиями  $\mathbf{u}$ , контролируруемыми возмущениями  $\mathbf{x}$  и неопределенными параметрами  $\mathbf{f}$ :  $\mathbf{R} : U \times X \times F \rightarrow B$ , где множество связующих входов  $B$  является подмножеством множества выходов  $Y$  ( $B \subset Y$ ).

Для решения проблемы координации сформулируем принцип оценки взаимодействий. Форма принципа оценки взаимодействий выражается предложением:

$$(\forall \mathbf{g}), (\forall \mathbf{u}) : \{P(\mathbf{u}, \{D_1(\mathbf{g}_1, \mathbf{z}_1), \dots, D_i(\mathbf{g}_i, \mathbf{z}_i), \dots, D_N(\mathbf{g}_N, \mathbf{z}_N)\}) \text{ и } \mathbf{R}(\mathbf{u}, \mathbf{x}, \mathbf{f}) \in B^g\} \Rightarrow P(\mathbf{u}, \hat{D}) \quad (2)$$

Координатор  $KC_0$  определяет область  $B^g$ , в пределах которой составляющие вектора связующих входов  $\mathbf{b}^g$  могут варьироваться. Этот принцип утверждает, что управляющее воздействие  $\mathbf{u}$  решает поставленную глобальную задачу  $\hat{D}$  всякий раз, когда  $\mathbf{u}$  является решением задач  $\{D_1(\mathbf{g}_1, \mathbf{z}_1), \dots, D_i(\mathbf{g}_i, \mathbf{z}_i), \dots, D_N(\mathbf{g}_N, \mathbf{z}_N)\}$  и фактические значения составляющих вектора связующих входов  $[\mathbf{b}] = R(\mathbf{u}, \mathbf{x}, [\mathbf{f}])$ , появляющиеся при применении управляющего воздействия  $\mathbf{u}$ , попадают внутрь прогнозируемой оценочной области  $B^g$ .

**2. Постановка глобальной задачи управления СХТС.** Глобальная задача СХТС  $\hat{D}$  может быть задачей получения удовлетворительных решений (задачей "удовлетворения") [19, 20] или задачей оптимизации.

Глобальная задача "удовлетворения" формулируется следующим образом. Пусть технологические требования  $\varphi_s$  ( $s = \overline{1, S}$ ) задают отображения:

$$\varphi_s: U \times X \times Y \rightarrow R, \\ s = \overline{1, S}.$$

Технологическому процессу СХТС соответствует отображение:  $P: U \times F \rightarrow Y$ , где  $F$  – множество всех возможных значений неопределенных параметров;  $P$  – оператор технологического процесса.

Дано множество допустимых управлений  $U$ . Требуется найти такое  $\mathbf{u} \in U$  для заданного  $\mathbf{x} \in X$ , при котором справедливо:

$$\min_{\mathbf{y} \in [\mathbf{y}]} \varphi_s(\mathbf{u}, \mathbf{x}, \mathbf{y}) \geq a_s, \quad (3)$$

$$[\mathbf{y}] = P(\mathbf{u}, \mathbf{x}, [\mathbf{f}]), \\ s = \overline{1, S}, \quad (4)$$

где  $[\mathbf{y}] = \langle [y_1], [y_2], \dots, [y_i], \dots, [y_N] \rangle$  – интервальный вектор выходов подпроцессов  $P_i$ ;  $[\mathbf{f}]$  – интервальный вектор неопределенных параметров; параметры  $a_s$ , ( $s = \overline{1, S}$ ) определяют уровни технологических требований.

Решение  $\mathbf{u}$  считается удовлетворительным, если оно приводит к значениям  $(\forall s): \min_{\mathbf{y} \in [\mathbf{y}]} \varphi_s(\mathbf{u}, \mathbf{x}, \mathbf{y})$ , не опускающихся ниже определенного уровня  $a_s$ .

