

УДК 62-503.5, 004.94
DOI: 10.15827/0236-235X.031.4.791-797

Дата подачи статьи: 26.06.18
2018. Т. 31. № 4. С. 791–797

Информационная система выбора каналов управления технологическим объектом с целью синтеза энергосберегающей системы регулирования

*А.В. Соболев*¹, к.т.н., доцент, alexsobolev2016@mail.ru

*А.И. Ляшенко*¹, к.т.н., ведущий программист, alexlyashenko@live.ru

*Д.П. Вент*¹, д.т.н., профессор, dvent@list.ru

¹ *Новомосковский институт РХТУ им. Д.И. Менделеева, г. Новомосковск, 301665, Россия*

Современные системы автоматического управления способны решать разнообразные задачи в различных отраслях промышленности. При этом успех реализации системы зависит от цели ее построения, формируемой в виде некоторого критерия оптимальности. В работе дан анализ современного состояния вопросов энергосберегающего управления химико-технологическими системами. Отмечается сложность повышения энергетической эффективности при одновременном обеспечении оперативного по быстродействию управления химико-технологическими процессами. Предложен способ решения данной задачи путем создания энергосберегающих систем автоматического регулирования с избыточным числом управляющих воздействий, отличающихся по частотным и энергетическим характеристикам.

В статье предлагается структура информационной системы, которая может быть использована для анализа многомерного объекта управления с целью выделения динамически и энергоэффективных каналов управления и последующего синтеза энергосберегающей системы автоматического регулирования. Описаны основные модули информационной системы, решаемые в них задачи синтеза и анализа, структура взаимодействия составляющих подсистем.

Представлен алгоритм выбора энергосберегающего канала управления, в основе которого лежит определение эксергетической чувствительности. Эксергетические характеристики технологических процессов позволяют получить объективную оценку использования разнородных энергетических ресурсов и выявить резервы для энергосбережения. Приведена логическая структура подсистемы эксергетического анализа химико-технологических систем, описаны диаграмма классов, их основные функции и методы. Даны рекомендации по использованию автоматизированной системы эксергетического анализа химико-технологической системы.

Предложен алгоритм выбора динамически эффективного канала управления, в основе которого лежит итерационная процедура расчета квадратичного интегрального критерия для заданного частотного диапазона работы.

Ключевые слова: информационная система, энергосберегающие системы регулирования, динамически эффективный канал управления, энергосберегающий канал управления, фильтры, эксергетическая чувствительность, квадратичный интегральный критерий.

В настоящее время наиболее важным направлением является управление сложными химико-технологическими системами (ХТС) по критерию энергетической эффективности. Несмотря на появление новых направлений теории автоматического управления и выросшего уровня вычислительной техники, существенного прорыва в проектировании энергосберегающих регуляторов не наблюдается. Как правило, продолжают использоваться готовые технические решения, предоставляемые производителями промышленных контроллеров и SCADA-систем, с устаревшими алгоритмами управления [1]. При этом вопросы максимально эффективного использования энергоресурсов зачастую даже не поднимаются.

Анализ научных публикаций по данной тематике показывает, что переход к энергосберегающему управлению технологическими процессами напрямую связан с совершенствованием алгоритмов управления. В частности, благодаря оптимальному ведению динамических режимов производственных установок при всех состояниях функционирования можно достичь уменьшения затрат энергии и топлива [2].

В ряде работ показана результативность метода упреждающего управления сложными технологическими комплексами по критериям энергетической эффективности на основе обратных моделей динамики объектов управления [3].

Для решения задачи синтеза энергосберегающих регуляторов эффективное применение получили принципы и методы синергетической теории системного синтеза [4, 5], к характерным особенностям которых следует отнести использование нелинейных математических моделей, возможность аналитического синтеза алгоритмов замкнутого управления для объектов с несколькими каналами управления, возможность получения алгоритмов адаптивного управления, обеспечивающих компенсацию внешних и параметрических возмущений.

Известен и другой подход к энергосберегающему управлению [6, 7]. Он сводится к тому, чтобы сама топология систем регулирования и управления (вид управляющих воздействий, их число и место приложения, взаимосвязь между системами автоматического регулирования (САР) нижнего уровня АСУ ТП) априори была ориентирована на

снижение энергозатрат, то есть ХТС необходимо рассматривать в комплексе с соответствующей *системой автоматического управления* (САУ).

Особенностью большинства технологических процессов является наличие нескольких конкурирующих критериев, в результате чего не удается в полной мере решить поставленную задачу. Так, помимо энергоэффективности, любая система регулирования должна обеспечивать устойчивость и поддержание на некотором уровне заданных показателей качества, характеризующих динамические свойства системы, в условиях действия на объект внешних неконтролируемых возмущений [8, 9].

