

Раздел 8. УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

УДК 66.011:681.5

ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПОЛУНАТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКИМИ РЕАКТОРАМИ*Невиницын Владимир Юрьевич (nevinitsyn@gmail.com)**Лабутин Александр Николаевич**Волкова Галина Витальевна**ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет»*

В работе исследована возможность реализации нелинейных алгоритмов управления химическими реакторами на реальных аппаратных платформах. Для решения поставленной задачи применялся программно-технический комплекс на базе микропроцессорного контроллера. Предложенная структура программно-технического комплекса и разработанный комплект программных модулей позволяют проводить полунатурное моделирование, алгоритмический и параметрический синтез, а также отладку систем автоматического управления технологическими объектами.

Ключевые слова: система автоматического управления, технологический объект управления, проектирование, моделирование, контроллер, синтез, алгоритм управления, синергетическая теория управления.

Согласно концепции кибернетически организованных химико-технологических процессов и систем [1], на стадии проектирования химического производства, связанного с превращением исходных веществ в конечные продукты, решается задача оптимального синтеза реакторного узла и задача синтеза алгоритмов управления процессом, а на стадии эксплуатации подзадача организации оптимального функционирования объекта в условиях действия параметрических и сигнальных возмущений.

Реакторная подсистема во многих случаях является центральной в общей схеме превращения исходных реагентов в целевые продукты и в существенной степени определяет ресурсо- и энергосбережение, экономическую эффективность производственного процесса в целом, степень удовлетворения спроса потребителей на те или иные продукты.

Несмотря на значительное количество работ, связанных с автоматизацией и управлением химическими реакторами [2, 3], проблема синтеза систем управления, обеспечивающих поддержание оптимальных режимов их работы, остается до конца не решенной. Это объясняется основной особенностью химических реакторов как объектов управления: многомерностью, нелинейностью и многосвязностью.

Выходом из данной ситуации является развитие физической теории управления, в максимальной степени учитывающей особенности объекта, и в частности – синергетической теории управления, основные положения которой сформулированы в работах [4, 5].

Эффективность метода аналитического синтеза алгоритмов управления нелинейными объектами с использованием принципов синергетики (метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР)) показана в ряде работ [6-11].

Так, в работах [6, 7] поставлены и решены задачи разработки системы управления реакторами для проведения последовательных и последовательно-параллельных реакций, кинетика которых описывается линейными обыкновенными дифференциальными уравнениями. В работе [8] была решена задача синтеза системы управления концентрацией целевого вещества на выходе реакторного каскада, функционирующего в изотермическом режиме при реализации сложной реакции с нелинейной кинетикой. В работах [9, 10] решена задача синергетического синтеза скалярной и векторной систем управления реакторным узлом с распределенной подачей общего реагента. В работе [11] решена задача аналитического синтеза закона управления химическим реактором при переходе с одной производительности на другую. Имитационное моделирование систем управления показало эффективность синтезированных законов управления. Практическое использование алгоритмов предполагает их программную реализацию и отладку на промышленных контроллерах.

В настоящей работе исследуется возможность реализации нелинейных алгоритмов управления химическими реакторами, синтезированных методом АКАР, на реальных аппаратных платформах – программируемых логических контроллерах (ПЛК). В исследованиях, результаты которых отражены в данной работе, применялся программно-технический комплекс (ПТК) на базе отладочного модуля компании «Текон», основой которого является многофункциональный контроллер ТКМ410.

В основу работы ПТК положен метод полунатурного моделирования, согласно которому воспроизведение работы технологических объектов (процессов) осуществляется с использованием компьютерных имитационных математических моделей, а алгоритмы управления

этим объектами реализуются на реальных технических устройствах – ПЛК.