Для глобальной задачи оптимизации СХТС вводится понятие целевой функции:

$$\mathbf{J}: U \times X \times Y \rightarrow Q, \\ \text{или} \\ \mathbf{J} = \mathbf{J}(\mathbf{u}, \mathbf{x}, \mathbf{y}), \quad (5)$$

где  $Q$  – множество значений критерия целевой функции  $\mathbf{J}$ .

Глобальная задача оптимизации СХТС формулируется следующим образом. Необходимо найти такие  $\mathbf{u}^* \in U$ ,  $\mathbf{y}^* \in Y$ , при которых для заданного  $\mathbf{x} \in X$ , любого  $\mathbf{u} \in U$ ,  $\mathbf{y} \in Y$  справедливо:  $\mathbf{J}(\mathbf{u}^*, \mathbf{x}, \mathbf{y}^*) \geq \max_{\mathbf{y} \in [\mathbf{y}]} \mathbf{J}(\mathbf{u}, \mathbf{x}, \mathbf{y})$ , и выполняются условия (3)–(4).

В частном случае для задач "удовлетворения" и оптимизации множество неопределенностей  $F$  может быть пустым множеством:  $F = \emptyset$ .

**3. Решение проблемы декомпозиции глобальной задачи СХТС.** Для решения глобальной задачи  $\hat{D}$  необходимо решить проблему ее декомпозиции. Под декомпозицией задачи  $\hat{D}$  понимается определение таких задач  $D_0(\mathbf{W})$  и



$\{D_1(\mathbf{g}_1, \mathbf{z}_1), \dots, D_i(\mathbf{g}_i, \mathbf{z}_i), \dots, D_N(\mathbf{g}_N, \mathbf{z}_N)\}$ , которые могут быть поставлены соответственно перед вышестоящей КС<sub>0</sub> и нижестоящими системами управления КС <sub>$i$</sub>  ( $i = \overline{1, N}$ ) так, чтобы имело место выполнение следующих условий.

Должен быть выполнен принцип координации.

Должен быть найден эффективный алгоритм поиска координирующего сигнала  $\mathbf{g}$  такой, чтобы задачи  $\{D_1(\mathbf{g}_1, \mathbf{z}_1), \dots, D_i(\mathbf{g}_i, \mathbf{z}_i), \dots, D_N(\mathbf{g}_N, \mathbf{z}_N)\}$  были координируемы относительно глобальной задачи  $\hat{D}$ , т.е. должно быть справедливо предложение (1).

Иерархия решения глобальной задачи СХТС  $\hat{D}$  показана на рис. 2.

Координатор КС<sub>0</sub> получает информацию  $\mathbf{W}$  от локальных блоков КС <sub>$i$</sub> , путем решения задачи  $D_0(\mathbf{W})$  выбирает координирующий сигнал  $\mathbf{g}^{(k)}$  и посылает нижестоящим системам управления КС <sub>$i$</sub>  ( $i = \overline{1, N}$ ) сигнал  $\mathbf{g}^{(k)} = \langle \mathbf{g}_1^{(k)}, \mathbf{g}_2^{(k)}, \dots, \mathbf{g}_i^{(k)}, \dots, \mathbf{g}_N^{(k)} \rangle$ . Получив координирующий сигнал  $\mathbf{g}_i^{(k)}$  и сигнал обратной связи  $\mathbf{z}_i$ , локальная система управления КС <sub>$i$</sub>  определяет управление  $\mathbf{u}_i^{(k)}$ , являющееся решением задачи  $D_i(\mathbf{g}_i^{(k)}, \mathbf{z}_i)$ , и посылает информацию координатору КС<sub>0</sub> в виде сигнала  $\mathbf{w}_i$ . На основе полученной информации  $\mathbf{w} = \langle \mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_i, \dots, \mathbf{w}_N \rangle$  от всех КС <sub>$i$</sub>  ( $i = \overline{1, N}$ ) и выбранной стратегии координации:  $S_0: G \times \mathcal{W} \rightarrow G$  координатор КС<sub>0</sub> посылает координирующий сигнал  $\mathbf{g}^{(k+1)} = \langle \mathbf{g}_1^{(k+1)}, \mathbf{g}_2^{(k+1)}, \dots, \mathbf{g}_i^{(k+1)}, \dots, \mathbf{g}_N^{(k+1)} \rangle$  системам управления КС <sub>$i$</sub>  ( $i = \overline{1, N}$ ). Итерационный процесс  $\mathbf{g}^{(k+1)} = S_0(\mathbf{g}^{(k)}, \mathbf{w}(\mathbf{g}^{(k)}))$  продолжается до тех пор пока не будет достигнуто решение глобальной задачи  $\hat{D}$ .

