

МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОСВЯЗНОЙ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СИНТЕЗА АММИАКА

В. С. Кудряшов, С. Г. Тихомиров, С. В. Рязанцев,
А. В. Иванов, И. А. Козенко

*Кафедра «Информационные и управляющие системы»,
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных
технологий», г. Воронеж, Россия; kudryashovvs@mail.ru*

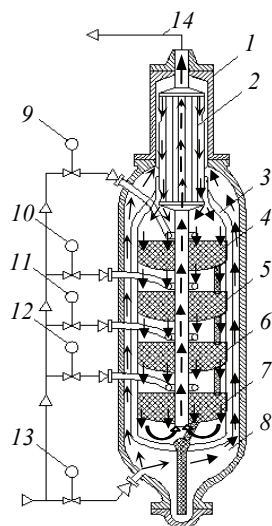
Ключевые слова: автономность; инвариантность; компенсатор; многомерность; цифровая многосвязная система управления.

Аннотация: Предложен метод расчета значений выходов автономных и инвариантных компенсаторов, эквивалентных объектов и многосвязных автономно-инвариантных цифровых систем управления, который позволяет осуществить синтез управляющей части и моделирование автономно-инвариантных цифровых систем регулирования. Путем моделирования многосвязной автономно-инвариантной цифровой системы синтеза аммиака доказана состоятельность и эффективность предложенного метода.

Во многих случаях объекты химической технологии представляют собой многомерную динамическую систему. Характерными примерами многомерных связанных объектов могут служить: технологические процессы разделения многокомпонентных смесей (ректификации, выпаривания, перегонки), процессы сушки различных веществ, реакционные процессы. Особенностями процесса каталитического синтеза аммиака [3] (рис. 1) является внутренняя нелинейная взаимосвязь между параметрами, наличие значительного числа возмущений и нестационарное поведение, обусловленное изменением активности катализатора с течением времени.

В локальных системах регулирования перечисленные особенности учитываются частично и, как следствие, не достигается требуемое качество управления – максимальное содержание аммиака на выходе реактора.

Повышение качества управления объектами с сильными внутренними связями при наличии возмущений возможно путем синтеза многосвязной системы на основе принципов автономно-инвариантного управления. Одним из важнейших этапов при этом является определение структуры взаимосвязей параметров и разработка модели объекта.



**Рис. 1. Четырехполочный реактор
синтеза аммиака мощностью 1360 т/сут.:**

1 – корпус колонны; 2 – внутренний теплообменник; 3 – корпус катализаторной коробки; 4–7 – I–IV катализаторные слои соответственно; 8 – пространство между корпусом колонны и катализаторной коробки; 9–12 – клапаны подачи холодного газа на полки колонны; 13 – основной клапан подачи смеси по основному ходу колонны; 14 – выход колонны (смесь газообразного аммиака, водорода и азота)