Описываемый подход в последнее время широко используется в процессе создания АСУТП на этапе ее проектирования с целью тестирования и отладки управляющих программ ПЛК [12-15]. Тестирование системы с применением имитационной модели технологического процесса позволяет выявить возможные недостатки и провести корректировку как самих алгоритмов управления, так и их программной реализации на языках стандарта IEC 61131-3. Предлагаемая концепция полунатур-

ного моделирования представляет наибольшую актуальность на стадии разработки АСУТП при тестировании сложных управляющих алгоритмов, когда их апробация на реальном объекте, как правило, недопустима или затруднена.

Общая структура ПТК представлена на рисунке 1. В состав ПТК входят: автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора (инженера-исследователя); АРМ разработчика (программиста); отладочный модуль «ТеконУС 410-02».

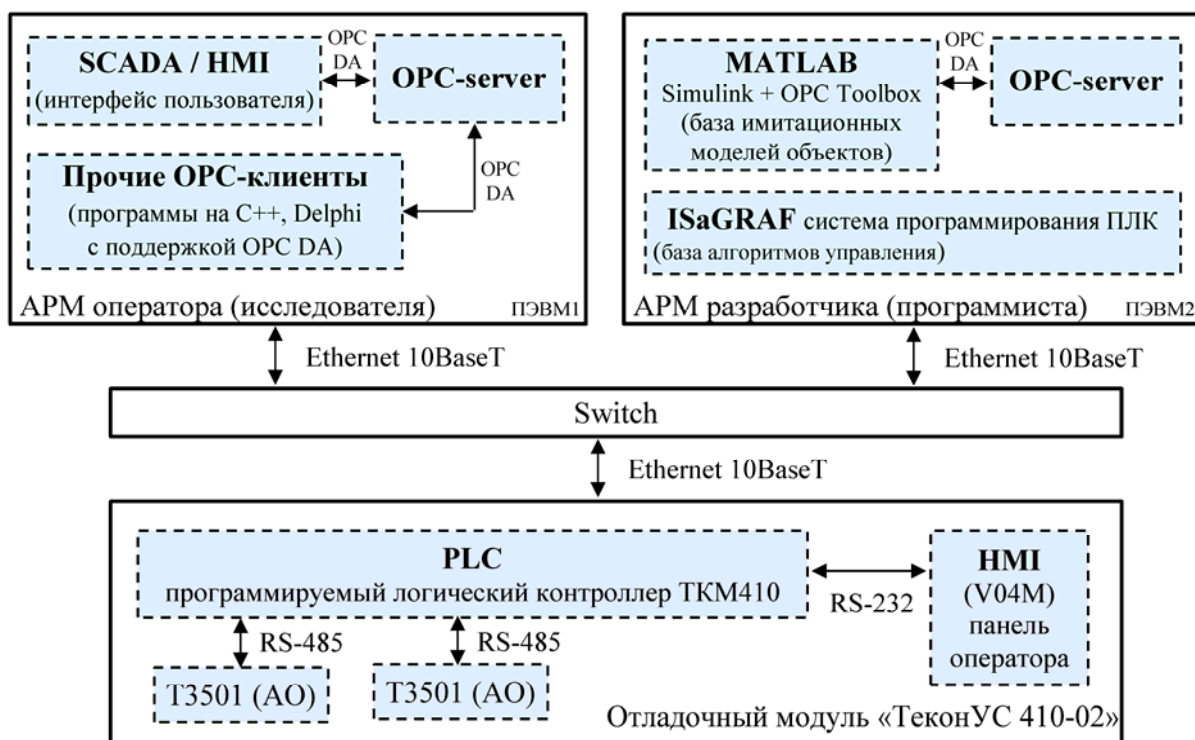


Рисунок 1. Структурная схема программно-технического комплекса

Отладочный модуль «ТеконУС 410-02» включает в себя следующие основные компоненты: многофункциональный программируемый контроллер ТКМ410; панель оператора V04M; модули вывода аналоговых сигналов Т3501 (модули расширения); блок питания (DR-4524) для модулей Т3501.

АРМ инженера-исследователя и программиста подключены к микропроцессорному контроллеру ТКМ410 через сетевой коммутатор (switch) посредством интерфейса Ethernet спецификации 10BaseT.