Таким образом, решение глобальной задачи СХТС  $\hat{D}$  представляет собой итерационный процесс, в котором вычислительные операции распределяются между всеми системами управления КС<sub>0</sub>, КС<sub>1</sub>, ..., КС <sub>$i$</sub> , ..., КС <sub>$N$</sub> .

Для того, чтобы определить задачи  $D_0(\mathbf{w})$ ,  $\{D_1(\mathbf{g}_1, \mathbf{z}_1), \dots, D_i(\mathbf{g}_i, \mathbf{z}_i), \dots, D_N(\mathbf{g}_N, \mathbf{z}_N)\}$  проводятся следующие рассуждения. Будем считать, что  $[\mathbf{b}_i]^{(k)}$  есть формируемый КС<sub>0</sub> на  $k$ -ой итерации интервальный вектор связующих входов  $i$ -ой МХТС, т.е.

$$[\mathbf{b}_i]^{(k)} \equiv B_i^{(k)}. \quad (6)$$

Вектором неопределенных параметров  $i$ -го подпроцесса можно считать интервальный вектор  $[\mathbf{v}_i]$ , который определяется как декартово произведение:

$$[\mathbf{v}_i] \equiv B_i^{(k)} \times F$$

или

$$[\mathbf{v}_i] = [\mathbf{b}_i]^{(k)} \times [\mathbf{f}] \quad (7)$$

Вектор выходных параметров  $[\mathbf{y}_i]$  выражается посредством оператора математической модели подпроцесса  $P_i$ :

$$[\mathbf{y}_i] = M_i(\mathbf{u}_i, \mathbf{x}_i, [\mathbf{v}_i]), \quad (8)$$

Критерий оптимизации (5) можно представить в виде аддитивной функции:

$$J = \sum_{i=1}^N J_i. \quad (9)$$

Суть предлагаемого метода решения глобальной задачи оптимизации СХТС  $\hat{D}$  заключается в фиксации оценочной области  $B$ , в пределах которых может варьироваться вектор связующих входов  $\mathbf{b}$ . Оптимизация на каждой  $k$ -ой итерации (рис. 3) сводится к оптимизации отдельных МХТС:

$$\max_{\mathbf{u}^{(k)} \in U} J^{(k)} = \max_{\mathbf{u}_1^{(k)} \in U_1, y_1 \in [y_1]} J_1^{(k)} + \dots + \max_{\mathbf{u}_i^{(k)} \in U_i, y_i \in [y_i]} J_i^{(k)} + \dots + \max_{\mathbf{u}_N^{(k)} \in U_N, y_N \in [y_N]} J_N^{(k)}.$$

Оптимальное значение критерия  $J_i^*$  зависит согласно (6)-(8) от интервального вектора связующих входов  $[\mathbf{b}]$ :  $J_i^* = J_i^*([\mathbf{b}])$ , где  $[\mathbf{b}] = ([\mathbf{b}_1], [\mathbf{b}_2], \dots, [\mathbf{b}_i], \dots, [\mathbf{b}_N])$ .

