

УДК: 66.011:681.51

DOI: 10.30987/article_5c387d62698a75.92047422

А.Н. Лабутин, В.Ю. Невиницын, Г.В. Волкова, В.М. Сальков

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ЦЕЛЕВОГО ПРОДУКТА В ХИМИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ

В работе методом аналитического конструирования агрегированных регуляторов решена задача синтеза нелинейного алгоритма управления концентрацией целевого компонента в химическом реакторе при реализации сложной последовательно-параллельной экзотермической реакции. Проведено компьютерное моделирование замкнутой системы управления с применением полученного нелинейного алгоритма и показана эффективность предлагаемого метода.

Ключевые слова: аналитическое конструирование агрегированных регуляторов, синергетическая теория управления, химический реактор, система управления, компьютерное моделирование.

A.N. Labutin, V.Yu. Nevinitsyn, G.V. Volkova, V.M. Salkov

THE CONTROL ALGORITHM FOR CONCENTRATION OF THE TARGET PRODUCT IN THE CHEMICAL REACTOR

In this article, the method of analytical design of aggregated regulators solved the problem of synthesizing a nonlinear algorithm controlling the concentration of a target component in a chemical reactor during the implementation of a complex series-parallel exothermic reaction. A computer simulation of a closed-loop control system using the obtained nonlinear algorithm was carried out and the effectiveness of the proposed method was shown.

Keywords: analytical design of aggregated regulators, synergetic control theory, chemical reactor, control system, computer simulation.

Введение

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 [1–3].

Несмотря на значительное количество работ, связанных с автоматизацией и управлением химическими реакторами, 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 и, в частности, синергетической теории управления (метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов – АКАР), основные положения которой сформулированы в работе [4].

Использование идей синергетики в задачах управления предполагает разработку и реализацию способа направленной целевой самоорганизации диссипативных нелинейных систем «объект–регулятор». При этом цель движения системы формулируется в виде желаемого инвариантного многообразия в фазовом пространстве объекта, выполняющего роль целевого аттрактора [4].

В общем виде задача синергетического синтеза системы управления методом АКАР формулируется следующим образом: необходимо найти закон управления $u = (u_1, \dots, u_m)^T$ как функцию переменных состояния объекта $u_1(x_1, \dots, x_n), \dots, u_m(x_1, \dots, x_n)$, который переводит изображающую точку (ИТ) системы в фазовом пространстве из произвольного начального состояния в окрестность задаваемых инвариантных многообразий $\psi_S(x_1, \dots, x_n) = 0, S = 1, \dots, m$ и дальнейшее движение вдоль пересечения многообразий в некоторую стационарную точку или в некоторый динамический режим. В приведенных выражениях n – размерность вектора состояния, m – число внешних управлений. На траектории движения должен достигаться минимум критерия оптимальности системы (J) и гарантироваться ее устойчивость:

$$J = \int_0^{\infty} \left[\sum_{S=1}^m \left(T_S^2 \dot{\psi}_S^2 + \psi_S^2 \right) \right] d\tau. \quad (1)$$

Движение ИТ в фазовом пространстве подчиняется функциональному уравнению

$$T_S \dot{\psi}_S + \psi_S = 0, S = 1, \dots, m, \quad (2)$$

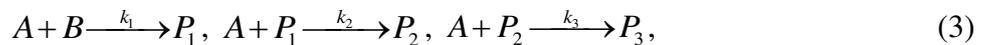
где T_S – постоянная времени. Это уравнение устойчивой экстремали, доставляющей минимум оптимизирующему функционалу (1). Условие асимптотической устойчивости системы в целом имеет вид $T_S > 0$.

Эффективность метода аналитического синтеза алгоритмов управления нелинейными объектами с использованием принципов синергетики (метод АКАР) показана в ряде работ [5-8].

В настоящей работе ставится задача аналитического синтеза эффективного алгоритма управления концентрацией целевого компонента в химическом реакторе при реализации сложной последовательно-параллельной реакции в условиях действия на объект возмущающих факторов.

