

**ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ**

**Невиницын В.Ю., Лабутин А.Н., Макарова Е.В.**

Невиницын Владимир Юрьевич, Лабутин Александр Николаевич,  
Макарова Екатерина Владимировна  
Ивановский государственный химико-технологический университет,  
г. Иваново, Россия. 153000, Ивановская область, г. Иваново, пр. Шереметевский, д. 7.  
E-mail: nevinitsyn@isuct.ru, lan@isuct.ru, makarovakaty97@yandex.ru

В работе рассмотрен вопрос реализации нелинейной векторной системы управления температурой и концентрацией в жидкофазном химическом реакторе на базе программируемого логического контроллера и предложена методика полунатурного моделирования системы управления. В качестве объекта управления рассмотрен жидкофазный химический реактор емкостного типа, снабженный механической мешалкой и теплообменной рубашкой. Аппарат функционирует в политропическом режиме. В реакторе реализуется бимолекулярная экзотермическая реакция. Задача системы управления реактором заключается в стабилизации концентрации целевого продукта и температуры реакционной смеси в аппарате на заданных значениях в условиях действия возмущений. Задача синтеза алгоритмов управления решалась методом аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР). Синтезированные алгоритмы реализованы на языках ST и FBD стандарта IEC 61131-3 в среде разработки приложений CoDeSys для контроллера ОВЕН ПЛК154.

**Ключевые слова:** система управления, аналитическое конструирование агрегированных регуляторов, химический реактор, контроллер, моделирование.

**SOFTWARE-HARDWARE SYSTEM FOR COMPUTER-AIDED DESIGN OF CONTROL  
ALGORITHMS FOR TECHNOLOGICAL OBJECTS**

**Nevinitsyn V.Yu., Labutin A.N., Makarova E.V.**

Nevinitsyn Vladimir Yur'evich, Labutin Alexander Nikolaevich, Makarova Ekaterina Vladimirovna  
Ivanovo State University of Chemical Technology,  
Ivanovo, Russia. 153000, Ivanovo region, Ivanovo, Sheremetevsky ave., 7.  
E-mail: nevinitsyn@isuct.ru, lan@isuct.ru, makarovakaty97@yandex.ru

The paper deals with the implementation of a temperature and concentration nonlinear vector control system of a liquid-phase chemical reactor on the base of a programmable logic controller and proposes a methodology of hardware in the loop simulation of the control system. A liquid-phase continuous stirred tank reactor equipped with a mechanical stirrer and cooling jacket is considered as a control object. The reactor operates in the polytropic mode. The bimolecular exothermic process is carried out in the reactor. The task of chemical reactor control system is to maintain both concentration of target product and temperature of reaction mixture in the apparatus at the given set points under the action of disturbances. The problem of control algorithms synthesis was solved by analytical design method of aggregated regulators (ADAR). Synthesized algorithms are implemented in the ST and FBD languages of IEC 61131-3 in the CoDeSys development environment for the OWEN PLC154 controller.

**Keywords:** control system, analytical design of aggregated regulators, chemical reactor, controller, synthesis, simulation.

### АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Современное химическое производство представляет собой сложную химико-технологическую систему (ХТС), состоящую из большого количества аппаратов и технологических связей между ними.

При разработке новой ХТС или модернизации существующей основная задача заключается в создании высокоэффективного химического производства, т.е. такого объекта химической промышленности, который позволит получать продукцию заданного качества в требуемом объеме наиболее экономически целесообразным путем.

Основным элементом в технологической схеме для проведения химического процесса является реактор, в котором в результате химических превращений из исходного сырья получают необходимые продукты, подлежащие реализации.

В зависимости от решаемой задачи и вида реализуемых реакций применяют различные типы организации реакторного узла: реактор идеального вытеснения, реактор идеального смешения, каскад реакторов идеального смешения и различные варианты сочетаний реакторов смешения и вытеснения.

Важнейшей задачей, решаемой на уровне АСУТП в любом химическом производстве, является реализация управляющих функций, результатом которых является выработка регулирующих воздействий с целью стабилизации отдельных технологических параметров, обеспечивающих оптимальный режим работы реакторной системы.

Данная задача решается путем разработки систем автоматического регулирования (САР) и синтеза соответствующих алгоритмов управления. При этом эффективность работы системы управления реактором во многом определяет энерго- и ресурсосбережение ХТС в целом.