Для организации работы ПТК использовано следующее программное обеспечение: MATLAB; TeconOPC-сервер; MasterSCADA; ISaGRAF PRO.

Разработана база имитационных математических моделей объектов химической технологии, которая является неотъемлемой частью ПТК. В качестве класса объектов выступают

жидкофазные химические реакторы непрерывного типа. Программная реализация моделей выполнена в расширении Simulink пакета прикладных программ математического моделирования MATLAB, который позволяет вести моделирование в режиме реального времени, что важно в рамках решаемой задачи.

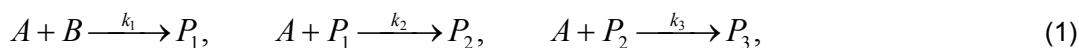
Алгоритмы управления технологическими объектами реализуются на многофункциональном контроллере ТКМ410, программирование которого осуществляется с помощью системы ISaGRAF PRO (поддерживаются языки SFC, FC, FBD, LD, ST, IL).

Для диспетчерского управления, сбора и отображения данных в ходе процесса полунатурного моделирования используется современная объектно-ориентированная SCADA и soft-logic система MasterSCADA фирмы InSat.

Интеграция компонентов системы и организация обмена данными обеспечивается по-

средством TescoOPC-сервера. OPC-сервер представляет собой универсальное средство доступа к данным в контроллере со стороны SCADA-систем (и других клиентов), которые поддерживают технологию OPC. Сервер получает данные из контроллера по сети Ethernet (протокол TCP/IP). Обмен данными между Simulink-программой, контроллером TKM410 и SCADA-системой происходит посредством OPC-сервера с использованием клиент-серверной технологии (стандарт OPC DA). MasterSCADA и MATLAB выступают в роли OPC-клиентов.

В общем случае, реализация процесса полунатурного моделирования системы управления предполагает решение следующих задач: разработка программы имитационного моделирования технологического процесса (объекта);



где A и B – исходные реагенты;

P_1, P_2, P_3 – продукты реакции;

k_1, k_2, k_3 – константы скоростей стадий.

Целевым компонентом является вещество P_2 . В общем случае при изменении спроса на продукты реакции целевым может быть и другой компонент или смесь ряда веществ. Аппарат функционирует в политропическом режиме. Исходные реагенты A и B с концентрациями x_1^{ex}, x_2^{ex} подаются в аппарат отдельными потоками с расходами v_1, v_2 и температурами

конфигурирование и реализация алгоритмов управления для конкретного ПЛК; разработка интерфейса пользователя для диспетчерского контроля и управления процессом (SCADA, HMI); конфигурирование OPC-сервера для организации доступа к данным ПЛК со стороны OPC-клиентов; настройка и конфигурирование OPC-клиентов (настройка тэгов чтения и записи).

В качестве примера технологического объекта управления, рассмотрим жидкофазный реактор емкостного типа непрерывного действия, снабженный механической мешалкой для перемешивания реакционной смеси и теплообменной рубашкой. В аппарате реализуется трехстадийная последовательно-параллельная экзотермическая реакция

x_6^{ex1}, x_6^{ex2} , соответственно. Смесь из реактора забирается насосом. Поскольку в аппарате протекает экзотермическая реакция, в рубашку реактора подается хладагент для охлаждения реакционной массы. Цель функционирования объекта заключается в получении продукта P_2 заданной концентрации.

Математическая модель химического реактора при условии постоянства объема (уровня) в аппарате имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{d\tau} &= R_1 + M_A - b_2x_1 - b_3x_1v_2, & \frac{dx_2}{d\tau} &= R_2 - b_2x_2 + (M_B - b_3x_2)v_2, \\ \frac{dx_3}{d\tau} &= R_3 - b_2x_3 - b_3x_3v_2, & \frac{dx_4}{d\tau} &= R_4 - b_2x_4 - b_3x_4v_2, & \frac{dx_5}{d\tau} &= R_5 - b_2x_5 - b_3x_5v_2, \\ \frac{dx_6}{d\tau} &= \alpha_1k_1x_1x_2 + \alpha_2k_2x_1x_3 + \alpha_3k_3x_1x_4 + b_2x_6^{ex1} + \beta_1x_7 - (\beta_1 + b_2)x_6 + (x_6^{ex2} - x_6)b_3v_2, \\ \frac{dx_7}{d\tau} &= \beta_2(x_6 - x_7) + b_1(x_7^{ex} - x_7)v_{xl}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $M_A = v_1x_1^{ex}/V$;