Решить обе задачи возможно за счет использования энергосберегающих систем управления (регулирования). В данной статье рассматривается структура информационной системы, обеспечивающей автоматический анализ и выбор каналов управления с наилучшими энергетической и динамической составляющими для последующего синтеза *энергосберегающей САУ* (ЭСАР).

Описание структуры информационной системы

Общая структура ЭСАР и алгоритм ее работы подробно рассматриваются в ряде работ [10, 11]. Особенностью построения такой системы является использование нескольких каналов управления с различными энергетическими характеристиками и динамическими свойствами. В общем случае каналов управления может быть n , каждый из них вносит свой вклад в величину потерь эксергии и наиболее эффективен в определенном диапазоне частот. Последнее может быть использовано для повышения эффективности работы системы в динамических режимах за счет правильной настройки полосовых фильтров. Ввиду сложности структурной организации решение задач анализа и синтеза таких систем целесообразно выполнять с помощью специального программно-аппаратного комплекса, представляющего собой своеобразную информационную систему. Структура информационной системы приведена на рисунке 1.

Из рисунка видно, что информационная система состоит из двух основных модулей: модуля анализа технологического объекта управления и модуля синтеза ЭСАР. Задача анализа связана с определением энергетических и динамических характеристик различных каналов управления с целью последующего ранжирования по показателям энергетической эффективности и выделения диапазонов частот, где соответствующие каналы лучше всего подав-

ляют действующее возмущение. В основе такого анализа лежит подробная математическая модель технологического объекта, включающая в себя уравнения статики, динамики и кинетики химико-технологических процессов. Соответствующие уравнения сформированы в виде своеобразного хранилища (банка) и могут пополняться либо уточняться в процессе работы системы. Используя такой банк, прежде всего составляется эксергетический баланс и определяются потери эксергии и эксергетическая чувствительность каналов управления. Результатами такого анализа являются выделение энергоэффективных каналов управления и упорядочение их по степени энергоэффективности. Далее анализируются динамические свойства каналов управления с целью построения динамически эффективных систем регулирования. Динамические свойства связаны с расчетом некоторого критерия оптимальности, например, интеграла от квадрата ошибки регулирования, после чего снова производится ранжирование каналов управления, но теперь по степени динамической эффективности. Соответствующий анализ каналов управления производится для некоторого заданного режима работы объекта, формируемого путем задания режимных параметров и уставок. По результатам анализа пользователю предоставляется полная картина энергоэффективности и динамической эффективности каналов управления. Далее он либо самостоятельно выбирает каналы управления, которые будут задействованы при синтезе ЭСАР, либо предоставляет возможность выполнить это самой информационной системе в автоматическом режиме.

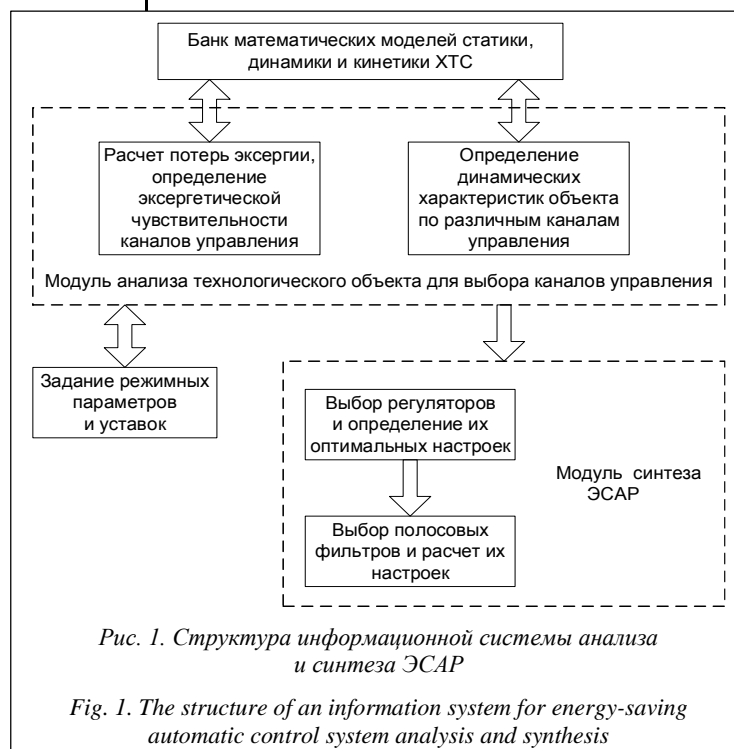


Рис. 1. Структура информационной системы анализа и синтеза ЭСАР

Fig. 1. The structure of an information system for energy-saving automatic control system analysis and synthesis

Алгоритмы выбора энергосберегающего канала управления

Для оценки энергетических свойств управляющих воздействий в структуре ХТС удобно использовать понятие приведенной эксергетической чувствительности, которая рассчитывается по формуле

$$\alpha_i = \frac{1}{k_i} \frac{\partial D(u_i, y, \bar{\omega})}{\partial u_i}, \quad (1)$$

где α_i – приведенная эксергетическая чувствительность (реакция) режима работы ХТС к изменению регулирующего воздействия u_i по i -му каналу управления; $D(u_i, y, \bar{\omega})$ – эксергетические потери в ХТС, возникающие при управлении i -м каналом; y – значение регулируемой переменной; $\bar{\omega}$ – фиксированный вектор возмущений; k_i – коэффициент передачи объекта по i -му каналу управления.

