

УДК 681.51

## СОСТОЯНИЕ И ПУТИ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СО СТРУКТУРНЫМ РАЗНООБРАЗИЕМ\*

*Мышляев Л.П.<sup>1</sup>, д.т.н., профессор кафедры автоматизации  
и информационных систем (nicsu@ngs.ru)*

*Ивушкин А.А.<sup>2</sup>, д.т.н., генеральный директор*

*Ивушкин К.А.<sup>2</sup>, к.э.н., заместитель генерального директора*

*Грачев В.В.<sup>1</sup>, к.т.н., доцент кафедры автоматизации и информационных систем*

*Ляховец М.В.<sup>1</sup>, к.т.н., директор Института информационных технологий  
и автоматизированных систем*

<sup>1</sup> Сибирский государственный индустриальный университет  
(654007, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

<sup>2</sup> ООО «Объединенная компания «Сибшахтстрой»  
(654034, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, шоссе Кузнецкое, 9)

**Аннотация.** Статья посвящена анализу текущего состояния и перспективам развития систем управления со структурным разнообразием. Построение таких систем основано на совместном синтезе объекта управления и управляющей подсистемы. При этом объект управления представляет собой объект с целенаправленно изменяющейся структурой. Показана необходимость разработки новых подходов, методов и алгоритмов управления объектами со структурным разнообразием. Представлена обобщенная схема системы управления с целенаправленно изменяемой структурой и определены три типа реализации этой схемы. Сформулированы две задачи, возникающие при создании малоразмерных аналогов объектов управления, которые в дальнейшем могут быть использованы как физические модели в системах управления. Во-первых, обеспечение подобия системы управления физической моделью и натурной (промышленной) системы управления. Во-вторых, развитие структуры управления с физической моделью, предложенной академиком А.А. Красовским. Рассмотрена схема управления подобием систем управления и предложен вариант системы управления с физической моделью. Приведена общая структура идентификатора в виде замкнутой динамической системы.

**Ключевые слова:** система управления, структурное разнообразие, подобие, моделирование, натурно-математическое имитационное моделирование, модель объекта, алгоритм управления, физическая модель, целенаправленно изменяемая структура, идентификатор.

DOI: 10.15825/0368-0797-2015-5-376-380

Традиционные подходы и методы анализа и синтеза систем управления классической и современной теории управления базируются, как правило, на предпосылках об известных или уточняемых свойствах объекта управления, особенно об их структуре. При этом не предполагается каких-либо целенаправленных воздействий на структуру объекта в процессе управления и, тем более, не вовлекается в процесс синтеза механизм образования и изменения структуры объекта управления. Также не охватывают известные методы и многие структуры объектов управления, широко распространенных на практике, например, объекты, число управляющих воздействий которых больше числа выходных целевых переменных, объекты с рециклом, в которых из выходной переменной исключается величина рецикла. Такое положение дел вызывает необходимость разработки новых подходов, методов и алгоритмов управления объектами со структурным разнообразием.

Синтезу систем управления объектами сложной динамики в условиях неопределенности, в том числе с изменяющейся структурой, посвящено достаточно много исследований отечественных и зарубежных ученых [1 – 3]. Как правило, в этих работах рассматриваются определенные аспекты проблемы, например, в работах школы С.В. Емельянова – системы управления с переменной структурой, где последняя сосредоточена в управляющей части системы; системы с новыми типами обратной связи, позволяющей формировать различные структуры законов управления для достижения требуемой динамики систем управления в целом [1]. В работах Л. Льюнга [4] приводятся методы и алгоритмы идентификации очень узкого класса объектов достаточно простой структуры, причем объекты рассматриваются вне системы управления. В исследованиях по моделированию рассматривается подобие только преобразующих механизмов объектов управления [5] и даже не ставится задача подобия систем управления в целом. Также не ставится нигде задача динамическо-

\* Работа поддержана грантом РФФИ по проекту №15-07-02231.