$M_B = x_2^{ex}/V$;

$b_1 = 1/V_{xl}$;

$b_2 = v_1/V$;

$b_3 = 1/V$;

$\alpha_i = \Delta H_i / (\rho C)$, $i = 1, \dots, 3$;

$\beta_1 = K_T F_T / (\rho C V)$;

$\beta_2 = K_T F_T / (\rho_{xl} C_{xl} V_{xl})$;

$R_1 = -k_1x_1x_2 - k_2x_1x_3 - k_3x_1x_4$;

$R_2 = -k_1x_1x_2$;

$R_3 = k_1x_1x_2 - k_2x_1x_3$;

$R_4 = k_2x_1x_3 - k_3x_1x_4$;

$R_5 = k_3x_1x_4$;

ΔH_i , $i = 1, \dots, 3$ – тепловой эффект соответствующей стадии реакции;

$k_i = k_{i0} \cdot \exp(-E_i / R(x_6 + 273))$, $i = 1, \dots, 3$
 – константы скоростей стадий;
 k_{i0} , $i = 1, \dots, 3$ – постоянный множитель (предэкспонента) констант скоростей стадий;
 E_i , $i = 1, \dots, 3$ – энергия активации соответствующей стадии реакции;
 R – универсальная газовая постоянная;
 K_T , F_T – коэффициент теплопередачи через стенку и поверхность теплообмена аппарата;
 ρ , C – плотность и теплоемкость реакционной смеси;
 ρ_{xl} , C_{xl} – плотность и теплоемкость хладагента;
 v_{xl} – расход хладагента на входе и выходе из аппарата;
 x_7^{ex} , x_7 – температуры хладагента на входе и выходе из аппарата;
 x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , x_5 – концентрации компонентов A , B , P_1 , P_2 , P_3 в реакторе;

x_6 – температура реакционной смеси в аппарате;
 V – объем аппарата;
 V_{xl} – объем хладагента в рубашке.

Для проведения полунатурного моделирования и тестирования разрабатываемых программ управления необходима замена технологического процесса (объекта) его адекватной имитационной моделью. MATLAB Simulink является мощным инструментом для исследования и моделирования сложных динамических систем, с его помощью можно имитировать реальный процесс либо производство в целом.

Используя библиотеку OPC toolbox расширения Simulink, организована связь имитационной модели технологического процесса с управляющей программой, загруженной в ПЛК.

В качестве примера, на рисунке 2 представлено главное окно разработанной Simulink-программы, моделирующей динамические режимы объекта управления.