Канал с наименьшей приведенной эксергетической чувствительностью является более выгодным с позиции энергосберегающего управления ХТС в статических режимах. Выбор энергоэффективного канала управления в статике определяется путем решения оптимизационной задачи: $\alpha_i \rightarrow \min_i$,

где i – номер канала управления.

Алгоритм определения приведенной эксергетической чувствительности ХТС к возможным управляющим воздействиям можно представить в виде блок-схемы (рис. 2). Основная идея заключается в последовательном определении реакции регулируемой переменной и величины потерь эксергии, затрачиваемых для поддержания режима работы ХТС, на приращение регулирующего воздействия

по тому каналу управления, влияние которого исследуется (при постоянстве остальных компонент вектора управлений).

Для программной реализации такого алгоритма целесообразно использование принципов объектно-ориентированного программирования. Логическая структура программы в общем случае будет иметь вид, изображенный на рисунке 3.

Для определения основных физико-химических свойств и характеристик ХТС необходим базовый класс UnitCTS (Химико-технологический узел). На его основании благодаря механизму наследования можно перейти к производным классам, которые будут составлять библиотеку элементарных технологических операторов, например, TechStream (Технологический поток), Mixer (Смеситель), HeatExchanger (Теплообменник), Catalyst (Катализатор), ChemReaction (Химическое превращение). Они наследуют общее описание ХТС и в то же время обладают своими уникальными свойствами и математическими моделями, определяющими связь между параметрами входных и выходных потоков. Библиотека технологических операторов базового класса UnitCTS может расширяться, а соответствующие математические модели уточняться и дополняться.

Объекты класса UnitCTS используются классом ExergyAnalysisCTS (Эксергетический анализ ХТС) (см. <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2018-4/2018-4-dop/14.jpg>) с реализованной методикой расчета эксергии, согласно которой содержимое ХТС рассматривается как черный ящик, то есть значение имеют лишь вектор входных и выходных технологических потоков и связывающий их математический оператор.