го управления структурой самого объекта управления. Только в работах по материаловедению лишь упоминается об управлении структурообразованием [6].

Практика же создания систем автоматизации управления требует решения взаимосвязанного комплекса задач, к числу которых в первую очередь можно отнести:

- разработку методов синтеза и базовых алгоритмов управления объектами с переменной (изменяющейся) структурой в условиях неопределенности;
- разработку методов синтеза совместно объектов управления и управляющих подсистем;
- развитие теории и разработку базовых алгоритмов управления объектами с различными типами положительной обратной связи (с рециклом);
- создание научных основ теории подобия систем управления;
- развитие методов управления с прогнозирующей физической моделью;
- разработку методов синтеза алгоритмов идентификации для объектов со сложной структурой, функционирующих в системе управления;
- испытание разработанных решений на промышленных объектах, в материаловедении, в социальных системах.

Достижение желаемых динамических свойств системы только за счет управляющих подсистем зачастую невозможно. В этих случаях решение лежит на пути изменения динамических свойств самого объекта за счет оперативного изменения его структуры (в частном случае параметров) в процессе его функционирования, т.е. за счет целенаправленного управляемого воздействия на структуру объекта.

Обобщенная схема системы управления с целенаправленно изменяемой структурой имеет вид, представленный на рис. 1.

Можно выделить три типа реализации этой схемы:

- с введением дополнительных структур объекта для расширения области допустимых состояний и выбором последовательности структур для обеспечения заданных требований к эффективности управления;
- с текущим оцениванием и анализом показателей эффективности управления, выбором необходимой структуры объекта управления и обеспечением безударных режимов управления;
- с выделением типопредставительных ситуаций функционирования системы управления по каждой структуре системы, имитационным пересчетным моделированием, оцениванием показателей эффективности управления, выбором необходимой структуры объекта управления и обеспечением безударных режимов управления.

Для оперативного управления структурой объекта необходимо обеспечение такой возможности на стадии проектирования. Традиционно сначала создается объ-

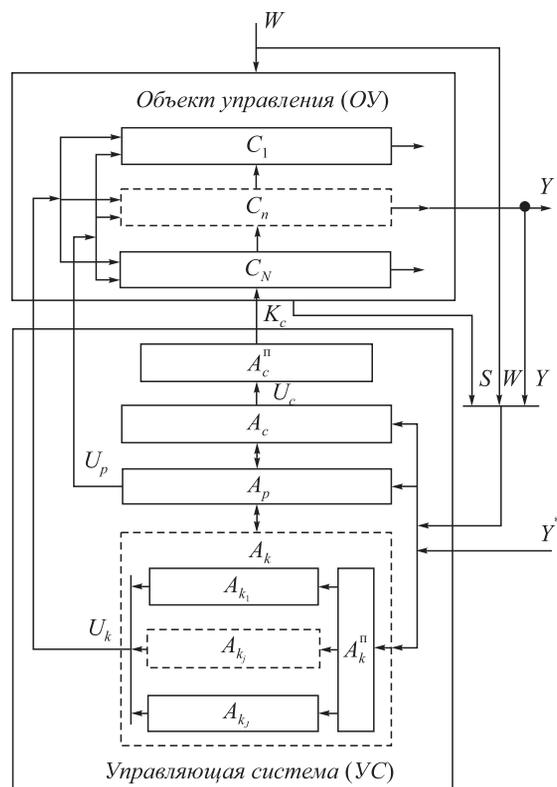


Рис. 1. Обобщенная схема системы управления объектом с целенаправленно изменяемой структурой:

$C_n$  –  $n$ -я структура ОУ,  $n = 1, \overline{N}$ ;  $A_c, A_p, A_k$  – алгоритмы структурного, параметрического и координатного управления;  $A_{k_j}$  –  $j$ -я структура алгоритма координатного управления  $A_k, j = 1, \overline{J}$ ;  $A_c^n$  и  $A_k^n$  – алгоритмы переключения структуры ОУ и алгоритма  $A_k$ ;  $K_c, K_k$  – управляющие команды на переключение структур;  $W$  и  $Y, S$  – векторы внешних и выходных воздействий, состояний объекта;  $Y^*$  – задание на  $Y$ , цели, ограничения;  $U_c, U_p$  и  $U_k$  – структурные, параметрические и координатные управляющие воздействия