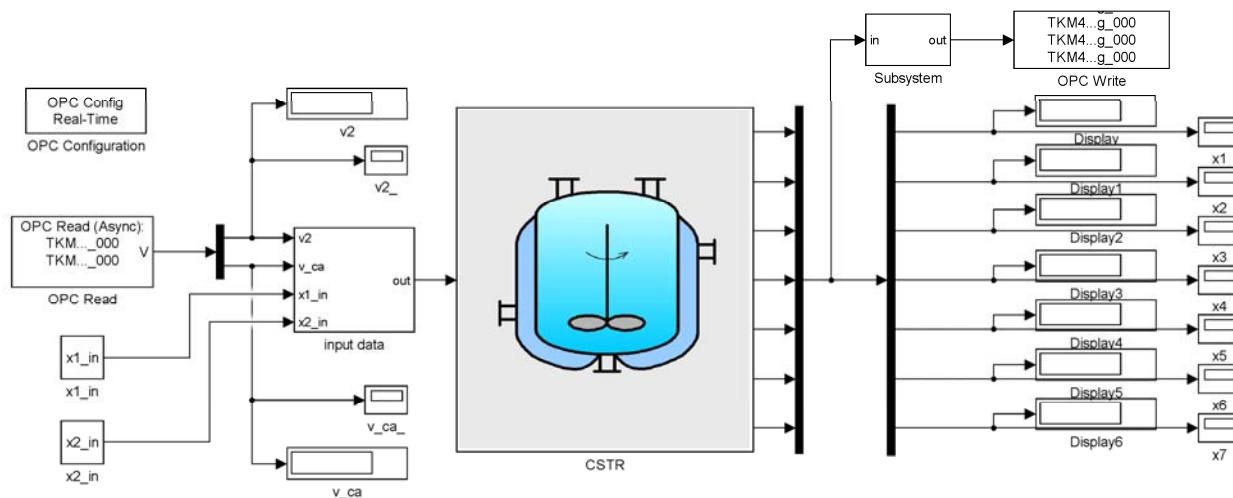


Рисунок 2. Simulink-модель, имитирующая работу объекта

Для обеспечения обмена данными между Simulink и TecnoOPC-сервером используются функциональные блоки «OPC Configuration», «OPC Read» и «OPC Write», которые находятся в разделе «OPC Toolbox» библиотеки объектов Simulink.

Функциональный блок «OPC Configuration» служит для конфигурирования связи с OPC-сервером, настройки обработки возникающих ошибок при обмене данными и настройки режима моделирования (режим имитации реального времени). Поддерживаются как локальные серверы, так и серверы, находящиеся в сети.

Поддерживается одновременная работа с несколькими OPC-серверами.

Функциональные блоки «OPC Read» и «OPC Write» служат для чтения и записи информации в указанный тэг сервера.

Задача векторного управления химическим реактором заключается в стабилизации концентрации целевого компонента на его выходе (x_4) и температуры реакционной смеси в аппарате (x_6) в условиях действия возмущений, т.е.

$x_4 = \bar{x}_4$, $x_6 = \bar{x}_6$, где \bar{x}_4 и \bar{x}_6 – заданные значения концентрации и температуры. Регули-

рующими воздействиями являются расходы U_2 и U_{x_i} , соответственно.

В терминах синергетической теории управления задача управления формулируется следующим образом: необходимо получить в аналитической форме законы управления как функции переменных состояния $u_1(x_1, x_2, \dots, x_n)$, $u_2(x_1, x_2, \dots, x_n)$, где $u_1 = U_2$, $u_2 = U_{x_i}$, которые обеспечивали бы перевод

объекта из произвольного начального состояния на пересечение введенных притягивающих инвариантных многообразий, а затем асимптотическое устойчивое движение в заданное конечное состояние, определяемое следующими целями: $x_4 = \bar{x}_4$ и $x_6 = \bar{x}_6$.

В соответствии с методом АКАР [5] получены законы управления:

$$\begin{aligned} u_1 &= \frac{(x_4 - \bar{x}_4)}{T_1 b_3 x_4} + \frac{R_4}{b_3 x_4} - \frac{b_2}{b_3}, \\ u_2 &= -\frac{(x_7 + v_1)}{T_2 b_1 (x_7^{ex} - x_7)} - \frac{\beta_2 (x_6 - x_7)}{b_1 (x_7^{ex} - x_7)} - \frac{\partial v_1}{\partial x_6} \cdot \frac{[f_6 + \beta_1 x_7 + (x_6^{ex2} - x_6) b_3 u_1]}{b_1 (x_7^{ex} - x_7)}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $f_6 = \alpha_1 k_1 x_1 x_2 + \alpha_2 k_2 x_1 x_3 + \alpha_3 k_3 x_1 x_4 + b_2 x_6^{ex1} - (\beta_1 + b_2) x_6$,

$$v_1 = \frac{(x_6 - \bar{x}_6)}{T_3 \beta_1} + \frac{f_6}{\beta_1} + \frac{(x_6^{ex2} - x_6) b_3 u_1}{\beta_1}, \quad T_i, \quad i = 1, \dots, 3 \text{ – параметры настройки алгоритма.}$$

На следующем этапе ставится задача переноса алгоритмов в управляющую программу ПЛК. Важным моментом на данном этапе является вопрос обеспечения адекватности реализации управляющих алгоритмов на языках стандарта IEC 61131-3.