В этом случае оптимальное значение критерия (9) находится в результате поиска в допустимой области  $B$  такого интервального вектора связующих входов  $[\mathbf{b}]^*$ , при котором:

$$J^*([\mathbf{b}]^*) = \max_{[\mathbf{b}] \in \mathcal{B}} \sum_{i=1}^N J_i^*([\mathbf{b}]).$$

С точки зрения иерархии рассматриваемого процесса управления (рис. 2) роль сигналов обратной связи  $\mathbf{w}_i$  играют величины  $J_i^*$ , роль сигналов  $\mathbf{g}_i$  выполняет интервальный вектор связующих входов  $[\mathbf{b}]$ . Таким образом, глобальная задача оптимизации СХТС  $\hat{D}$  разделяется на задачи  $D_0(\mathbf{W})$ ,  $\{D_1(\mathbf{g}_1, \mathbf{z}_1), \dots, D_i(\mathbf{g}_i, \mathbf{z}_i), \dots, D_N(\mathbf{g}_N, \mathbf{z}_N)\}$ .

Для формулирования задач оптимизации и "удовлетворения" вводятся следующие обозначения. Пусть  $l$ -ый компонент вектора входных переменных  $\mathbf{b}_i$  МХТС $_i$  обозначен как  $b_{li} (i = \overline{1, N}; l = \overline{1, L_i})$ , а  $r$ -ый компонент вектора выходных переменных  $\mathbf{y}_j$  МХТС $_j$  как  $y_{rj} (j = \overline{1, N}; r = \overline{1, R_j})$ , где  $L_i, R_j$  размерности вектора выходных переменных соответственно МХТС $_i$  и МХТС $_j$ . Тогда элемент матрицы связи технологических потоков СХТС записывается как  $z_{ij}^{lr}$ . Этот элемент принимает значения:  $z_{ij}^{lr} = 1$ , если  $r$ -ый компонент вектора  $\mathbf{y}_j$  МХТС $_j$  является  $l$ -ым компонентом вектора  $\mathbf{b}_i$  МХТС $_i$ , т.е. верно равенство  $b_{li} = y_{rj}$ . Элемент  $z_{ij}^{lr}$  имеет нулевое значение:  $z_{ij}^{lr} = 0$ , когда  $x_{li} \neq y_{rj}$ .

Для того, чтобы значения составляющих вектора выходных параметров попадали в оценочную область  $B^{(k)}$  должны выполняться условия:

$$\sum_{i=1}^N \left( \sum_{l=1}^{L_i} (z_{ij}^{lr} b_{li}) - y_{rj} \sum_{l=1}^{L_i} z_{ij}^{lr} \right) \geq 0, \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^N \left( y_{rj} \sum_{l=1}^{L_i} z_{ij}^{lr} - \sum_{l=1}^{L_i} (z_{ij}^{lr} b_{li}) \right) \geq 0, \quad (11)$$

$(r = \overline{1, R_j}, j = \overline{1, N}),$

где  $\bar{b}_{li}, \underline{b}_{li}$  – верхние и нижние границы интервального вектора  $[\mathbf{b}_i]$  связующих входов ( $[\mathbf{b}_i] \in B_i^{(k)}, i = \overline{1, N}$ ).

В этом случае неравенства (10), (11) включаются в ограничения для задачи  $D_j(\mathbf{g}_j, \mathbf{z}_j), (j = \overline{1, N})$  в виде:

$$\begin{aligned} \varphi_{q_j}(\mathbf{u}_j, \mathbf{x}_j, \mathbf{y}_j) &\geq a_{q_j}, \\ q_j &= \overline{1, 2R_j}. \end{aligned}$$

Здесь

$$\begin{aligned} \varphi_{q_j}(\mathbf{u}_j, \mathbf{x}_j, \mathbf{y}_j) &= -\sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^{L_i} y_{ij} \sum_{r=1}^{L_i} z_{ij}^{lr} a_{q_j} = -\sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^{L_i} (z_{ij}^{lr} \bar{b}_{li}), \\ \varphi_{(q_j+1)}(\mathbf{u}_j, \mathbf{x}_j, \mathbf{y}_j) &= \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^{L_i} y_{ij} \sum_{r=1}^{L_i} z_{ij}^{lr} a_{q_j+1} = \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^{L_i} (z_{ij}^{lr} \underline{b}_{li}), \\ &(r = \overline{1, R_j}), \end{aligned}$$

где  $\bar{b}_{li}, \underline{b}_{li} (l = \overline{1, L_i})$  – верхние и нижние границы интервального вектора  $[\mathbf{b}_i], i = \overline{1, N}$ .