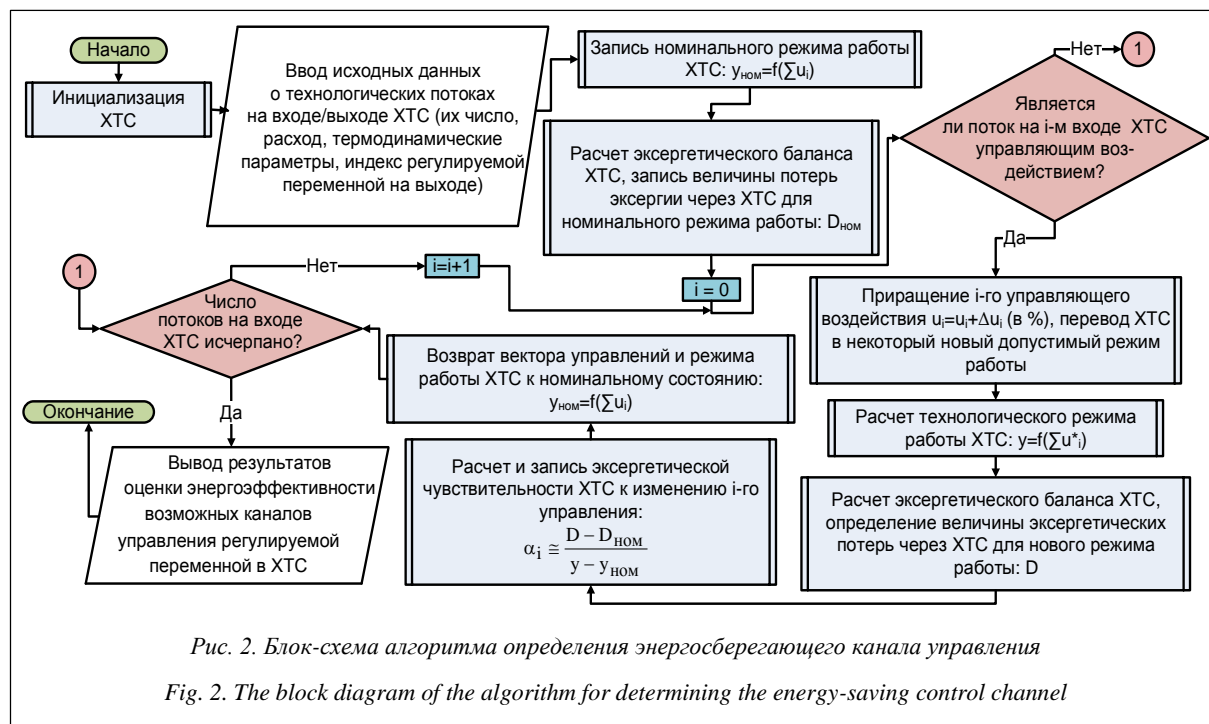


Рис. 2. Блок-схема алгоритма определения энергосберегающего канала управления

Fig. 2. The block diagram of the algorithm for determining the energy-saving control channel

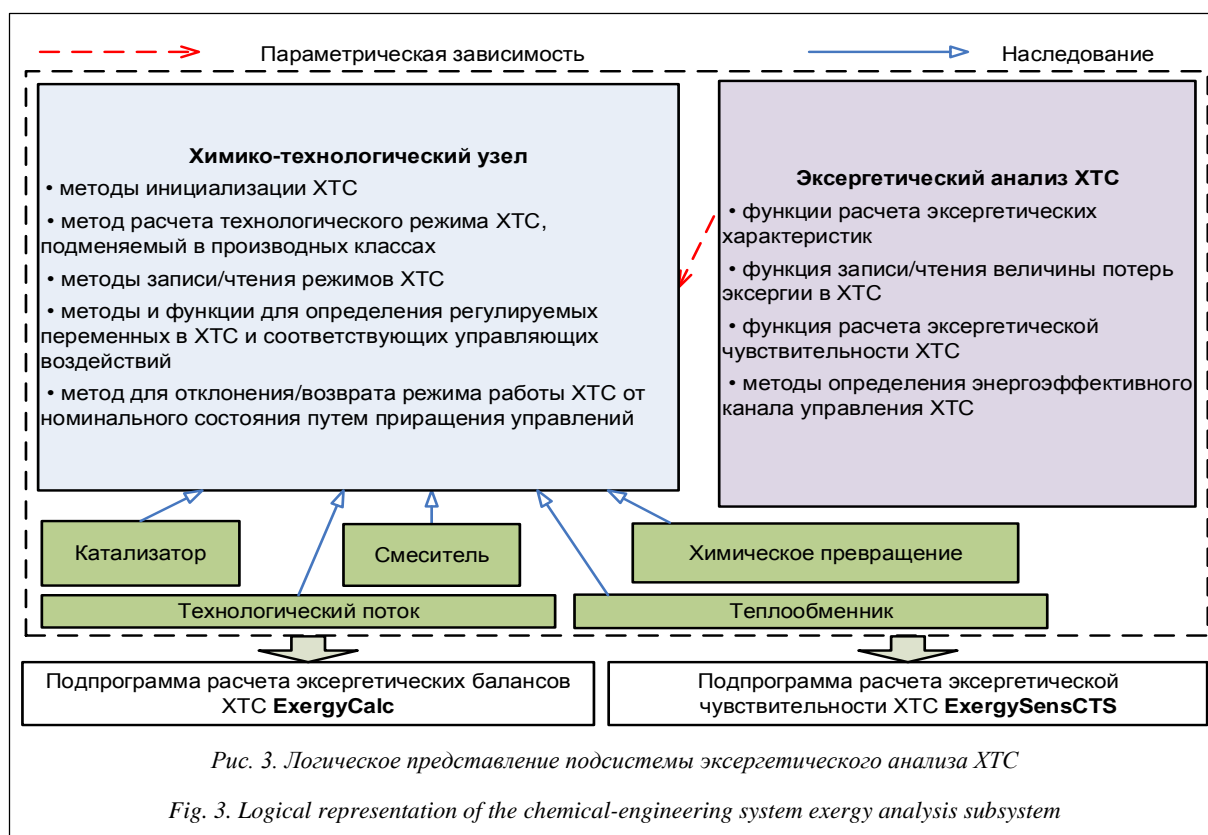


Рис. 3. Логическое представление подсистемы эксергетического анализа ХТС

Fig. 3. Logical representation of the chemical-engineering system exergy analysis subsystem

Основной функцией класса ExergyAnalysisCTS является функция расчета эксергии, блок-схема которой представлена на рисунке 4.