В настоящее время существует множество различных типов систем управления: системы адаптивного управления с подстройкой параметров, системы с применением прогнозирующих моделей, регуляторы состояния, робастные системы с использованием ПИД-регуляторов, нечеткие системы управления, нейронные сети [1-5].

Тем не менее, указанные типы систем управления недостаточно эффективны для существенно нелинейных объектов. На наш взгляд, перспективным в этом плане является метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР), позволяющий эффективно решать задачи алгоритмического синтеза систем управления нелинейными, многомерными и многосвязными технологическими объектами без применения процедуры линеаризации [6, 7]. В работах [8-12] рассмотрено решение задач управления химическими реакторами методом АКАР в различных постановках и с помощью методов имитационного моделирования показана эффективность синтезированных алгоритмов.

На ранних стадиях проектирования системы управления решается ряд задач: структурный синтез САР, алгоритмический синтез, параметрический синтез. Практическое использование алгоритмов управления предполагает их программную реализацию и отладку на промышленных контроллерах. В связи с этим, в настоящей работе исследуется возможность реализации нелинейных алгоритмов управления химическими реакторами, синтезированных методом АКАР, на реальных аппаратных платформах – программируемых логических контроллерах (ПЛК), входящих в состав программно-технических комплексов (ПТК) для построения распределенных систем управления (РСУ).

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве объекта управления в данной работе рассмотрен жидкофазный химический реактор непрерывного действия, работающий в политропическом режиме. В аппарате протекает бимолекулярная экзотермическая реакция типа  $A+B \rightarrow P$ , где  $A, B$  – исходные вещества;  $P$  – продукт реакции. Задача системы управления заключается в обеспечении оптимального режима работы аппарата путем стабилизации температуры реакционной смеси и (или) концентрации продукта  $P$  на выходе аппарата в условиях действия возмущений.

На рис. 1 введены следующие обозначения:  $x_1^{6x}, x_2^{6x}$  – концентрация исходных реагентов;  $v_1, v_2$  – расход потоков исходных реагентов;  $x_6^{6x1}, x_6^{6x2}$  – температура потоков исходных реагентов;

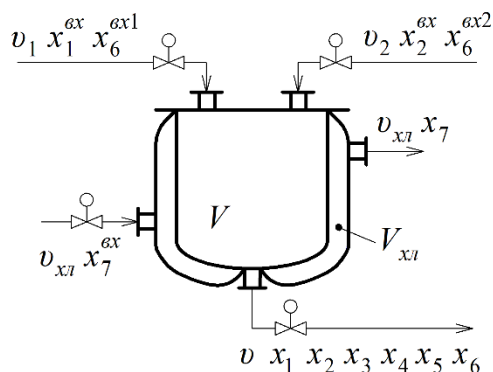


Рис. 1. Принципиальная схема химического реактора  
Fig. 1. Schematic diagram of a chemical reactor

$x_7^{ex}$ ,  $x_7$  – температура хладагента на входе и выходе из аппарата;  $v_{xl}$  – расход хладагента на входе и выходе из аппарата;  $x_6$  – температура реакционной смеси в аппарате;  $v$  – расход реакционной смеси на выходе из аппарата;  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ,

$x_4$ ,  $x_5$  – концентрация компонентов  $A$ ,  $B$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  в реакторе;  $V$  – объем реакционной смеси в аппарате;  $V_{xl}$  – объем хладагента в рубашке.