Задача оптимизации  $D_i(\mathbf{g}_i, \mathbf{z}_i)$ , которая ставится перед системой управления  $КС_i$ , формулируется следующим образом. Необходимо для заданного  $\mathbf{x}_i \in X_i$ , вектора связующих входов  $[\mathbf{b}]$  найти управление  $\mathbf{u}_i^* \in U_i$ , при котором:

$$J_i^*(\mathbf{u}_i^*, \mathbf{x}_i) = \max_{\mathbf{u}_i \in U_i} \min_{\mathbf{y}_i \in [y_i]} J(\mathbf{u}_i, \mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i),$$

при выполнении условий:

$$\min_{\mathbf{y}_i \in [y_i]} \varphi_{q_i}(\mathbf{u}_i, \mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i) \geq a_{q_i}([\mathbf{b}]), \tag{12}$$

$$q_i = 1, 2, \dots, 2R_i,$$

$$\min_{\mathbf{y}_i \in [y_i]} \varphi_{q_i}(\mathbf{u}_i, \mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i) \geq a_{q_i}, \tag{13}$$

$$q_i = 2R_i + 1, \dots, Q_i,$$

$$[\mathbf{y}_i] = M_i(\mathbf{u}_i, \mathbf{x}_i, [\mathbf{v}_i]), \tag{14}$$

$$[\mathbf{v}_i] = [\mathbf{b}_i] \times [\mathbf{f}], \tag{15}$$

$$[\mathbf{b}] = ([\mathbf{b}_1], [\mathbf{b}_2], \dots, [\mathbf{b}_i], \dots, [\mathbf{b}_N]).$$

Задача  $D_0(\mathbf{w})$ , которая решается системой управления  $КС_0$ , формулируется в следующем виде. Необходимо найти такой вектор  $[\mathbf{b}]^*$  и соответственно такие значения  $J_1^*([\mathbf{b}]^*), J_2^*([\mathbf{b}]^*), \dots, J_i^*([\mathbf{b}]^*), \dots, J_N^*([\mathbf{b}]^*)$ , при которых достигается максимума критерий (9). Поиск оптимального интервального вектора  $[\mathbf{b}]^*$  сводится к определению его верхних и нижних границ, которые представляются в виде  $\bar{\mathbf{b}}^* = (\bar{\mathbf{b}}_1, \bar{\mathbf{b}}_2, \dots, \bar{\mathbf{b}}_i, \dots, \bar{\mathbf{b}}_N)$ ,  $\underline{\mathbf{b}}^* = (\underline{\mathbf{b}}_1, \underline{\mathbf{b}}_2, \dots, \underline{\mathbf{b}}_i, \dots, \underline{\mathbf{b}}_N)$ , т.е. задача оптимизации, решаемая  $КС_0$ , записывается в виде:

$$J^*(\bar{\mathbf{b}}^*, \underline{\mathbf{b}}^*) = \max_{[\mathbf{b}] \in \mathcal{B}} \sum_{i=1}^N J_i^*([\mathbf{b}]).$$

При решении глобальной задачи "удовлетворения"  $\hat{D}$  задача  $D_i(\mathbf{g}_i, \mathbf{z}_i)$  сводится к отысканию такого вектора  $\mathbf{u}_i$ , при котором для заданного  $\mathbf{x}_i$ , выполняются условия (12)–(15). Задача  $D_0(\mathbf{W})$ , в этом случае заключается в генерации вектора

связующих входов  $[\mathbf{b}]$ , (верхних и нижних границ:  $\bar{\mathbf{b}}, \underline{\mathbf{b}}$ ). В качестве сигналов обратной связи  $\mathbf{w}_i$  служит информация о нарушении ограничений (12),(13), сигналов обратной связи  $\mathbf{g}_i$  является вектор  $[\mathbf{b}]$ .