1. Описание объекта и постановка задачи управления

Химический реактор представляет собой аппарат емкостного типа, снабженный механической мешалкой и теплообменной рубашкой (рис. 1). Аппарат функционирует в политропическом режиме. В реакторе реализуется многостадийная последовательно-параллельная экзотермическая реакция:



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 . Исходные реагенты A и B подаются в аппарат отдельными потоками.

На рис. 1 введены следующие обозначения: x_1^{BX}, x_2^{BX} – концентрации исходных реагентов; v_1, v_2 – расход исходных реагентов; x_6^{ex1}, x_6^{ex2} – температуры потоков исходных реагентов; x_7^{ex}, x_7 – температуры 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 – концентрации компонентов A, B, P_1, P_2, P_3 в реакторе; V – объем реакционной смеси в аппарате; V_{xl} – объем хладагента в рубашке.

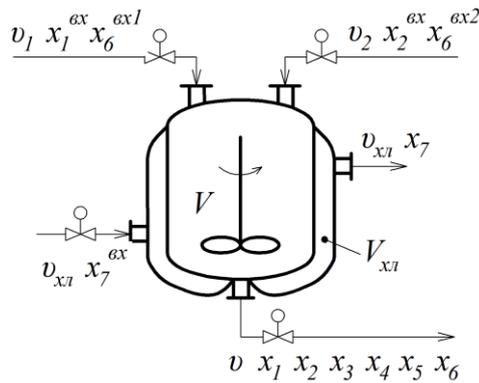


Рис. 1. Принципиальная схема химического реактора

Целью функционирования химического реактора является получение целевого компонента заданной концентрации. Отсюда следует, что задача системы управления реактором заключается в стабилизации концентрации целевого компонента на заданном значении в условиях действия возмущений, т.е. $x_4 = \bar{x}_4$, где \bar{x}_4 – заданное значение концентрации. В качестве управляющего воздействия для регулирования концентрации предлагается использовать поток исходного реагента v_2 на входе в аппарат.

Математическая модель химического реактора имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{d\tau} &= R_1 + M_A - b_2 x_1 - b_3 x_1 u, \\ \frac{dx_2}{d\tau} &= R_2 - b_2 x_2 + (M_B - b_3 x_2) u, \\ \frac{dx_3}{d\tau} &= R_3 - b_2 x_3 - b_3 x_3 u, \\ \frac{dx_4}{d\tau} &= R_4 - b_2 x_4 - b_3 x_4 u, \\ \frac{dx_5}{d\tau} &= R_5 - b_2 x_5 - b_3 x_5 u, \\ \frac{dx_6}{d\tau} &= \alpha_1 k_1 x_1 x_2 + \alpha_2 k_2 x_1 x_3 + \alpha_3 k_3 x_1 x_4 + b_2 x_6^{ex1} + \beta_1 x_7 - (\beta_1 + b_2) x_6 + (x_6^{ex2} - x_6) b_3 u, \\ \frac{dx_7}{d\tau} &= \beta_2 (x_6 - x_7) + b_1 (x_7^{ex} - x_7), \end{aligned} \quad (4)$$

где $R_1 = -k_1 x_1 x_2 - k_2 x_1 x_3 - k_3 x_1 x_4$, $R_2 = -k_1 x_1 x_2$, $R_3 = k_1 x_1 x_2 - k_2 x_1 x_3$, $R_4 = k_2 x_1 x_3 - k_3 x_1 x_4$, $R_5 = k_3 x_1 x_4$ – скорость реакции по компонентам; $M_A = v_1 x_1^{ex} / V$; $M_B = x_2^{ex} / V$; $b_1 = v_{xl} / V_{xl}$; $b_2 = v_1 / V$; $b_3 = 1 / V$; $\alpha_i = \Delta H_i / (\rho C)$, $i = 1, \dots, 3$; $\beta_1 = K_T F_T / (\rho C V)$; $\beta_2 = K_T F_T / (\rho_{xl} C_{xl} V_{xl})$; ΔH_i , $i = 1, \dots, 3$ – тепловой эффект соответствующей стадии реакции; ρ , C – плотность и теплоемкость реакционной смеси; ρ_{xl} , C_{xl} – плотность и теплоемкость хладагента; K_T – коэффициент теплопередачи; F_T – поверхность теплообмена; $k_i = k_{i0} \cdot \exp(-E_i / R(x_6 + 273))$, $i = 1, \dots, 3$ – 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; $u = v_2$ – регулирующее воздействие.