Синтезированные алгоритмы управления реализованы в среде разработки приложений ISaGRAF в виде функциональных блоков, что существенно упрощает их применение. Используя средства ISaGRAF осуществляется загрузка управляющих программ в контроллер ТКМ410. На заключительном этапе проводится конфигурирование OPC-сервера и OPC-клиентов (MATLAB, SCADA).

Адекватность реализации алгоритмов управления на ПЛК и их работоспособность определялась путем проведения полунатурного моделирования с последующим исследованием свойств асимптотической устойчивости замкнутой системы в целом, инвариантности к возмущениям, ковариантности с задающими воздействиями и грубости.

Процесс выполнения полунатурного моделирования происходит в режиме реального времени, что позволяет оператору-исследователю проводить мониторинг всех происходящих процессов и оказывать воздействия как на имитационную модель технологи-

ческого процесса, так и на управляющую программу контроллера, что является существенным преимуществом данного подхода.

На рисунке 3 представлены результаты, полученные в ходе полунатурного моделирования. В качестве примера приведены переходные процессы регулирования концентрации и температуры в аппарате при изменении заданного значения концентрации целевого компонента ($\bar{x}_4 = 0.59$ моль/л). Из рисунка 3 следует, что замкнутая система управления ковариантна с задающим воздействием, устойчива в целом, характеризуется высокой точностью в установившемся режиме и малым значением перерегулирования по концентрации целевого компонента, что позволяет экономить ресурсы. Результаты полунатурного моделирования на базе ПТК полностью согласуются с результатами имитационного моделирования системы управления на ЭВМ, что подтверждает корректность управляющих программ контроллера. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о работоспособности и эффективности комплекса «химический реактор – подсистема управления» при использовании синтезированных алгоритмов.

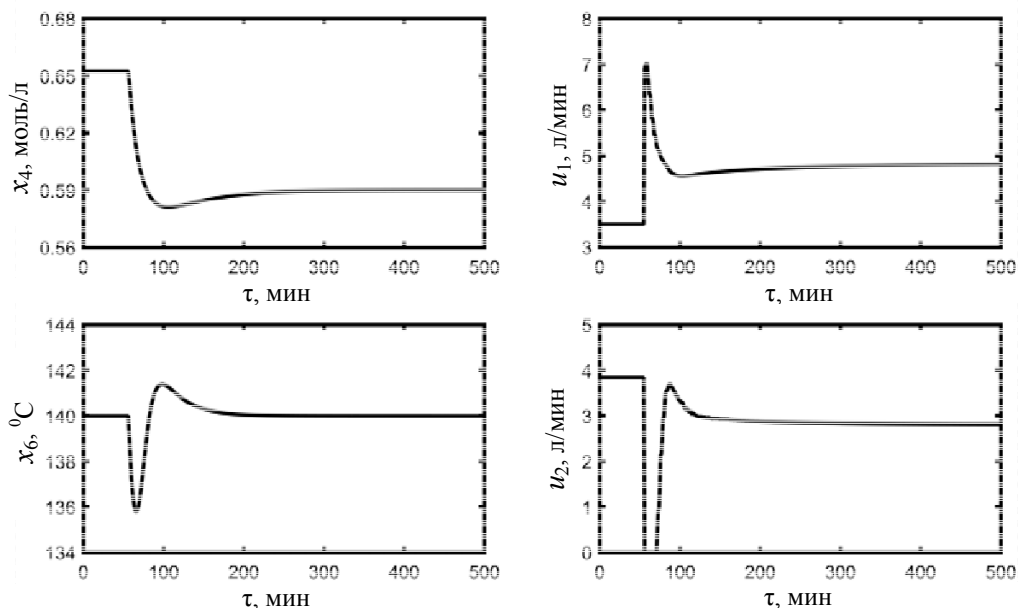


Рисунок 3. Изменение регулируемых параметров и управляющих воздействий в системе при изменении задающего воздействия регулятору концентрации