Математическая модель динамики химического реактора имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{d\tau} &= R_1 + M_A - b_2x_1 - b_3x_1u_1, & \frac{dx_2}{d\tau} &= R_2 - b_2x_2 + (M_B - b_3x_2)u_1, & \frac{dx_3}{d\tau} &= R_3 - b_2x_3 - b_3x_3u_1, \\ \frac{dx_4}{d\tau} &= R_4 - b_2x_4 - b_3x_4u_1, & \frac{dx_5}{d\tau} &= R_5 - b_2x_5 - b_3x_5u_1, & \frac{dx_6}{d\tau} &= \alpha_1k_1x_1x_2 + \alpha_2k_2x_1x_3 + \alpha_3k_3x_1x_4 + \\ & + b_2x_6^{ex1} + \beta_1x_7 - (\beta_1 + b_2)x_6 + (x_6^{ex2} - x_6)b_3u_1, & \frac{dx_7}{d\tau} &= \beta_2(x_6 - x_7) + b_1(x_7^{ex} - x_7)u_2, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $R_1 = -k_1x_1x_2 - k_2x_1x_3 - k_3x_1x_4$ ,  $R_2 = -k_1x_1x_2$ ,  $R_3 = k_1x_1x_2 - k_2x_1x_3$ ,  $R_4 = k_2x_1x_3 - k_3x_1x_4$ ,  $R_5 = k_3x_1x_4$  – скорость реакции по компонентам;  $M_A = v_1x_1^{ex}/V$ ;  $M_B = x_2^{ex}/V$ ;  $b_1 = 1/V_{xl}$ ;  $b_2 = v_1/V$ ;  $b_3 = 1/V$ ;  $\alpha_i = \Delta H_i/(\rho C)$ ,  $i=1, \dots, 3$ ;  $\beta_1 = K_T F_T/(\rho C V)$ ;  $\beta_2 = K_T F_T/(\rho_{xl} C_{xl} V_{xl})$ ;  $\Delta H_i$ ,  $i=1, \dots, 3$  – тепловой эффект соответствующей стадии реакции;  $\rho$ ,  $C$  – плотность и теплоемкость реакционной смеси;  $\rho_{xl}$ ,  $C_{xl}$  – плотность и теплоемкость хладагента;  $K_T$ ,  $F_T$  – коэффициент теплопередачи через стенку и поверхность теплообмена аппарата;  $k_i = k_i^0 \exp[-E_i/R(x_6 + 273)]$ ,  $i=1, \dots, 3$  – константы скоростей стадий;  $k_i^0$ ,  $i=1, \dots, 3$  – постоянный множитель (предэкспонента) констант скоростей стадий;  $E_i$ ,  $i=1, \dots, 3$  – энергия активации соответствующей стадии реакции;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $u_1 = v_2$ ,  $u_2 = v_{xl}$  – управляющие воздействия.

Оптимальный режим работы химического реактора обеспечивается путем поддержания заданных значений температуры реакционной смеси и концентрации целевого продукта на выходе. В рамках рассматриваемой работы предположим, что целевым компонентом является продукт  $P$ . Следовательно, задача векторной системы управления аппаратом заключается в стабилизации концентрации и температуры в условиях действия возмущающих факторов.

В качестве управляющих воздействий для регулирования концентрации и температуры предлагается использовать поток исходного реагента  $v_2$  и расход хладагента  $v_{xl}$  на входе в аппарат.

В настоящей работе для проверки работоспособности алгоритмов управления на стадии проектирования используется ПТК, построенный на базе программируемого логического контроллера ОВЕН ПЛК154, рабочей станции (автоматизированное рабочее место, АРМ) и панели оператора, соединенных по сети Ethernet и RS-485 (рис. 2).

Для организации работы ПТК использованы различные программные продукты: CoDeSys, OwenOPC-сервер, MasterSCADA, MATLAB.

В основу работы ПТК положен принцип полунатурного моделирования (англ. HIL simulation), т.е. для воспроизведения работы технологических объектов используются их компьютерные имитационные математические модели, а алгоритмы управления этими объектами (регуляторы) реализуются на реальных технических устройствах и средствах автоматизации – программируемых логических контроллерах (ПЛК).