2. Синтез алгоритма управления методом АКАР

Согласно общепринятой методике синтеза алгоритмов управления многомерными объектами [9], на первом этапе осуществляется синтез закона управления в предположении, что измеряются (наблюдаются) все переменные состояния. На втором этапе, если это необходимо, синтезируется наблюдатель, позволяющий оценить вектор состояния по измеряемому выходу.

В работе [10] показано, что при выборе потока исходного реагента u_2 в качестве управляющего воздействия для регулирования концентрации x_4 объект является полностью управляемым в пространстве состояний. Для обеспечения полной наблюдаемости достаточно измерение только регулируемой переменной x_4 , остальные компоненты вектора состояния могут быть восстановлены путем построения наблюдателя (при отсутствии практической возможности измерения всего вектора состояния).

Поскольку управляющее воздействие непосредственно входит в уравнение для переменной x_4 системы (4), то процедура синергетического синтеза закона управления осуществляется за один этап.

Синергетическая постановка задачи: необходимо синтезировать закон управления $u(x)$, который переводит объект из произвольного начального состояния (x^0) в фазовом пространстве в окрестность сконструированного многообразия $\psi(x) = 0$, а затем обеспечивает его движение вдоль $\psi(x) = 0$ в заданное конечное состояние $x_4^* = \bar{x}_4$. Для поиска закона управления $u(x)$ введем в рассмотрение макропеременную, отражающую технологическое требование к системе:

$$\psi_1 = x_4 - \bar{x}_4. \quad (5)$$

Макропеременная ψ_1 удовлетворяет решению основного функционального уравнения метода АКАР $T_1\dot{\psi}_1 + \psi_1 = 0$, которое в развернутом виде с учетом выражения (5) в силу системы (4) примет вид:

$$T_1(R_4 - b_2x_4 - b_3x_4u) + x_4 - \bar{x}_4 = 0. \quad (6)$$

Из (6) получаем выражение для закона управления:

$$u = \frac{(x_4 - \bar{x}_4)}{T_1b_3x_4} + \frac{R_4}{b_3x_4} - \frac{b_2}{b_3}. \quad (7)$$

Выражение (7) определяет закон управления концентрацией целевого компонента. Настраечным параметром закона управления является постоянная времени T_1 . Условие асимптотической устойчивости системы в целом относительно введенного в фазовое пространство многообразия $\psi_1 = 0$ имеет вид: $T_1 > 0$. Выбор настроечного параметра T_1 осуществляется на основании требуемого времени перевода ИТ системы в окрестность инвариантного многообразия $\psi_1 = 0$, т.е. на основании заданного времени переходного процесса (регулирования) τ_p в соответствии с оценкой [4]:

$$\tau_p \approx (4 \div 5)T_1, \quad (8)$$

где T_1 – параметр основного функционального уравнения (2).

3. Компьютерное моделирование и результаты

Для проверки работоспособности синтезированного закона управления химическим реактором было проведено компьютерное моделирование замкнутой системы «объект–регулятор». Исследовано поведение замкнутой системы при возникновении отклонений координат состояния от статических значений, действию внешних и параметрических возмущений, изменении задающего воздействия по концентрации целевого компонента.