Предложенный метод решает проблему декомпозиции глобальной задачи СХТС  $\hat{\mathbf{D}}$ . Во-первых, выполняется принцип координации: принцип оценки взаимодействий (2). Во-вторых, задача  $D_0(\mathbf{w})$ , относящаяся к системе управления КС<sub>0</sub>, обеспечивает поиск координирующего сигнала – интервального вектора связующих входов  $[\mathbf{b}]$ . Например, при решении глобальной задачи оптимизации при поиске оптимального вектора связующих входов  $[\mathbf{b}]$  могут быть использованы известные методы нелинейного программирования [21], которые позволяют определить оптимальные верхние и нижние границы вектора  $[\mathbf{b}]$ .

Таким образом, предложенный метод позволяет решение глобальной задачи СХТС  $\hat{\mathbf{D}}$  свести к параллельно решаемым на станциях КС<sub>0</sub>, КС <sub>$i$</sub>  ( $i = \overline{1, N}$ ) задачам  $D_0(\mathbf{w}), \{D_1(\mathbf{g}_1, \mathbf{z}_1), \dots, D_i(\mathbf{g}_i, \mathbf{z}_i), \dots, D_N(\mathbf{g}_N, \mathbf{z}_N)\}$ .

Изложенный подход дает возможность на стадии разработки для каждой задачи  $D_i(\mathbf{g}_i, \mathbf{z}_i)$  ( $i = \overline{1, N}$ ) применить принцип модульности [22]. Этот принцип заключается в том, что при формализации, постановке и алгоритмизации каждой задачи  $D_i(\mathbf{g}_i, \mathbf{z}_i)$  может участвовать свой независимый разработчик, которому не обязательно знакомиться с содержанием других задач  $D_j(\mathbf{g}_j, \mathbf{z}_j)$  ( $j \neq i$ ). Принцип модульности позволяет изменять или модифицировать задачу  $D_i(\mathbf{g}_i, \mathbf{z}_i)$ , не вызывая каких-либо последствий в других задачах  $D_j(\mathbf{g}_j, \mathbf{z}_j)$  ( $j \neq i$ ).

**Заключение.** Сформулированные в работе принципы и постановки задач, предложенные методы и алгоритмы декомпозиции глобальной задачи управления для технологических процессов с интервальной неопределенностью являются теоретической основой для проектирования новых и модернизации существующих производств, характеризующихся множеством стадий, энерго- и материалоемкостью, наличием большого количества параметров и возмущений.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Островский Г.М., Зиятдинов Н.Н., Лаптева Т.В.* Оптимизация технических систем. – М.: КНОРУС, 2012. – 432 с.
2. *Фролов С.В.* Развитие отечественных систем промышленной автоматизации // Автоматизация и производство. – 2001. – № 2. – С. 22-25.
3. *Шильяк Д.* Децентрализованное управление сложными системами. – М.: Мир, 1994. – 576 с.
4. *Холоднов В.А., Лебедева М.Ю.* Приближенный метод оптимизации химико-технологических систем при интервальной параметрической неопределенности // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2016. – № 33 (59). – С. 97-100.
5. *Островский Г.М., Лаптева Т.В., Зиятдинов Н.Н.* Проектирование оптимальных химико-технологических систем в условиях неопределенности // Теоретические основы химической технологии. – 2014. – Т. 48, № 5. – С. 527-537.
6. *Пегат А.* Нечеткое моделирование и управление. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 798 с.