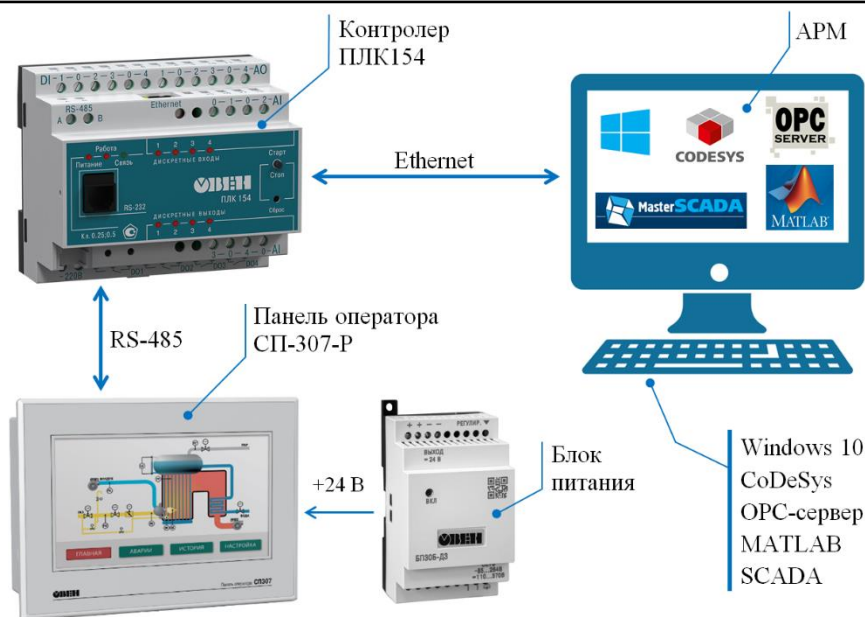


Рис. 2. Структура программно-технического комплекса  
 Fig. 2. The structure of the software and hardware complex

В настоящее время такой подход к моделированию широко используется на стадии проектирования АСУТП с целью тестирования и отладки управляющих программ ПЛК. Также это дает возможность выявить возможные ошибки и провести корректировку как самих алгоритмов управления (регуляторов), так и их программной реализации на языках программирования стандарта IEC 61131–3.

Для организации полунатурного моделирования системы управления необходимо решить ряд задач: разработка программы имитационного моделирования объекта (технологического процесса); программирование контроллера и реализация законов управления; создание пользовательского интерфейса для диспетчерского контроля и управления процессом (SCADA); настройка OPC-сервера и конфигури-

рование тэгов чтения и записи для получения доступа к данным ПЛК со стороны OPC-клиентов (например, SCADA или MATLAB).

Задача синтеза алгоритмов управления химическим реактором решалась методом аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) [6, 7]. Метод АКАР является одним из современных методов алгоритмического синтеза систем управления, предполагающий аналитический синтез законов управления с использованием нелинейной математической модели объекта без применения процедуры линеаризации. Используя метод АКАР, получены нелинейные астатические законы управления концентрацией и температурой, а также векторный астатический закон управления. Для случая векторного управления величины управляющих воздействий определяются по формулам:

$$\begin{aligned}
 u_1 &= \frac{(x_4 - \bar{x}_4) + \gamma_1 z_1}{T_1 b_3 x_4} + \frac{R_4}{b_3 x_4} - \frac{b_2}{b_3} + \frac{\gamma_1 (x_4 - \bar{x}_4)}{b_3 x_4}, \\
 u_2 &= -\frac{(x_7 + v_1)}{T_2 b_1 (x_7^{ex} - x_7)} - \frac{\beta_2 (x_6 - x_7)}{b_1 (x_7^{ex} - x_7)} - \frac{\partial v_1}{\partial x_6} \cdot \frac{[f_6 + \beta_1 x_7 + (x_6^{ex2} - x_6) b_3 u_1]}{b_1 (x_7^{ex} - x_7)} - \frac{\partial v_1}{\partial z_2} \cdot \frac{(x_6 - \bar{x}_6)}{b_1 (x_7^{ex} - x_7)}, \\
 v_1 &= \frac{(x_6 - \bar{x}_6) + \gamma_2 z_2}{T_3 \beta_1} + \frac{f_6}{\beta_1} + \frac{(x_6^{ex2} - x_6) b_3 u_1}{\beta_1} + \frac{\gamma_2 (x_6 - \bar{x}_6)}{\beta_1}, \quad \frac{dz_1}{d\tau} = x_4 - \bar{x}_4, \quad \frac{dz_2}{d\tau} = x_6 - \bar{x}_6,
 \end{aligned} \quad (2)$$

где  $f_6 = a_1 k_1 x_1 x_2 + a_2 k_2 x_1 x_3 + a_3 k_3 x_1 x_4 + b_2 x_6^{ex1} - (\beta_1 + b_2) x_6$ ;  $\gamma_1, \gamma_2$  – весовые коэффициенты;  $T_i > 0, i = 1, \dots, 3$  – постоянные времени, определяющие характер переходных процессов в замкнутой системе;  $x_4, \bar{x}_4$  – текущее и заданное значения концентрации

целевого компонента в реакторе;  $x_6, \bar{x}_6$  – текущее и заданное значения температуры реакционной смеси в аппарате.