Моделирование проводилось при оптимальных технологических и конструктивных параметрах объекта, определенных ранее в работе [10]: $V = 500$ л; $V_{xl} = 290$ л; $x_1^{6x} = 19.74$ моль/л; $x_2^{6x} = 10.93$ моль/л; $v_1 = 1.5$ л/мин, $v_2 = 3.5$ л/мин, $v = 5.0$ л/мин, $v_{xl} = 3.84$ л/мин; $x_6^{6x1} = 20$ °С; $x_6^{6x2} = 30$ °С; $x_7^{6x} = 20$ °С; $K_T = 12$ кДж/(м² мин К); $F_T = 2.9$ м²; $\rho = 0.9$ кг/л; $C = 2$ кДж/(кг К); $\rho_{xl} = 1$ кг/л; $C_{xl} = 4.18$ кДж/(кг К); $\Delta H_1 = \Delta H_2 = \Delta H_3 = 80$ кДж/моль; $E_1 = 48635$ Дж/моль; $k_{10} = 109860$ л/(моль мин); соотношения констант скоростей последовательных стадий $k_2/k_1 = 2.0$, $k_3/k_1 = 2.5$. Параметры закона управления (6): значение постоянной времени $T_1 = 50$ мин; заданное значение концентрации целевого компонента $\bar{x}_4 = 0.652$ моль/л.

На рис. 2, 3 приведены примеры переходных процессов управления в замкнутой системе «химический реактор – алгоритм управления концентрацией» при начальном отклонении переменных состояния объекта от статики ($\Delta x_i = -0.2x_i^0$) и ступенчатом изменении задающего воздействия по концентрации целевого продукта ($\Delta x_4 = -0.1\bar{x}_4$). Допустимая погрешность регулирования концентрации целевого компонента в статике (точность в установившемся режиме) составляет ± 0.01 моль/л. Для наглядности движение системы (переходные процессы) до момента приложения входного воздействия ($\tau = 50$ мин) приводится в статическом режиме.

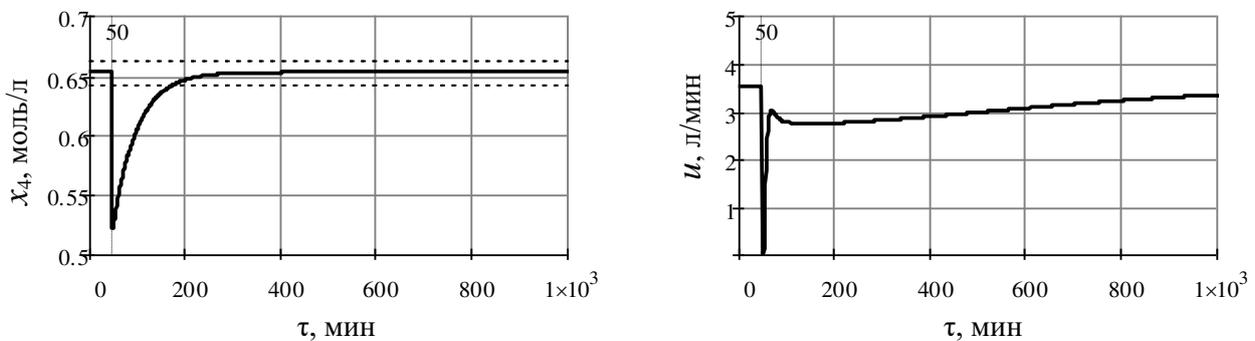


Рис. 2. Изменение регулируемой переменной и управляющего воздействия при начальном отклонении переменных состояния от статики

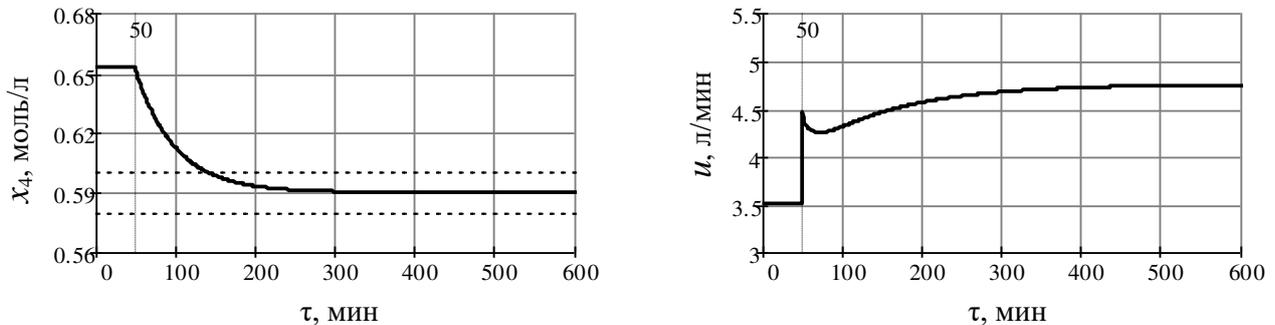


Рис. 3. Изменение регулируемой переменной и управляющего воздействия при ступенчатом изменении задающего воздействия по концентрации