Функция ExergyStream(int, float*, float*, float*, float*, float*, int, float*, float*, float, float) возвращает значение суммарной эксергии потока вещества или энергии. В качестве аргументов в функцию передаются соответственно число рассматриваемых технологических потоков на входе или выходе контрольной поверхности; адреса массивов (указатели на их начало), в которых хранятся значения таких параметров, как расход, температура, теплоемкость, давление, значения газовых постоянных; число протекающих химических реакций; адреса массивов с энтальпиями реакций с соответствующими значениями свободной энергии Гиббса, с температурами начала химических реакций (если они имеют место); значения температуры и давления окружающей среды.

Таким образом, использование автоматизированной системы эксергетического анализа ХТС включает следующие основные этапы:

1) первоначально с помощью подпрограммы ExergyCalc рассчитывается эксергетический баланс исследуемой ХТС, выявляются места, где преобладают необратимые (качественные) потери энергии и, соответственно, кроется потенциал энергосбережения;

2) в ХТС выделяются технологические узлы, в которых потери эксергии возникают вследствие необходимости подводить к ХТС управляющие воздействия для стабилизации регулируемых пере-

менных, которые характеризуют работу этих узлов;

3) выделяются все допустимые управляющие воздействия, оказывающие влияние на выявленные в п. 2 регулируемые переменные; при этом в расчет могут приниматься и потенциально возможные управляющие воздействия, не предусмотренные топологией исследуемой ХТС, но которые можно дополнительно задействовать за счет усовершенствования изначальной технологической схемы;

4) с помощью подпрограммы ExergySensCTS, реализующей алгоритм на рисунке 2, рассчитывается эксергетическая чувствительность (1) наиболее типичных режимов функционирования ХТС к выявленным в п. 3 возможным управляющим воздействиям ХТС.

Алгоритм выбора динамически эффективного канала управления

Динамически эффективный канал управления должен обеспечить построение динамически эффективной САР, настроенной на достижение наилучшего, в некотором смысле, показателя качества (критерия оптимальности). Для оценки качества можно использовать ряд различных прямых и косвенных методов, которые определяют точность поддержания регулируемой переменной в переходных процессах. Большинство из этих показателей качества характеризуют лишь определенное свойство динамической САР, соответствующее переходной или частотной характеристике, и не имеют