Синтезированные алгоритмы реализованы на языках ST и FBD стандарта IEC 61131–3 в

среде разработки приложений CoDeSys для контроллера ОВЕН ПЛК154. На рис. 3 приведены фрагменты программы, реализующей векторное управление концентрацией и температурой в химическом реакторе.

Как было отмечено выше, полунатурное моделирование требует наличия компьютерной имитационной модели объекта. Следовательно, следующим этапом являлась реализация модели химического реактора в системе компьютерной математики MATLAB Simulink. С помощью библиотеки OPC Toolbox расширения Simulink организована связь Simulink-модели химическо-

го реактора с управляющей программой ПЛК. Библиотека OPC Toolbox содержит функциональные блоки «OPC Configuration», «OPC Read» и «OPC Write», с помощью которых организован обмен данными между OwenOPC-сервером и MATLAB Simulink.

Для диспетчерского управления, сбора и отображения данных при проведении полунатурного моделирования использована современная объектно-ориентированная SCADA и soft-logic система MasterSCADA фирмы InSat, в которой реализован интерфейс пользователя.

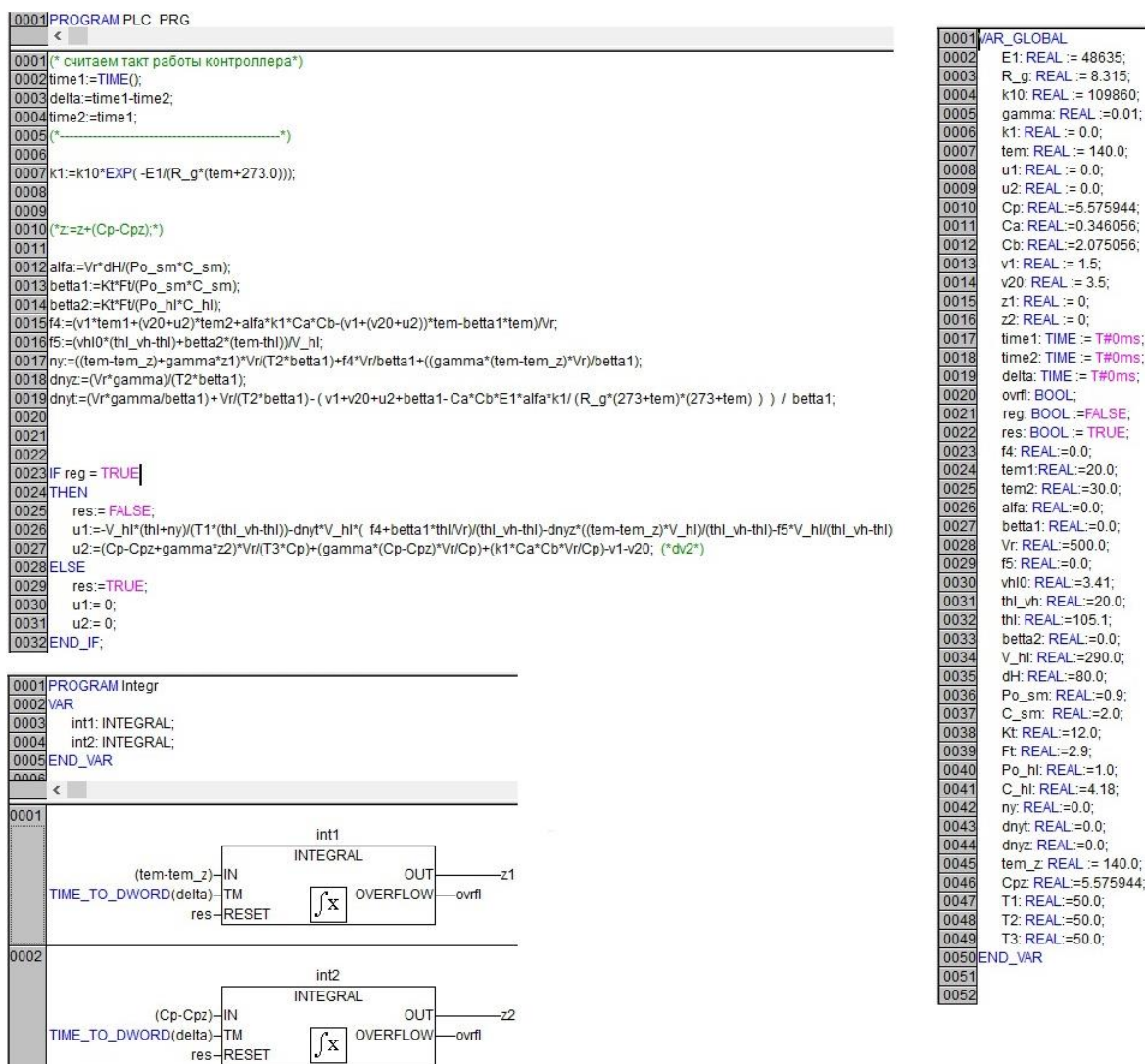


Рис. 3. Программы на языках ST и FBD, реализованные в среде CoDeSys  
 Fig. 3. Programs in ST and FBD languages implemented in the CoDeSys environment

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках работы проведено полунатурное моделирование системы управления химическим реактором с применением нелинейных астатических алгоритмов. Корректность реализации регуляторов на базе контроллера и их работоспособность определялась путем исследования свойств асимптотической устойчивости замкнутой САР, ее инвариантности к возмущающим факторам, ковариантности с уставками (заданиями регуляторам) и робастности. Отличительной особенностью полунатурного моделирования является то, что процесс происходит в режиме псевдо-реального времени, что дает возможность проводить контроль происходящих в системе процессов и оперативно оказывать воздействия как на Simulink-модель процесса, так и на алгоритм управления ПЛК, что дает существенные преимущества в плане отладки программного кода.