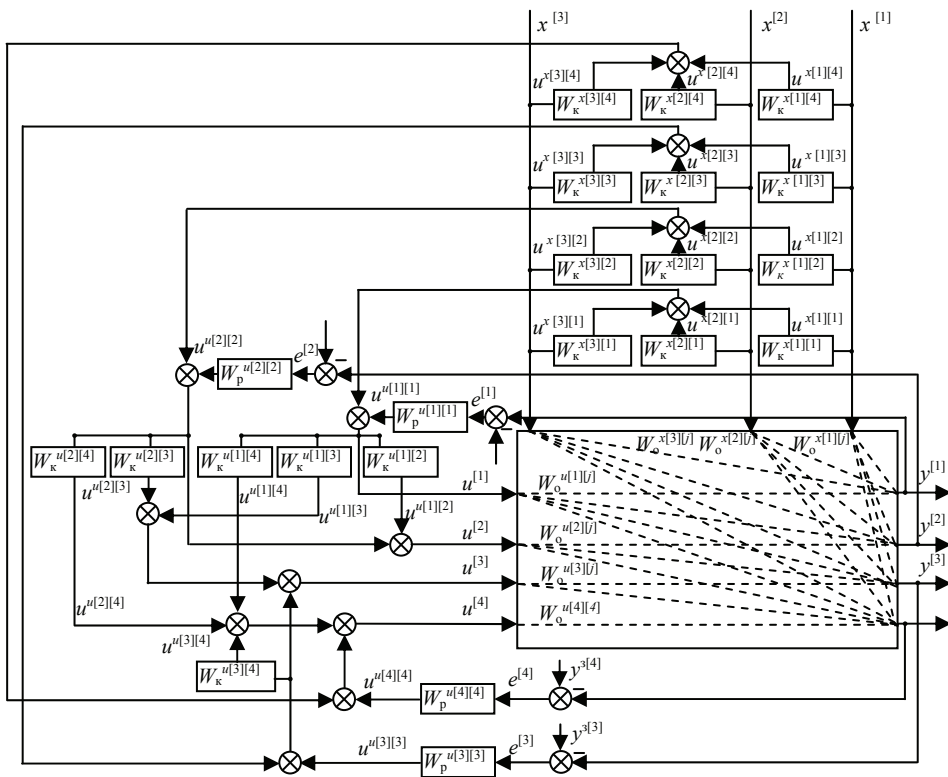


Рис. 2. Структурная схема многосвязной

автономно-инвариантной цифровой системы управления:

$W_o^{u[i][l]}$, $W_o^{x[i][l]}$ – передаточные функции объекта по каналам управления и возмущения соответственно; $W_k^{u[i][j]}$, $W_k^{x[i][j]}$ – передаточные функции компенсаторов перекрестных связей ($i \neq j$) и компенсаторов возмущений соответственно; $W_p^{u[i][i]}$ – передаточные функции регуляторов; $y^{[i]}$ – суммарный измеряемый выход объекта управления; $u^{[i][i]}$ – выход i -го основного регулятора; $u^{u[i][j]}$, $u^{x[i][j]}$ – выходы компенсатора перекрестной связи ($i \neq j$) и компенсатора возмущения соответственно; $x^{[i]}$ – i -е возмущающее воздействие; $w = 3$ – количество возмущающих воздействий; $y^{[3]}$ – задающее воздействие; $e^{[i]}$ – сигнал рассогласования; $u^{[i]}$ – суммарное управляющее воздействие; $i, j = 1, r$; $r = 4$ – размерность системы управления

Задачей управления процессом синтеза аммиака является поддержание температуры реакции в слоях катализатора при учете перекрестных связей и возмущений (концентрации инертного газа, аммиака и соотношения азот/водород на входе в реактор). Высокое качество управление такими объектами обеспечивается многосвязными системами, в частности автономно-инвариантными (рис. 2), учитывающими влияние перекрестных связей и внешних воздействий (полезных сигналов и возмущений).

Синтез и моделирование автономно-инвариантных цифровых систем управления (АВИИЦСУ) связан с расчетом автономных и инвариантных компенсаторов, а также эквивалентных объектов [1, 6], и требует выполнения следующих этапов.

1. Расчет структуры передаточных функций (ПФ) компенсаторов перекрестных связей из условия автономности

$$W_k^{u-авт} = \left(W_o^{u-авт} \right)^{-1} W_o^{uu-авт}, \quad (1)$$

где $W_{\kappa}^{u-авт}$ – вектор дискретных ПФ автономных компенсаторов; $W_0^{u-авт}$ – блочная матрица, формируемая из дискретных ПФ основных и перекрестных каналов объекта; $W_0^{uu-авт}$ – вектор, формируемый из дискретных ПФ перекрестных каналов объекта.

Из (1) следует [4], что дискретная ПФ автономного компенсатора в общем случае может быть описана дробно-рациональным выражением

$$W_{\kappa}^{u[i][j]}(z) = \frac{\sum_{\alpha, \beta=1}^{(r(r-1))!} \left(\prod_{\alpha, \beta=1}^{(r(r-1))} W_0^{u[\alpha][\beta]}(z) \right)}{\sum_{\alpha', \beta'=1}^{(r(r-1))!} \left(\prod_{\alpha', \beta'=1}^{(r(r-1))} W_0^{u[\alpha'][\beta']}(z) \right)}, \quad (2)$$

где $W_0^{u[\alpha][\beta]}(z)$, $W_0^{u[\alpha'][\beta']}(z)$ – ПФ каналов объекта; α, β – номера слагаемого и сомножителя в числителе соответственно; α', β' – номера слагаемого и сомножителя в знаменателе соответственно; z – оператор сдвига; $i, j = \overline{1, r}$, $i \neq j$.