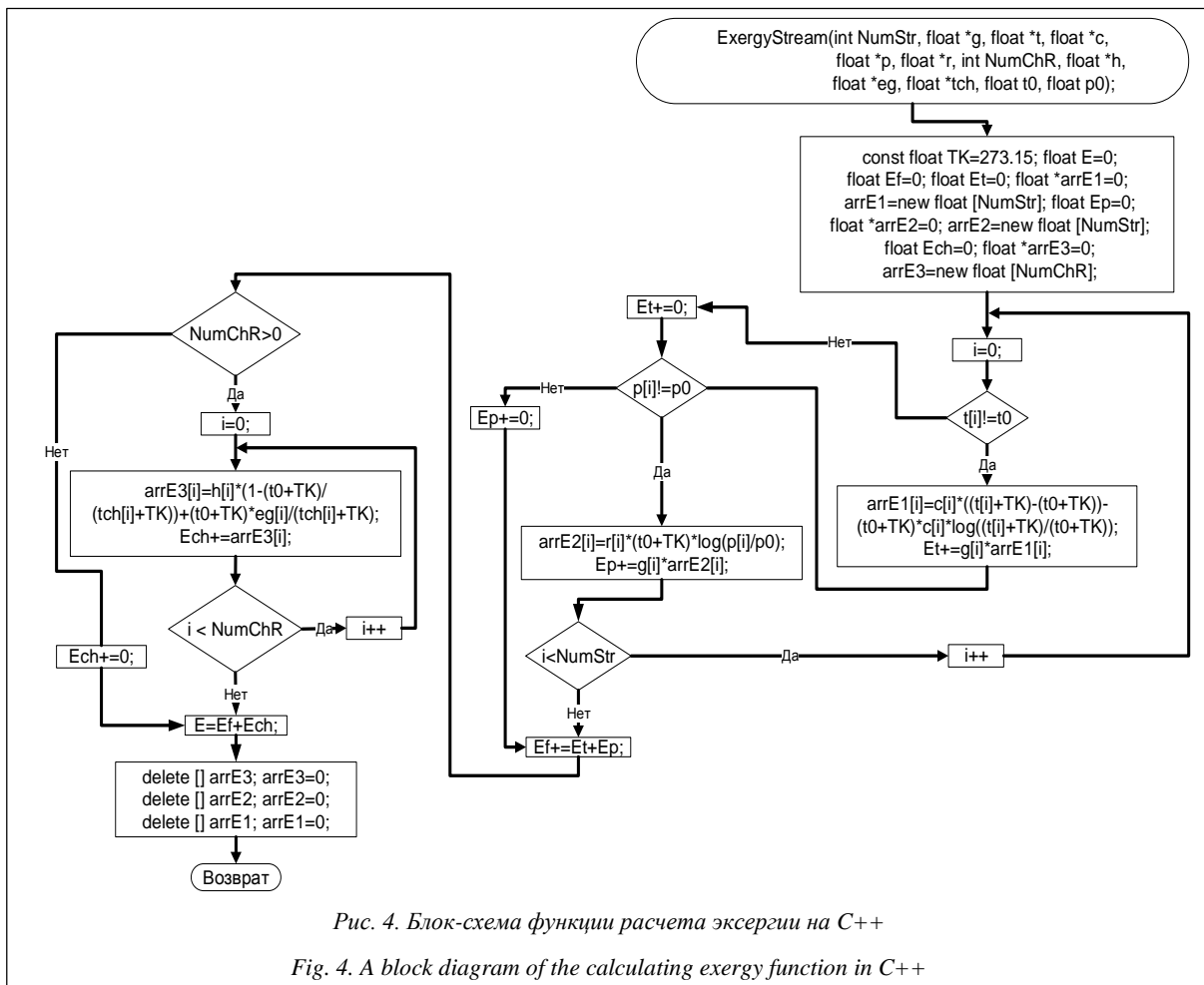


Рис. 4. Блок-схема функции расчета эксергии на C++

Fig. 4. A block diagram of the calculating exergy function in C++

выраженной аналитической связи с настроечными параметрами регулятора. Удобным способом оценки качества регулирования является использование интегральных критериев. Чем меньше площадь под кривой переходного процесса, тем выше можно считать качественные показатели САР. При этом оптимизация интегральных критериев по параметрам настройки регулятора может быть выполнена не только численно или с помощью моделирования на компьютере, но и аналитически.

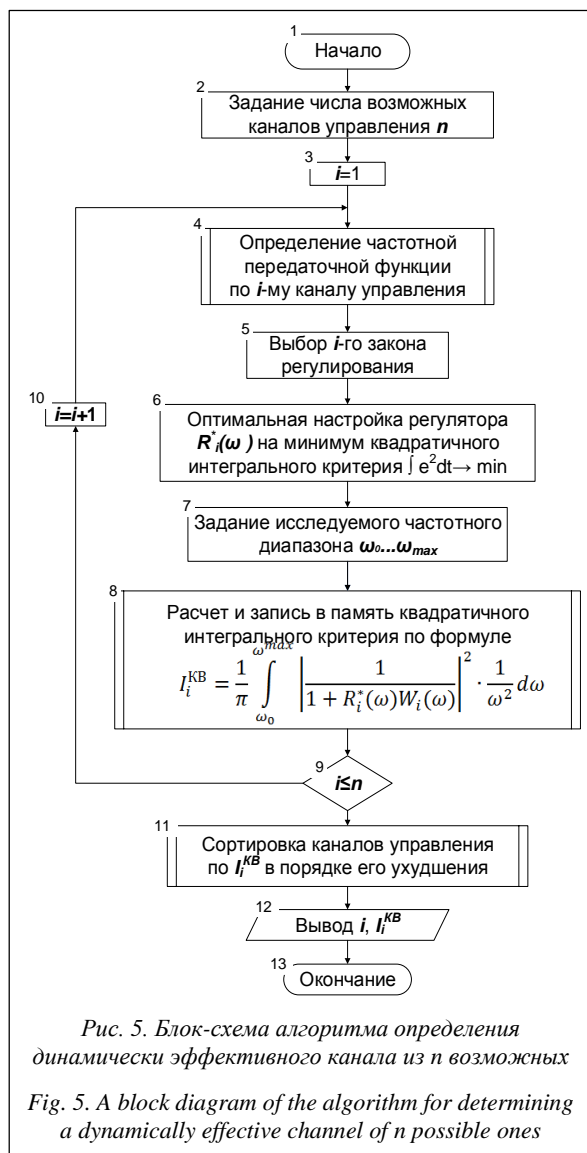
Интегральные методы оценки качества можно применить и при выборе динамически эффективного канала управления в ЭСАР с несколькими управляющими воздействиями. Динамически эффективным каналом будет тот, который позволит построить более качественную, в соответствии с выбранным критерием, одноконтурную САР из возможных.

В частности, для определения динамически эффективного канала управления в объекте с n каналами можно использовать алгоритм, блок-схема которого представлена на рисунке 5.