В результате полунатурного моделирования установлено, что замкнутая система управления объектом инвариантна к возмущениям, ковариантна с задающими воздействиями и асимптотически устойчива. Ресурсов контроллера ОВЕН ПЛК154 более чем достаточно для реализации САР со сложными алгоритмами расчета управляющих воздействий.

Таким образом, в работе показана принципиальная возможность реализации сложных нелинейных алгоритмов управления, синтезированных методом АКАР, на базе промышленного программируемого контроллера. Предложенная в работе методика может использоваться для проведения полунатурного моделирования систем автоматического управления и их отладки на этапе проектирования АСУТП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yuan P., Zhang B., Mao Z. A self-tuning control method for Wiener nonlinear systems and its application to process control problems. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2017. V. 25. N 2. P. 193-201. DOI: 10.1016/j.cjche.2016.07.003.
2. So G.B., Jin G.G. Fuzzy-based nonlinear PID controller and its application to CSTR. *Korean Journal of Chemical Engineering*. 2018. V. 35. N 4. P. 819-825. DOI: 10.1007/s11814-017-0329-1.
3. Alshammari O., Mahyuddin M.N., Jerbi H. A survey on control techniques of a benchmarked continuous stirred tank reactor. *Journal of Engineering Science and Technology*. 2018. V. 13. N 10. P. 3277-3296.
4. Li S., Gong M. Z., Liu Y. J. Neural network-based adaptive control for a class of chemical reactor systems with non-symmetric dead-zone. *Neurocomputing*. 2016. V. 174. P. 597-604. DOI: 10.1016/j.neucom.2015.09.072.

5. Yazdi M. B., Jahed-Motlagh M. R. Stabilization of a CSTR with two arbitrarily switching modes using modal state feedback linearization. *Chemical Engineering Journal*. 2009. V. 155. N 3. P. 838-843. DOI: 10.1016/j.cej.2009.09.008.

6. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. М.: Едиториал УРСС. 2005. 240 с.

7. Колесников А.А., Колесников Ал.А., Кузьменко А.А. Методы АКАР и АКОР в задачах синтеза нелинейных систем управления. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2016. Т. 17. № 10. С. 657–669

8. Labutin A.N., Vaško M., Kuric I., Nevinityn V.Y., Sága M., Zagarinskaya Y.N., Volkova G.V. Analytical Synthesis of Non-Linear Control Algorithms of a Chemical Reactor Thermal Mode. *Processes*. 2021. V. 9. N 4. 644. DOI: 10.3390/pr9040644.