Заключение

Таким образом, методами синергетической теории управления решена задача аналитического синтеза нелинейного закона управления, обеспечивающего стабилизацию концентрации целевого компонента в химическом реакторе в условиях действия на объект возмущений. Компьютерное моделирование показало инвариантность замкнутой системы управления к возмущениям, ковариантность с задающими воздействиями и асимптотическую устойчивость. Данные обстоятельства делают синергетическую теорию управления весьма перспективной применительно к таким сложным, многосвязным и нелинейным объектам, как химические реакторы.

Список литературы:

1. Кафаров В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. 4-е изд. перераб. и доп. М.: Химия, 1985. 448 с.
2. Лабутин А.Н., Исаенков А.Е., Волкова Г.В. Оптимальный синтез гибкой реакторной системы // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2010. № 12. С. 125-127.
3. 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. №1. С. 29-39.
4. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. М.: Энергоатомиздат. 1994. 344 с.
5. Labutin A.N., Nevinit syn V.Y. Analytical Synthesis of Chemical Reactor Control System // Theor. Found. Chem. Eng. 2014. Vol. 48. no. 3. p. 296-300. DOI: 10.1134/S0040579514030105.
6. Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю. Синтез нелинейного алгоритма управления химическим реактором с использованием синергетического подхода // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2017. № 2. С. 38-44.
7. Labutin A.N., Nevinit syn V.Y. Analytical Synthesis of Chemical Reactor Control System // International Journal of Advanced Studies. 2016. vol. 6. no. 1. p. 27-37. DOI: 10.12731/2227-930X-2016-1-27-37.
8. Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю., Деветьяров А.Н., Волкова Г.В. Синтез эффективного комплекса «реактор - управляющая система» с использованием синергетического подхода // Химическая промышленность. 2014. Т. XCI. № 2. С. 63-67.
9. Александров А.Г. Синтез регуляторов многомерных систем. М.: Машиностроение, 1986. 272 с.
10. Невиницын В.Ю., Лабутин А.Н., Волкова Г.В., Деветьяров А.Н. Системный анализ химического реактора как объекта управления // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2017. Т. 60. № 9. С. 92-99.

References:

1. Kafarov V.V. (1985). Methods of Cybernetics in Chemistry and Chemical Technology. Vol.4. Moscow: Chemistry. [in Russian language]
2. Labutin A.N., Isaenkov A.E., Volkova G.V. (2010). Optimal synthesis of a flexible reactor system. Izvestiya vuzov. Chemistry and Chemical technologies, (12), pp. 125-127. [in Russian language]
3. Dvoret sky D.S., Dvoret sky S.I., Ostrovsky G.M. (2008). Integrated design of energy- and resource-saving chemical-technological processes and control systems: strategy, methods and application. Theoretical bases of chemical technologies, (1), pp. 29-39. [in Russian language]
4. Kolesnikov A.A. (1994). Synergetic theory of management. Moscow: Energoatomizdat. [in Russian language]
5. Labutin A.N., Nevinit syn V.Y. (2014). Analytical Synthesis of the Chemical Reactor Control System. Theor. Found. Chem. Eng, Vol. 48, (3), pp. 296-300. DOI: 10.1134 / S0040579514030105. [in Russian language]
6. Labutin AN, Nevinit syn V.Yu. (2017). Synthesis of a nonlinear algorithm for controlling a chemical reactor using a synergetic approach. Izvestiya vuzov. Chemistry and Chemical technologies, (2), pp. 38-44. [in Russian language]
7. Labutin A.N., Nevinit syn V.Y. (2016). Analytical Synthesis of the Chemical Reactor Control System. International Journal of Advanced Studies, vol. 6,p, (1), pp. 27-37. DOI: 10.12731 / 2227-930X-2016-1-27-37. [in Russian language]
8. Labutin AN, Nevinit syn V.Yu., Devetyarov A.N., Volkova G.V. (2014). Synthesis of the effective «reactor-control system» complex using a synergetic approach. Chemical Industry, T. XCI, (2), pp. 63-67. [in Russian language]
9. Alexandrov A.G. (1986). Synthesis of regulators of multidimensional systems. Moscow: Mechanical Engineering. [in Russian language]
10. Nevinit syn V.Yu., Labutin A.N., Volkova G.V., Devetyarov A.N. (2017). A System Analysis of a Chemical Reactor as a Control Object. Izvestiya vuzov. Chemistry and Chemical technologies, Vol. 60, (9), pp. 92-99. [in Russian language]