2. Получение полиномов числителя и знаменателя ПФ компенсаторов на основе аналитических преобразований.

3. Переход от ПФ к конечно-разностным уравнениям.

Аналогично осуществляется расчет ПФ эквивалентных объектов управления и инвариантных компенсаторов [5]:

$$W_0^{u экв[j][j]}(z) = W_{\kappa}^{u[i][j]}(z) + \sum_{l=1, l \neq j}^r \left(W_0^{u[l][j]}(z) W_{\kappa}^{u[j][l]}(z) \right); \quad (3)$$

$$W_{\kappa}^{x[i][j]}(z) = \frac{-W_0^{x[i][j]}(z)}{W_0^{u[i][j]}(z) + \sum_{l=1, l \neq j}^r \left(W_0^{u[l][j]}(z) W_{\kappa}^{u[j][l]}(z) \right)}, \quad j = \overline{1, r}, \quad (4)$$

где $W_0^{u экв[j][j]}(z)$, $W_{\kappa}^{f[i][j]}(z)$ – ПФ эквивалентного объекта управления и инвариантного компенсатора соответственно.

Анализ зависимостей (1) – (4) расчета автономного и инвариантного компенсаторов, эквивалентного объекта показывает однотипность решаемых задач, связанных с аналитическими преобразованиями.

Таким образом, необходима разработка способа машинного моделирования АвИнЦСУ на основе универсальной методики автоматизированного расчета численного значения выхода динамического звена. При этом предложен способ синтеза структуры ПФ автономного компенсатора на основе обращения символьной матрицы [4].

Особенностью предложенного алгоритма [2] расчета выхода динамического звена с ПФ, имеющей дробно-рациональную структуру (2), является декомпозиция, то есть в представлении звена (2) в виде последовательного соединения звеньев с ПФ числителя и ПФ знаменателя (рис. 3).

Расчет численного значения выхода сводится к последовательному расчету соединения звеньев $W'(z)$ и $1/W''(z)$. Расчет выхода f заключается в последовательном расчете элементов цепочек и суммировании их выходов (рис. 4).

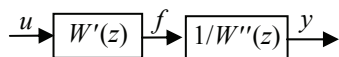
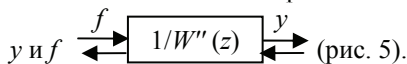


Рис. 3. Схема звена с ПФ (2):
 u – вход компенсатора; f – выход звена с ПФ $W'(z)$; y – выход компенсатора

Для расчета выхода y по предложенной схеме изменим направление сигналов y и f (рис. 5).



В работе [2] получена формула расчета входа u на основании выхода f :

$$y_i = \left(\sum_{c=1}^{\rho} f_i^{c,N} - \sum_{c=1}^{\rho} \left(\sum_{j=N}^2 \left(\sum_{t=1}^{n^{c,j}} a_t^{c,j} f_{i-t}^{c,j} + \sum_{t=1}^{k^{c,j}} b_t^{c,j} f_{i-t}^{c,j-1} \right) \prod_{q=N}^{j+1} b_1^{c,q} \right) + \right. \\ \left. + \left(\sum_{t=1}^{n^{c,1}} a_t^{c,1} f_{i-t}^{c,1} + \sum_{t=2}^{k^{c,1}} b_t^{c,1} f_{i-t+1}^{c,1} \right) \prod_{q=N}^2 b_1^{c,q} \right) / \sum_{c=1}^{\rho} \left(\prod_{q=N}^2 b_1^{c,q} \right); \quad (5)$$

$$\sum_{c=1}^{\rho} f_i^{c,N} = f_i - \sum_{s=1}^l f_i^{s,N}, \quad (6)$$

где ρ – число цепочек, суммарное запаздывание которых неравно нулю; $a_t^{c,j}$, $b_t^{c,j}$ – параметры моделей каналов объекта; $\sum_{c=1}^{\rho} f_i^{c,N}$ – суммарный выход цепочек без запаздывания.