Fig. 1. The generalized scheme of control system with purposefully variable structure:

$C_n$  –  $n$  structure of control object,  $n = 1, \overline{N}$ ;  $A_c, A_p, A_k$  – algorithms of structural, parametric and coordinate control;  $A_{k_j}$  –  $j$  structure of coordinate control algorithms  $A_k, j = 1, \overline{J}$ ;  $A_c^n$  and  $A_k^n$  – algorithms of switching of control object structure and algorithm  $A_k$ ;  $K_c, K_k$  – control commands on switching structures;  $W$  and  $Y, S$  – vectors of external and output actions, of object states;  $Y^*$  – task for  $Y$ , purposes, limitation;  $U_c, U_p, U_k$  – structural, parametric and coordinate control actions

ект управления (технология, агрегат и т.д.) и уже на основе модели этого объекта синтезируется управляющая подсистема. Необходим переход от этой традиционной системы к совместному созданию объекта и управляющей системы. Одним из вариантов такого создания может быть итерационная схема, включающая первоначальный синтез объекта управления, разработку управляющей системы, корректировку объекта управления, затем управляющей системы и т.д. Такая схема полезна также и для синтеза обычных систем управления в силу того, что включение объекта в систему управления ведет к изменению его свойств [7].

Этапом разработки новых объектов управления является создание их малоразмерных аналогов, которые в

дальнейшем могут быть использованы как физические модели в системах управления. И здесь возникают две задачи.

Первая – обеспечение подобия системы управления физической моделью и натурной (промышленной) системы управления. Существующая теория подобия ориентирована на подобие только объектов (геометрических параметров, физических свойств) и не затрагивает подобия внешних воздействий, показателей динамики объекта, необходимых для синтеза управляющей подсистемы, и, тем более, подобия в целом систем управления. В первую очередь здесь требуется определение понятий подобия систем управления, их отдельных элементов, формирование критериев и условий подобия. Например, системы управления можно считать подобными, если эффективность их функционирования одинакова с точностью до малой величины и соотношение показателей динамических свойств объектов и частотных свойств, характеризующих автокорреляционной функцией приведенных возмущений, также отличается не больше, чем на заданную величину.

Вторая задача – развитие структуры управления с физической моделью, предложенной академиком А.А. Красовским [8], в направлении согласования по физической сущности, времени и величине всех видов воздействия на натурную и модельную системы управления и, обязательно, управление подобием этих систем. Общая схема такой системы будет иметь

вид, представленный на рис. 2, где приняты следующие обозначения:  $U$ ,  $W$  и  $Y$  – векторы управляющих, внешних и выходных воздействий;  $Z = \{U; W_k; Y; Y^*\}$ ;  $U^P = \{U_w^{pO}; U_w^{p\Phi}; U_s^{pO}; U_s^{p\Phi}\}$ ;  $U^P$  – общий вектор управляющих воздействий подобием систем управления;  $U_s^{pO}$  и  $U_s^{p\Phi}$  – векторы управляющих воздействий, направленные на натурный объект управления, его координатную управляющую систему и на физическую модель и ее координатную управляющую систему;  $U_w^{pO}$  и  $U_w^{p\Phi}$  – векторы управляющих воздействий, направленные на целенаправленное изменение свойств внешних воздействий натурального объекта и его физической модели соответственно; надстрочные индексы «D», «O» и «Ф» означают принадлежность соответственно к действительным значениям воздействий, натурному объекту управления и его физической модели; подстрочные индексы «k», «w» и «s» означают принадлежность к контролируемым, внешним воздействиям и элементам системы управления.