*Статья поступила в редколлегию 10.09.18.
Рецензент: д.т.н., доцент Брянского
государственного технического университета
Петрешин Д.И.
Статья принята к публикации 12.12.18.*

Сведения об авторах:

Лабутин Александр Николаевич
доктор технических наук, профессор кафедры
«Техническая кибернетика и автоматика»
Ивановского государственного химико-
технологического университета.
Служебный адрес: 153000, г. Иваново,
Шереметевский проспект, 7.
Тел. рабочий: 8-4932-32-72-26.
Тел. моб.: 8-910-985-43-05.
E-mail: lan@isuct.ru

Невинцын Владимир Юрьевич
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Техническая кибернетика и автоматика»
Ивановского государственного химико-
технологического университета.
Служебный адрес: 153000, г. Иваново,
Шереметевский проспект, 7.
Тел. рабочий: 8-4932-32-72-26.
Тел. моб.: 8-915-837-94-53.
E-mail: nevinitsyn@gmail.com

Волкова Галина Витальевна
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Техническая кибернетика и автоматика»
Ивановского государственного химико-
технологического университета.
Служебный адрес: 153000, г. Иваново,
Шереметевский проспект, 7.
Тел. рабочий: 8-4932-32-72-26.
E-mail: konf_gv@mail.ru

Сальков Владислав Михайлович
магистрант кафедры «Техническая кибернетика и
автоматика» Ивановского государственного химико-
технологического университета.
Служебный адрес: 153000, г. Иваново,
Шереметевский проспект, 7.
Тел. рабочий: 8-4932-32-72-26.
E-mail: vladik_salkov@icloud.com

Information about authors:

Labutin Alexander Nikolaevich
doctor of Engineering Sciences, Professor of the
Department of «Technical Cybernetics and Automation»
of the Ivanovo State University of Chemistry and
Technology.
Office address: 153000, Ivanovo, Sheremetevsky Avenue,
7.
Tel. working: 8-4932-32-72-26.
Tel. mob.: 8-910-985-43-05.
E-mail: lan@isuct.ru

Nevinitsyn Vladimir Yurievich
Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of
the Department of «Technical Cybernetics and
Automation» of the Ivanovo State University of
Chemistry and Technology. Office address: 153000,
Ivanovo, Sheremetevsky Avenue, 7.
Tel. working: 8-4932-32-72-26.
Tel. mob.: 8-915-837-94-53.
E-mail: nevinitsyn@gmail.com

Volkova Galina Vitalievna
Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of
the Department of «Technical Cybernetics and
Automation» of the Ivanovo State University of
Chemistry and Technology.
Office address: 153000, Ivanovo, Sheremetevsky Avenue,
7.
Tel. working: 8-4932-32-72-26.
E-mail: konf_gv@mail.ru

Salkov Vladislav Mikhailovich
master student of the department «Technical Cybernetics
and Automation» of the Ivanovo State University of
Chemistry and Technology.
Office address: 153000, Ivanovo, Sheremetevsky Avenue,
7.
Tel. working: 8-4932-32-72-26.
E-mail: vladik_salkov@icloud.com