Таким образом, алгоритм расчета численного значения выхода звена, описываемого дискретной ПФ (2), можно представить схемой (рис. 6).

При расчете управляющей части автономной многосвязной системы необходима оптимизация основных регуляторов, синтез которых невозможен без расчета эквивалентных объектов. Расчет численного значения выхода $u_{э\text{кв}}^{[j][j]}$ осуществляется путем последовательного расчета выходов всех r цепочек и их суммированием.

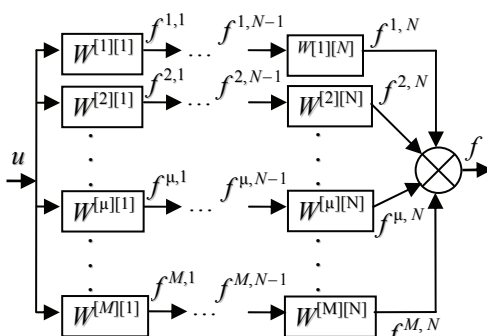


Рис. 4. Структура схема декомпозиции числителя ПФ компенсатора (2):
 $W^{[M][N]}$ – ПФ каналов объекта;
 M, N – число цепочек соединения и элементов в каждой из них соответственно

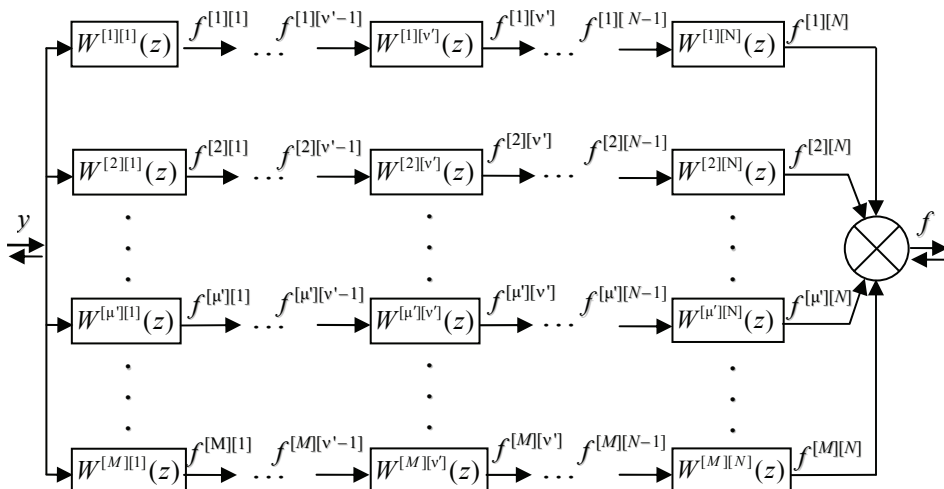


Рис. 5. Структура схема декомпозиции числителя ПФ компенсатора (2):
 $W^{[M][N']}$ – ПФ каналов объекта; M', N' – число цепочек соединения и элементов в каждой из них соответственно



Рис. 6. Схема алгоритма расчета численного значения выхода звена с ПФ (2)

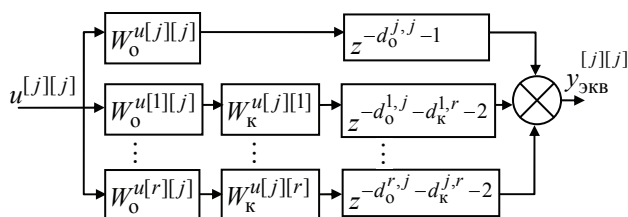


Рис. 7. Структурная схема ПФ эквивалентного объекта (3):
 $u^{[j][j]}$, $y_{ЭКВ}^{[j][j]}$ – выходы регулятора и эквивалентного объекта соответственно

При этом явный вид ПФ автономных компенсаторов, входящих в цепочки не используется, расчет ведется по схеме (см. рис. 3). Подобная организация звена с ПФ в виде дробно-рационального выражения и предложенный алгоритм позволяют рассчитать выход любого эквивалентного объекта с ПФ (3), и на его основе осуществить настройку основных регуляторов одним из известных методов оптимизации [5]. Помимо этого разработанный алгоритм может использоваться для адаптации основных регуляторов в системах управления, так как обеспечивает достаточное быстродействие по сравнению с алгоритмами, требующими получения результирующей ПФ эквивалентного объекта (рис. 7).