7. Фролова Т.А., Фролов С.В., Туляков Д.С. Решение интервальных математических моделей технологических процессов // Электронное научно-техническое издание «Наука и образование». – 2012. – № 09. – С. 343-360. – UPR: <http://technomag.bmstu.ru/doc/454499.html> (дата обращения: 17.02.2017).
8. Растрюгин Л.А. Современные принципы управления сложными объектами. – М.: Сов. радио, 1980. – 232 с.
9. Саймон Г. Науки об искусственном: пер с англ. – 2-е изд. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 144 с.
10. Кафаров В.В., Мешалкин В.П. Анализ и синтез химико-технологических систем. – М.: Химия, 1991. – 432 с.
11. Кафаров В.В., Дорохов И.Н. Системный анализ процессов химической технологии. Основы стратегии. – М.: Наука, 1976. – 499 с.
12. Харазов В.Г. Интегрированные системы управления технологическими процессами: учебное пособие для вузов. – СПб.: Профессия, 2013. – 655 с.
13. Харазов В.Г. Интеллектуальные приборы и системы управления // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2014. – № 26 (52). – С. 92-94.
14. Харазов В.Г. Проблемы и пути развития интегрированных АСУ ТП // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2013. – № 18 (44). – С. 089-092.
15. Шенброт И.М., Антропов М.В., Давиденко К.Я. Распределенные АСУ технологическими процессами. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 240 с.
16. Шенброт И.М. Распределенные АСУ ТП - АСУ нового класса // Приборы и системы управления. – 1983. – № 12. – С. 5-6.
17. Шенброт И.М., Алиев В.М. Проектирование вычислительных систем распределенных АСУ ТП. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 88 с.
18. Шишов О.В. Программируемые контроллеры в системах промышленной автоматизации: учебник. – М.: ИНФРА-М, 2017. – 365 с.
19. Месарович М., Мако Д., Такахара Я. Теория иерархических многоуровневых систем. – М.: Мир, 1973. – 344 с.
20. Месарович М., Такахара Я. Общая теория систем: математические основы. – М.: Мир, 1978. – 311 с.
21. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. – М.: Мир, 1975. – 534 с.
22. Йодан Э. Структурное проектирование и конструирование программ. – М.: Мир, 1979. – 415 с.

## REFERENCES

1. Ostrovskiy G.M., Ziyatdinov N.N., Lapteva T.V. Optimizatsiya tekhnicheskikh sistem [Optimization of technical systems]. Moscow: KNORUS, 2012, 432 p.
2. Frolov S.V. Razvitie otechestvennykh sistem promyshlennoy avtomatizatsii [The development of domestic industrial automation systems], *Avtomatizatsiya i proizvodstvo* [Automation and manufacturing], 2001, No. 2, pp. 22-25.
3. Shil'yak D. Detsentralizovannoe upravlenie slozhnymi sistemami [Decentralized control of complex systems]. Moscow: Mir, 1994, 576 p.
4. Kholodnov V.A., Lebedeva M.Yu. Priblizhennyi metod optimizatsii khimiko-tekhnologicheskikh sistem pri interval'noy parametricheskoy neopredelennosti [Approximate method for optimization of chemical-technological systems with interval parametric uncertainties], *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta)* [Proceedings of Saint-Petersburg state technological Institute (technical University)], 2016, No. 33 (59), pp. 97-100.
5. Ostrovskiy G.M., Lapteva T.V., Ziyatdinov N.N. Proektirovanie optimal'nykh khimiko-tekhnologicheskikh sistem v usloviyakh neopredelennosti [Design of optimal chemical-technological systems in conditions of uncertainty], *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical foundations of chemical engineering], 2014, Vol. 48, No. 5, pp. 527-537.
6. Pegat A. Nechetkoe modelirovanie i upravlenie [Fuzzy modeling and control]. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2013, 798 p.