Разработанная методика может использоваться для проведения имитационного (полунатурного) моделирования, алгоритмического и параметрического синтеза, а также отладки систем автоматического управления технологическими объектами на этапе проектирования АСУТП.

Технико-экономический эффект от использования предложенной методики выражается в сокращении затрат времени и других ресурсов на пуско-наладочные работы при введении АСУТП в эксплуатацию.

Еще одним вариантом использования данной методики является использование ее в качестве базы для построения стендов обучения обслуживающего персонала в ходе наладки и ввода в эксплуатацию новых установок либо проведения курсов повышения квалификации работников на действующих установках.

Литература

1. Кафаров В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. – 4 изд. перераб. и доп. – М.: Химия, 1985. – 448 с.
2. Kaur G., Kaur R. A comparative study of performance of different control architectures for reactor system // *International Journal of Computer Applications*. – 2012. – Vol. 41, No. 11. – P. 36-39.
3. Krishna D., Suryanarayana K., Aparna G., Sree R.P. Tuning of PID controllers for unstable continuous stirred tank reactors // *International Journal of Applied Science and Engineering*. – 2012. – Vol. 10, No. 1. – P. 1-18.
4. Красовский А.А. Развитие и становление современной теории управления // *Синергетика и проблемы теории управления* / Под

ред. А.А. Колесникова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – С. 13-34.

5. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
6. Лабутин А.Н., Семёнов Ю.В. // *Изв. вузов. Серия «Экономика, финансы и управление производством»*. – 2011. – № 4. – С. 114-120.
7. Лабутин А.Н., Кукушкин А.В. // *Изв. вузов. Серия «Экономика, финансы и управление производством»*. – 2011. – № 3. – С. 81-86.
8. Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю. Синергетический синтез регулятора концентрации целевого компонента в каскаде химических реакторов // *Изв. вузов. Серия «Экономика, финансы и управление производством»*. – 2011. – № 3. – С. 86-92.
9. Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю., Девятьяров А.Н. Система управления каскадом химических реакторов для проведения последовательно-параллельной реакции // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. – 2013. – Т. 56. – Вып. 11. – С. 131-135.
10. Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю., Девятьяров А.Н. Волкова Г.В. Управление реакторным узлом с распределенной подачей исходного реагента // *Изв. вузов. Серия «Экономика, финансы и управление производством»*. – 2014. – № 2. – С. 165-172.
11. Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю. Аналитический синтез системы управления химическим реактором // *Теорет. основы хим. технологии*. – 2014. – Т. 48. – № 3. – С. 318-322.
12. Кирьязов И.Н., Хобин В.А. Программно-технический комплекс для отладки прикладного ПО автоматизированной системы оптимизации загрузки ПТЛ сыпучими мате-

- риалами / Автоматизация технологических и бизнес-процесов. – 2014. – Volume 6, Issue 4. – С. 29-42.
13. Макаров В.М., Макаров Н. Организация обмена данными между MATLAB Simulink и пользовательской программой / Компоненты и технологии. – 2012. – №3(128). – С. 114-116.
14. Рыбалев А.Н., Николаец Ф.А. Разработка и эмулирование АСУТП с использованием программ разных производителей и типов / Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. – 2014. – №65. – С. 73-82.
15. Zhang Lieping, Zeng Aiqun, Zhang Yunsheng. On Remote Real-time Communication between MATLAB and PLC Based on OPC Technology / Proceedings of the 26th Chinese Control Conference, July 26-31, Zhangjiajie, Hunan, China. – 2007. – P. 545-548.