На базе математического и алгоритмического обеспечения разработано программное обеспечение (ПО) расчета и моделирования автономных цифровых систем управления (АвЦСУ) и АвИнЦСУ процессом синтеза аммиака.

Для описания каналов объекта (расход холодного газа на полки колонны – температура в соответствующих слоях катализатора) использовались дискретные модели второго порядка с запаздыванием [3]:

$$W_0^{u[i][j]}(z) = \frac{y^{u[i][j]}(z)}{u^{[i]}(z)} = \frac{b_0^{u[i][j]} z^{-1} - d_0^{u[i][j]}}{1 - a_1^{u[i][j]} z^{-1} - a_2^{u[i][j]} z^{-2}},$$

где $a_k^{u[i][j]}$, $b_0^{u[i][j]}$ – параметры дискретных моделей каналов объекта; $d_0^{u[i][j]}$ – число тактов запаздывания; $k = 1, 2$.

В качестве регуляторов по основным каналам приняты цифровые регуляторы второго порядка:

$$W_p^{u[j][j]}(z) = \frac{u^{u[j][j]}(z)}{e^{[j]}(z)} = \frac{q_0^{u[j][j]} + q_1^{u[j][j]}z^{-1} + q_2^{u[j][j]}z^{-2}}{1 - z^{-1}},$$

где $q_m^{u[j][j]}$ – настроечные параметры цифрового регулятора; $m = 0, 2$.

Проведена оптимизация настроек регуляторов градиентным методом по критерию минимума интегрально-квадратичной ошибки по ПФ эквивалентных объектов, и осуществлено моделирование АвЦСУ при подаче задания на первый канал.

Анализ динамических характеристик (рис. 8) доказывает эффективность предложенного метода, что подтверждается выполнением принципа автономности в полной мере (реализована полная компенсация влияния перекрестных связей на температуру во втором, третьем и четвертом слоях катализатора).

Динамические характеристики многосвязной АвИЦСУ представлены на рис. 9.

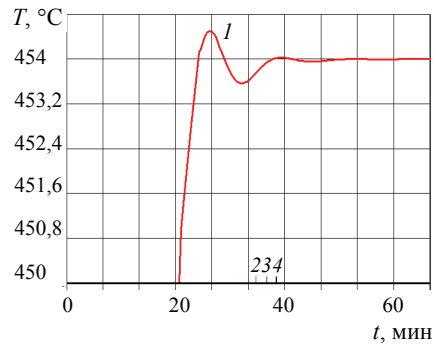


Рис. 8. Динамические характеристики процесса синтеза аммиака (по заданию только на первый канал):
1 – 4 – температура реакции T в соответствующих слоях катализатора

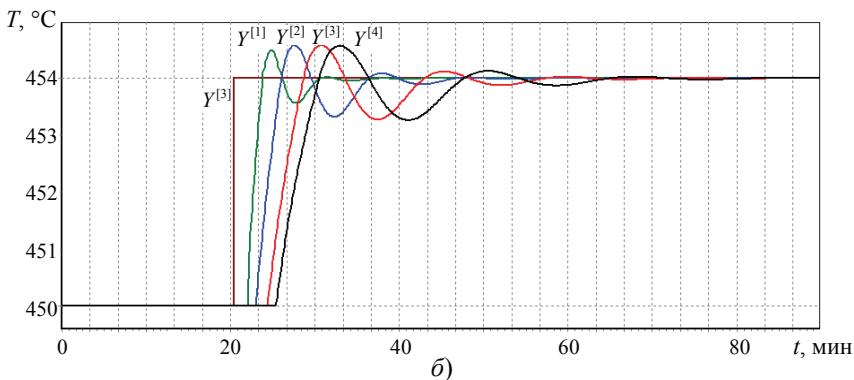
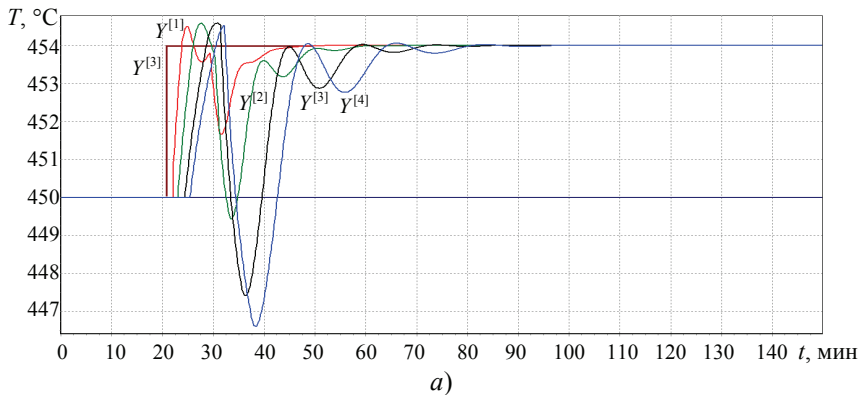