Особо следует выделить структуру системы управления, когда подсистема управления с физической моделью является элементом натурной управляющей системы (рис. 3). Такая компоновка системы управления в целом выдвигает специфические требования динамического подобия системы управления физической моделью [9].

При решении большинства задач управления необходимо получать и постоянно уточнять модель объекта, т.е. проводить идентификацию объекта. До настоящего

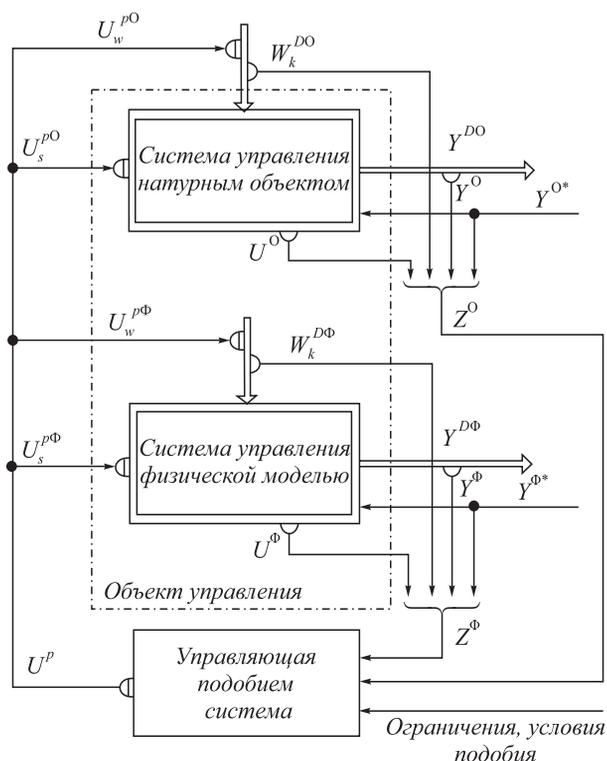


Рис. 2. Схема управления подобием систем управления

Fig. 2. The control circuit of control system similarity

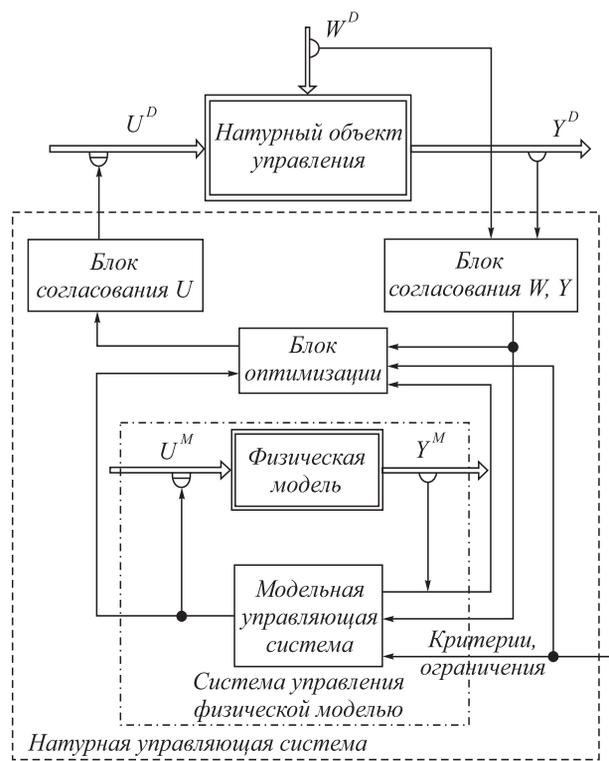


Рис. 3. Вариант системы управления с физической моделью

Fig. 3. The variant of control system with the physical model

времени нет универсальных методов синтеза алгоритмов идентификации для объектов сложной структуры, особенно функционирующих в системах управления. Перспективное направление создания таких методов состоит в представлении идентификатора в виде замкнутой динамической системы, где объектом управления является структура модели, а алгоритм управления синтезируется известными методами теории управления с использованием новых типов обратной связи. Схема такого идентификатора приведена на рис. 4 [10], на котором  $W$ ,  $U$  и  $Y$  – измеренные внешние, координатные управляющие и выходные воздействия;  $U_p$  – параметрическое управляющее воздействие на модель объекта; индексы «D» – действительные, «M» – модельные воздействия;  $\ominus$  – измерительный блок.