Вначале выделяется число возможных каналов управления n одной регулируемой переменной (блоки 1, 2). Далее в итерационном режиме происходит анализ каждого из них. Для этого нужно рас-

считать по аналитическим либо эмпирическим зависимостям частотную передаточную функцию объекта $W_i(\omega)$ по i -му каналу управления (блок 4), после чего задаться типовым регулятором (блок 5). Предпочтительно для каждого из исследуемых каналов (на каждой итерации) выбирать один и тот же закон регулирования. Далее известными методами рассчитывается одноконтурная САР (блок 6). Под оптимальными настройками регулятора $R^*_i(\omega)$ следует понимать те, которые минимизируют интегральную квадратичную оценку. Далее выбирается частотный диапазон $\omega_0 \dots \omega_{max}$, в котором исследуются динамические свойства i -го канала управления (блок 7). В простейшем случае $\omega_0 = 0, \omega_{max} = \infty$. После в блоке 8 по формуле рассчитывается значение квадратичного интегрального критерия I^{KB}_i , по которому оцениваются динамические свойства i -го канала. Далее, если число возможных каналов управления не исчерпано, осуществляется переход к анализу следующего (блок 10). После рассмотрения свойств всех каналов происходит сортировка этих свойств в порядке ухудшения с вводом информации о номере канала и соответствующего значения критерия оценки (блоки 11–13).

После проведенного эксергетического и частотного анализа производится ранжирование каналов



управления объектом по энергетическим и динамическим свойствам с целью дальнейшего выбора структуры ЭСАР и ее синтеза.

Так, если один и тот же канал управления оказался динамически и энергоэффективным на всем диапазоне частот, структура ЭСАР сводится к обычной одноконтурной, задействование нескольких каналов не нужно. Если же после анализа выяснилось, что наиболее энергоэффективный канал управления эффективно подавляет возмущения

только в области низких частот, а на высоких частотах уступает другим потенциальным управляющим воздействиям, которые не так выгодны в плане энергосберегающих свойств, то необходимо синтезировать многоконтурную ЭСАР с числом каналов, превышающим число управляемых переменных. Эти каналы будут работать каждый в своем диапазоне частот, что позволит одновременно добиться энергоэффективности и высокой динамической результативности.

Литература

1. Елизаров И.А., Третьяков А.А., Пчелинцев А.Н. и др. Интегрированные системы проектирования и управления: SCADA-системы. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2015. 160 с.
2. Матвейкин В.Г., Муромцев Д.Ю. Теоретические основы энергосберегающего управления динамическими режимами установок производственно-технического назначения: монография. М.: Машиностроение-1, 2007. 128 с.
3. Шнайдер Д.А., Казаринов Л.С. Метод упреждающего управления сложными технологическими комплексами по критериям энергетической эффективности // УБС, 2011. Вып. 32. С. 221–240.
4. Колесников А.А., Веселов Г.Е., Попов А.Н., Колесников А.А., Топчиев Б.В., Мушенко А.С., Кобзев В.А. Синергетические методы управления сложными системами: механические и электромеханические системы. М.: Либроком, 2013. 304 с.
5. Попов А.Н. Синергетический синтез систем энергосберегающего управления электромеханическими процессами // Изв. ЮФУ. Технические науки. Тематич. вып.: Системный синтез и прикладная синергетика. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. № 6. С. 74–83.
6. Дворецкий Д.С., Дворецкий С.И., Островский Г.М. Интегрированное проектирование энерго- и ресурсосберегающих химико-технологических процессов и систем управления: стратегия, методы и применение // Теорет. основы хим. технологии. 2008. Т. 42. № 1. С. 29–39.
7. Дворецкий Д.С., Дворецкий С.И., Мищенко С.В., Островский Г.М. Новые подходы к интегрированному синтезу гибких автоматизированных химико-технологических систем // Теорет. основы хим. технологии. 2010. Т. 44. № 1. С. 69–77.
8. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 1: Математические модели, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления; [под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егулова]. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 656 с.
9. Артемова С.В., Муромцев Д.Ю., Грибков А.Н. Прогнозирование и компенсация возмущения в системах оптимального управления // Вестн. Тамбов. гос. технич. ун-та. 2003. Т. 9. № 4. С. 632–637.
10. Соболев А.В., Ляшенко А.И., Вент Д.П., Соболева Ю.В. Энергосберегающая система автоматического регулирования. Патент РФ 2494433 на изобретение. МПК⁸ G05 В 13/00. Оpubл. 27.09.2013. Бюл. № 27.
11. Соболев А.В., Вент Д.П. Энергосберегающие регуляторы: задачи и структура // Датчики и системы. 2009. № 10. С. 23–28.