Рис. 9. Динамические характеристики АвИЦСУ синтеза аммиака при изменении заданий по температурам на всех слоях катализатора в условиях возмущений:
а – без инвариантных компенсаторов; б – с инвариантными компенсаторами возмущений;
 $y^{[1]} - y^{[4]}$ – значения температуры в каждом слое

Таблица 1

**Сравнительные показатели качества управления АвИнЦСУ
с компенсаторами возмущений и без них**

Условие	Суммарный выход	Интегрально-квадратичная ошибка	Время регулирования, мин	Перерегулирование, °С	Коэффициент затухания, %	Статистическая ошибка, °С
С инвариантными компенсаторами	$y^{[1]}$	125,317	26,33	0,496	10,27	0
	$y^{[2]}$	134,448	44	0,58	11,30	$7,2 \cdot 10^{-6}$
	$y^{[3]}$	145,07	51,33	0,58	10,13	$8,2 \cdot 10^{-4}$
	$y^{[4]}$	152,63	61,5	0,572	9,79	$0,1 \cdot 10^{-3}$
Без инвариантных компенсаторов	$y^{[1]}$	168,34	60	0,91	15,4	$2,2 \cdot 10^{-3}$
	$y^{[2]}$	601,40	117,5	1,56	12,98	$1,4 \cdot 10^{-2}$
	$y^{[3]}$	966,46	103,3	13,88	100	0,12
	$y^{[4]}$	1510,50	114	17,48	100	0,88

Наличие внешних возмущений может привести к значительному ухудшению показателей качества при использовании автономной системы, что подтверждается результатами моделирования (см. рис. 9, б).

Результаты машинного моделирования (см. рис. 9), а также расчетные значения показателей качества (табл. 1) позволяют сделать следующие выводы: совпадение графиков АвИнЦСУ при наличии возмущений и АвЦСУ без возмущающих факторов говорит о реализации принципа инвариантного управления.

Таким образом, предложенный метод и разработанный алгоритм позволяют моделировать многосвязные АвИнЦСУ путем расчета отдельных элементов системы (автономных и инвариантных компенсаторов, эквивалентных объектов) без получения их ПФ в явном виде, что значительно повышает эффективность синтеза таких систем за счет снижения временных затрат на аналитический вывод ПФ компенсаторов и эквивалентных объектов путем автоматизации вычислительных процедур.

Список литературы

1. Кудряшов, В. С. Алгоритм синтеза адаптивного многосвязного цифрового управления / В. С. Кудряшов, С. В. Рязанцев // Автоматизация технол. процессов: управление, моделирование, контроль, диагностика. Прил. к журн. «Мехатроника, автоматизация, управление». – 2006. – № 7. – С. 2 – 7.
2. Кудряшов, В. С. Алгоритм расчета выходов автономных компенсаторов многосвязной цифровой системы управления / В. С. Кудряшов, С. В. Рязанцев, И. А. Козенко // Вестн. ВГТА. Сер. Информ. технологии, моделирование и управление. – 2010. – № 2. – С. 21 – 26.
3. Кудряшов, В. С. Моделирование и синтез цифровой многосвязной системы управления процессом получения аммиака / В. С. Кудряшов, С. В. Рязанцев, А. В. Иванов. – Воронеж : ВГТА, 2011. – 172 с.
4. Способ автоматизированного синтеза структуры передаточных функций автономных компенсаторов многосвязной цифровой системы управления / В. С. Кудряшов [и др.] // Вестн. ВГТА. Сер. Информ. технологии, моделирование и управление. – 2011. – № 2. – С. 16 – 20.