**Выводы.** Развитие методов синтеза и анализа систем управления со структурным разнообразием позволит создавать высокоэффективные системы управления сложными объектами разнообразной природы.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Емельянов С.В., Коровин С.К. Новые типы обратной связи: Управление при неопределенности. – М.: Наука. Физматлит, 1997. – 352 с.
2. Системы автоматизации на основе натурно-модельного подхода: Монография в 3-х томах. Том 2: Системы автоматизации производственного назначения / Л.П. Мышляев, А.А. Ивушкин, Г.П. Сазыкин и др.; Под ред. Л.П. Мышляева. – Новосибирск: Наука, 2006. – 483 с.
3. Рей У. Методы управления технологическими процессами. – М.: Мир, 1983. – 368 с.
4. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя / Пер. с англ.; Под ред. Я.З. Цыпкина. – М.: Наука, 1991. – 432 с.

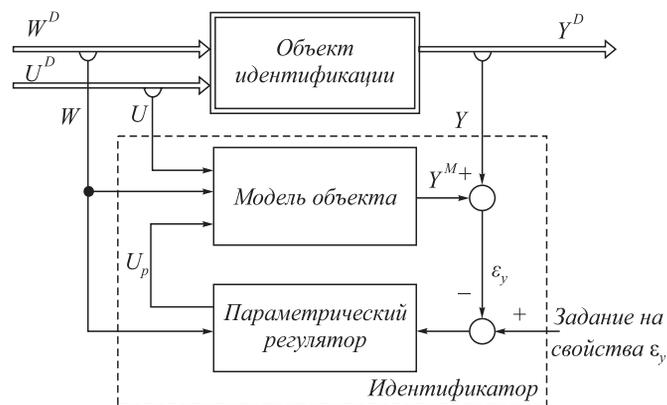


Рис. 4. Общая структура идентификатора

Fig. 4. The general structure of identifier

5. Веников В.А. Теория подобия и моделирования. – М.: Высшая школа, 1976. – 479 с.
6. Синергетика и фракталы в материаловедении / В.С. Иванова, А.С. Баланкин, И.Ж. Бунин и др. – М.: Наука, 1994. – 383 с.
7. Ляховец М.В., Мышляев Л.П., Львова Е.И. и др. Совместный синтез объекта управления и управляющей подсистемы // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. № 12. С. 33 – 36.
8. Красовский А.А. Оптимальное управление посредством физической прогнозирующей модели // Автоматика и телемеханика. 1979. № 2. С. 156 – 162.
9. Мышляев Л.П., Евтушенко В.Ф., Березин Д.Г. и др. Понятия и условия подобия систем управления // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 12. С. 56 – 58.
10. Методы идентификации промышленных объектов в системах управления / С.В. Емельянов, С.К. Коровин, Л.П. Мышляев и др. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2007. – 307 с.

Поступила 6 февраля 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 5, pp. 376–380.

## SITUATION AND DEVELOPMENT TRENDS OF CONTROL SYSTEMS WITH STRUCTURAL DIVERSITY

*Myshlyaev L.P.<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Automation and Information Systems" (nicsu@ngs.ru)*

*Ivushkin A.A.<sup>2</sup>, Dr. Sci. (Eng.), General Director*

*Ivushkin K.A.<sup>2</sup>, Cand. Sci. (Economics), Deputy General Director*

*Grachev V.V.<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Automation and Information Systems"*

*Lyakhovets M.V.<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Director of the Institute of Automation and Information Systems*

<sup>1</sup> Siberian State Industrial University (42, Kirova str., Novokuznetsk, Kemerovo Region, 654007, Russia)