7. Frolova T.A., Frolov S.V., Tulyakov D.S. Reshenie interval'nykh matematicheskikh modeley tekhnologicheskikh protsessov [The solution of interval mathematical models of technological processes], *Elektronnoe nauchno-tekhnicheskoe izdanie «Nauka i obrazovanie»* [Electronic scientific and technical periodical "Science and education"], 2012, No. 09, pp. 343-360. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/454499.html> (accessed 17 February 2017).
8. Rastrigin L.A. Sovremennye printsipy upravleniya slozhnymi ob"ektami [Modern principles of management of complex objects]. Moscow: Sov. radio, 1980, 232 p.
9. Saymon G. Nauki ob iskusstvennom [Science of artificial]: translation from English. 2 nd ed. Moscow: Editorial URSS, 2004, 144 p.
10. Kafarov V.V., Meshalkin V.P. Analiz i sintez khimiko-tekhnologicheskikh system [Analysis and synthesis of chemical-technological systems]. Moscow: Khimiya, 1991, 432 p.
11. Kafarov V.V., Dorokhov I.N. Sistemnyy analiz protsessov khimicheskoy tekhnologii. Osnovy strategii [System analysis of chemical engineering processes. The basics of the strategy]. Moscow: Nauka, 1976, 499 p.
12. Kharazov V.G. Integrirovannye sistemy upravleniya tekhnologicheskimi protsessami: uchebnoe posobie dlya vuzov [Integrated systems of control of technological processes: textbook for universities]. St. Petersburg: Professiya, 2013, 655 p.
13. Kharazov V.G. Intellektual'nye pribory i sistemy upravleniya [Intelligent devices and control systems], *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta)* [Bulletin of Saint-Petersburg state technological Institute (technical University)], 2014, No. 26 (52), pp. 92-94.
14. Kharazov V.G. Problemy i puti razvitiya integrirovannykh ASU TP [Problems and ways of development of an integrated process control system], *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta)* [Bulletin of Saint-Petersburg state technological Institute (technical University)], 2013, No. 18 (44), pp. 089-092.
15. Shenbrot I.M., Antropov M.V., Davidenko K.Ya. Raspredelemnnyye ASU tekhnologicheskimi protsessami [Distributed automatic control system of technological processes]. Moscow: Energoatomizdat, 1985, 240 p.
16. Shenbrot I.M. Raspredelemnnyye ASU TP - ASU novogo klassa [Distributed - ASU new class], *Pribory i sistemy upravleniya* [Devices and control systems], 1983, No. 12, pp. 5-6.
17. Shenbrot I.M., Aliev V.M. Proektirovanie vychislitel'nykh sistem raspredelemnnykh ASU TP [Design of computer systems distributed control system]. Moscow: Energoatomizdat, 1989, 88 p.
18. Shishov O.V. Programmiruemye kontrollery v sistemakh promyshlennoy avtomatizatsii: uchebnyy [Programmable controllers in industrial automation systems: tutorial]. Moscow: INFRA-M, 2017, 365 p.
19. Mesarovich M., Mako D., Takakhara Ya. Teoriya ierarkhicheskikh mnogourovnevnykh system [Theory of hierarchical multilevel systems]. Moscow: Mir, 1973, 344 p.
20. Mesarovich M., Takakhara Ya. Obshchaya teoriya sistem: matematicheskie osnovy [General systems theory: mathematical foundations]. Moscow: Mir, 1978, 311 p.
21. Khimmel'blau D. Prikladnoe nelineynoye programmirovaniye [Applied nonlinear programming]. Moscow: Mir, 1975, 534 p.
22. Yodan E. Strukturnoye proektirovanie i konstruirovaniye program [Structural design and construction programs]. Moscow: Mir, 1979, 415 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.П. Тарасов.

**Фролов Сергей Владимирович** – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет»; e-mail: [sergej.frolov@gmail.com](mailto:sergej.frolov@gmail.com); 392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106; тел.: +79204817586; кафедра биомедицинской техники; д.т.н.; профессор; зав. кафедрой.

**Фролова Татьяна Анатольевна** – e-mail: [frolova2000@gmail.com](mailto:frolova2000@gmail.com); тел.: +79202307269; кафедра компьютерно-интегрированных систем в машиностроении; к.т.н.; доцент.

**Frolov Sergey Vladimirovich** – Tambov State Technical University; e-mail: [sergej.frolov@gmail.com](mailto:sergej.frolov@gmail.com); 106, Sovetskaya street, Tambov, 392000, Russia; phone: +79204817586; the department of biomedical engineering; dr. of eng. sc.; professor; head of department.

**Frolova Tatyana Anatolievna** – e-mail: [frolova2000@gmail.com](mailto:frolova2000@gmail.com); phone: +79202307269; the department of computer-integrated systems in mechanical engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.