Information system for selecting control channels for a process facility to synthesize an energy-saving control system

A.V. Sobolev¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, alexsobolev2016@mail.ru

A.I. Lyashenko¹, Ph.D. (Engineering), Leading Programmer, alexlyashenko@live.ru

D.P. Vent¹, Dr.Sc. (Engineering), Professor, dvent@list.ru

¹ Novomoskovsk Institute "Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia", Novomoskovsk, 301665, Russian Federation

Abstract. Modern automatic control systems are able to solve a variety of tasks in various industries. In this case, the success of the system implementation depends on the purpose of its construction formed as a certain optimality criterion. The paper analyzes the current state of the problems of energy-saving management of chemical-technological systems. It is noted that energy efficiency improvement is complicated while ensuring the operational speed of chemical-engineering system management. It is proposed to solve this problem by creating energy-saving automatic control systems with an excessive number of control actions which are different in frequency and energy characteristics.

The paper proposes an information system structure to analyze a multidimensional control object in order to identify dynamic and energy efficient control channels and the subsequent synthesis of an energy-saving automatic control system. The authors describe the main modules of the information system, synthesis and analysis problems solved in them, the structure of the constituent subsystem interaction.

An algorithm for selecting an energy-efficient control channel is based on exergy sensitivity. The exergy characteristics of technological processes give an objective evaluation of the use of dissimilar energy resources and identify energy saving reserves. The paper presents a logical structure of the subsystem of exergics analysis of chemical-technological systems, a class diagram, their basic functions and methods. There are also recommendations for the use of an automated system for exergy analysis of a chemical-technological system.

The proposed algorithm for choosing a dynamically efficient control channel is based on an iterative procedure of calculating a quadratic integral criterion for a given frequency operating range.

Keywords: information system, energy-saving control system, dynamically efficient control channel, energy saving control channel, filters, exergy sensitivity, quadratic integral criterion.

References

1. Elizarov I.A., Tretyakov A.A., Pchelintsev A.N., Pogonin V.A., Nazarov V.N., Onevsky P.M. *Integrated Systems Design and Management: SCADA-Systems*. Tambov, TSTU Publ., 2015, 160 p.
2. Matveykin V.G., Muromtsev D.Yu. *Theoretical Foundations of Energy-Saving Control of Dynamic Modes of Industrial-Technical Installations*. Monograph. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2007, 128 p.
3. Schneider D.A., Kazarinov L.S. The method of proactive management of complex technological complexes according to the energy efficiency criteria. *Large-Scale Systems Control*, 2011, iss. 32, pp. 221–240 (in Russ.).
4. Kolesnikov A.A., Veselov G.E., Popov A.N., Kolesnikov A.A., Topchiev B.V., Mushenko A.S., Kobzev V.A. *Synergistic Methods for Managing Complex Systems: Mechanical and Electromechanical Systems*. Moscow, Librokom Publ., 2013, 304 p.
5. Popov A.N. Synergistic synthesis of systems of energy-saving control of electromechanical processes. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. Taganrog, TTI YuFU Publ., 2011, no. 6, pp. 74–83 (in Russ.).
6. Dvoretzky D.S., Dvoretzky S.I., Ostrovsky G.M. Integrated design of energy- and resource-saving chemical-technological processes and control systems: strategy, methods and applications. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2008, vol. 42, no. 1, pp. 29–39 (in Russ.).
7. Dvoretzky D.S., Dvoretzky S.I., Mishchenko C.B., Ostrovsky G.M. New approaches to the integrated synthesis of flexible automated chemical-technological systems. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2010, vol. 44, no. 1, pp. 69–77 (in Russ.).
8. *Methods of Classical and Modern Theory of Automatic Control. Vol. 1: Mathematical Models, Dynamic Characteristics and Analysis of Automatic Control Systems*. K.A. Pupkov, N.D. Yegupov (Ed.). Moscow, MSTU N.E. Bauman Publ., 2004, 656 p.
9. Artyomova S.V., Muromtsev D.Yu., Gribkov A.N. Prediction and compensation of disturbances in optimal control systems. *Trans. of TSTU*. 2003, vol. 9, no. 4, pp. 632–637 (in Russ.).
10. Sobolev A.V., Lyashenko A.I., Vent D.P., Soboleva Yu.V. *Energy-Saving Automatic Control System*. Patent RF 2494433. MPK8 G05 B 13/00. 2013.
11. Sobolev A.V., Vent D.P. Energy-saving regulators: tasks and structure. *Sensors and Systems*. Moscow, SenSiDat Publ., 2009, no. 10, pp. 23–28 (in Russ.).

Примеры библиографического описания статьи

1. Соболев А.В., Ляшенко А.И., Вент Д.П. Информационная система выбора каналов управления технологическим объектом с целью синтеза энергосберегающей системы регулирования // Программные продукты и системы. 2018. Т. 31. № 4. С. 791–797. DOI: 10.15827/0236-235X.031.4.791-797.
2. Sobolev A.V., Lyashenko A.I., Vent D.P. Information system for selecting control channels for a process facility to synthesize an energy-saving control system. *Software & Systems*. 2018, vol. 31, no. 4, pp. 791–797 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.031.4.791-797.