<sup>2</sup> LLC United Company "Sibshahtostroi" (9, Kuznetskoe route, Novokuznetsk, Kemerovo Region, 654034, Russia)

**Abstract.** This article analyzes the current state and prospects of development of control systems with structural diversity. The construction of such systems is based on the synthesis of the joint control object and control subsystem. In this case, the control object is an object with a purposefully changing structure. The need to develop new approaches, methods and algorithms for control objects with structural diversity

has been showed. The generalized scheme of control system with purposefully variable structure was presented and three types of implementation of the scheme have been identified. Two problems that arise in the development of small analog control objects, which can then be used as physical models of control systems, have been formulated. They are, firstly, ensuring similarity of control system of physical model and full-scale (industrial) control system, and, secondly, the development of the governance structure of the physical model proposed by the academician Krasovskii A.A. The control circuit of control systems similarity has been considered and a variant of control system with the physical model has been offered. The general structure of an identifier in the form of a closed dynamical system has been given.

**Keywords:** control system, structural diversity, similarity, modeling, natural-mathematical simulation, object model, control algorithm, physical model, specifically changes structure, identifier.

DOI: 10.15825/0368-0797-2015-5-376-380

#### REFERENCES

1. Emel'yanov S.V., Korovin S.K. *Novye tipy obratnoi svyazi: Upravlenie pri neopredelennosti* [New types of feedbacks: Control at indeterminacy]. Moscow: Nauka. Fizmatlit, 1997. 352 p. (In Russ.).

2. Myshlyayev L.P., Ivushkin A.A., Sazykin G.P. etc. *Sistemy avtomatizatsii na osnove naturno-model'nogo podkhoda: Monografiya v 3-kh tomakh. Tom 2: Sistemy avtomatizatsii proizvodstvennogo naznacheniya* [Automation systems on the basis of a full-scale model approach: Monograph in 3 volumes. Vol. 2: Commercial automation system]. Myshlyayev L.P. ed. Novosibirsk: Nauka, 2006. 483 p. (In Russ.).
3. Ray W. Harmon. Advanced process control. McGraw-Hill, New York etc. 1981, 326 p. (Russ.ed.: Ray W. *Metody upravleniya tekhnologicheskimi protsessami*. Moscow: Mir, 1983. 368 p.)
4. Ljung Lennart. System identification: Theory for the user. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1987. (Russ.ed.: Ljung L. *Identifikatsiya sistem. Teoriya dlya pol'zovatelya*. Tsypkin Ya.Z. ed. Moscow: Nauka, 1991. 432 p.)
5. Venikov V.A. *Teoriya podobiya i modelirovaniya* [Similarity theory and modeling]. Moscow: Vysshaya shkola, 1976. 479 p. (In Russ.).
6. Ivanova V.S., Balankin A.S., Bunin I.Zh. etc. *Sinergetika i fraktaly v materialovedenii* [Synergetics and fractals in material science]. Moscow: Nauka, 1994. 383 p. (In Russ.).
7. Lyakhovets M.V., Myshlyayev L.P., L'vova E.I., Ivushkin K.A., Chernyavskii S.V. Joint synthesis of the control object and the controlling subsystem. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, no. 12, pp. 33–36. (In Russ.).
8. Krasovskii A.A. Optimum control by means of a physical predictive model. *Avtomatika i telemekhanika*. 1979, no. 2, pp. 156–162. (In Russ.).
9. Myshlyayev L.P., Evtushenko V.F., Berezin D.G., Makarov G.V., Ivushkin K.A. Concepts and conditions for control system similarity. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2012, no. 12, pp. 56–58. (In Russ.).
10. Emel'yanov S.V., Korovin S.K., Myshlyayev L.P. etc. *Metody identifikatsii promyshlennykh ob"ektov v sistemakh upravleniya* [Identification methods of industrial objects in the control systems]. Kemerovo: Kuzbassvuzizdat, 2007. 307 p. (In Russ.).

**Acknowledgements.** The work was supported by the grant of RFBR according to the project no. 15-07-02231.

Received February 6, 2015