9. Невиницын В.Ю., Загаринская Ю.Н., Волкова Г.В., Лабутин А.Н. Аналитический синтез нелинейных алгоритмов управления тепловым режимом химического реактора. *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*. 2019. № 50 (76). С. 115–120.

10. Невиницын В.Ю., Лабутин А.Н., Волкова Г.В., Зайцев В.А., Бодров А.А. Совершенствование алгоритмов управления химическими реакторами. *Известия высших учебных заведений. Серия: Экономика, финансы и управление производством*. 2019. № 4 (42). С. 158–164.

11. Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю., Зайцев В.А., Волкова Г.В. Робастное управление концентрацией целевого продукта в химическом реакторе. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2018. Т. 61. № 12. С. 129–136. DOI: 10.6060/ivkkt.20186112.5914.

12. Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю., Волкова Г.В., Зайцев В.А. Синергетический синтез эффективного комплекса «реактор – управляющая система». *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2018. № 4(56). С. 36–43.

REFERENCES

1. Yuan P., Zhang B., Mao Z. A self-tuning control method for Wiener nonlinear systems and its application to process control problems. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2017. V. 25. N 2. P. 193-201. DOI: 10.1016/j.cjche.2016.07.003.
2. So G.B., Jin G.G. Fuzzy-based nonlinear PID controller and its application to CSTR. *Korean Journal of Chemical Engineering*. 2018. V. 35. N 4. P. 819-825. DOI: 10.1007/s11814-017-0329-1.
3. Alshammari O., Mahyuddin M.N., Jerbi H. A survey on control techniques of a benchmarked continuous stirred tank reactor. *Journal of Engineering Science and Technology*. 2018. V. 13. N 10. P. 3277-3296.
4. Li S., Gong M. Z., Liu Y. J. Neural network-based adaptive control for a class of chemical reactor

systems with non-symmetric dead-zone. *Neurocomputing*. 2016. V. 174. P. 597-604. DOI: 10.1016/j.neucom.2015.09.072.

5. **Yazdi M. B., Jahed-Motlagh M. R.** Stabilization of a CSTR with two arbitrarily switching modes using modal state feedback linearization. *Chemical Engineering Journal*. 2009. V. 155. N 3. P. 838-843. DOI: 10.1016/j.cej.2009.09.008.

6. **Kolesnikov A.A.** Synergetic control methods of complex systems: the theory of system synthesis. M.: Editorial URSS. 2005. 240 p. (in Russian).

7. **Kolesnikov A.A., Kolesnikov A.A., Kuz'menko A.A.** The ADAR method and theory of optimal control in the problems of synthesis of nonlinear control systems. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2016. V. 17. N 10. P. 657-669 (in Russian).

8. **Labutin A.N., Vaško M., Kuric I., Nevinitsyn V.Y., Sága M., Zagarinskaya Y.N., Volkova G.V.** Analytical Synthesis of Non-Linear Control Algorithms of a Chemical Reactor Thermal Mode. *Processes*. 2021. V. 9. N 4. 644. DOI: 10.3390/pr9040644.

9. **Nevinitsyn V.Yu., Zagarinskaya Yu.N., Volkova G.V., Labutin A.N.** Analytical synthesis of non-linear control algorithms of a chemical reactor thermal mode. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta)*. 2019. N 50 (76). P. 115-120.

10. **Nevinitsyn V.Yu., Labutin A.N., Volkova G.V., Zaytsev V.A., Bodrov A.A.** The enhancement of chemical reactor control algorithms. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Ser. Ekon. Finansy Upravl. Proizvodstvom*. 2019. N 4 (42). P. 158-164 (in Russian).

11. **Labutin A.N., Nevinitsyn V.Yu., Zaytsev V.A., Volkova G.V.** Robust concentration control of target product in chemical reactor. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2018. V. 61. N 12. P. 129-136. DOI: 10.6060/ivkkt.20186112.5914 (in Russian).

12. **Labutin A.N., Nevinitsyn V.Yu., Volkova G.V., Zaytsev V.A.** Synergetic synthesis of effective complex «reactor – control system». *Modern high technologies. Regional application*. 2018. N 4(56). P. 36-43.