5. Рязанцев, С. В. Разработка алгоритмов синтеза адаптивной цифровой системы управления многомерными объектами в условиях нестационарности : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.01 : защищена 24.12.2003 : утв. 04.04.2004 / Рязанцев Сергей Васильевич. – Воронеж, 2003. – 180 с.

6. Кудряшов, В.С. Синтез цифровых компенсаторов возмущений много-связных систем управления с использованием принципа инвариантности / В. С. Кудряшов, Н. Р. Бобровников, С. В. Рязанцев // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2004. – № 6. – С. 4 – 6.

A Method of Simulation of a Multilift Digital System of Controlling the Process of Ammonia Synthesis

V. S. Kudryashov, S. G. Tikhomirov, S. V. Ryazantsev,
A. V. Ivanov, I. A. Kozenko

*Department of Information and Control Systems,
Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russia;
kudryashovvs@mail.ru*

Keywords: autonomy; digital multiply connected control system; compensator; invariance; multidimensionality.

Abstract: A method for calculating the values of the outputs of autonomous and invariant compensators, equivalent objects, and multiply connected autonomous invariant digital control systems is proposed. The method makes it possible to synthesize the control part and simulate autonomous invariant digital control systems. By modeling a multiply connected autonomous invariant digital ammonia synthesis system, the consistency and effectiveness of the proposed method has been verified.

References

1. Kudryashov V.S., Ryazantsev S.V. [Algorithm for synthesis of adaptive multiply connected digital control], *Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov: upravlenie, modelirovanie, kontrol', diagnostika. Prilozhenie k zhurnalu "Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie"* [Automation of technological processes: management, modeling, control, diagnostics. Supplement to the journal "Mechatronics, automation, control"], 2006, no. 7, pp. 2-7. (In Russ.)

2. Kudryashov V.S., Ryazantsev S.V., Kozenko I.A. [Algorithm for calculating the outputs of the autonomous compensators of a multiply connected digital control system], *Vestnik VGTA. Seriya: informatsionnye tekhnologii, modelirovanie i upravlenie* [Bulletin of the VSTA. Series Inform. technology, modeling and management], 2010, no. 2, pp. 21-26. (In Russ.)

3. Kudryashov V.S., Ryazantsev S.V., Ivanov A.V. *Modelirovanie i sintez tsifrovoy mnogosvyaznoi sistemy upravleniya protsessom polucheniya ammiaka* [Modeling and synthesis of a digital multiply connected control system for the ammonia production process], Voronezh, VGTA, 2011, 172 p. (In Russ.)

4. Kudryashov V.S., Ryazantsev S.V., Ivanov A.V., Kozenko I.A. [A method for the automated synthesis of the structure of the transfer functions of autonomous compensators of a multiply connected digital control system], *Vestnik VGTA. Seriya: informatsionnye tekhnologii, modelirovanie i upravlenie* [Bulletin of the VSTA. Series Inform. technology, modeling and management], 2011, no. 2, pp. 16-20. (In Russ.)

5. Ryazantsev, S.V. *PhD Disertation (Engineering)*, Voronezh, 2003, 180 p. (In Russ.)

6. Kudryashov V.S., Bobrovnikov N.R., Ryazantsev S.V. [Synthesis of digital compensators of disturbances of multiply connected control systems using the invariance principle], *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Devices and systems. Management, control, diagnostics], 2004, no. 6, pp. 4-6. (In Russ.)

Methode der Modellierung des mehrfach verbundenen Digitalsystems der Prozesssteuerung der Ammoniaksynthese

Zusammenfassung: In der Arbeit ist eine Methode der Berechnung der Ausgangswerte der autonomen und invarianten Kompensatoren, der äquivalenten Objekte und mehrfach verbundenen autonomen invarianten digitalen Steuersysteme vorgeschlagen. Das Verfahren ermöglicht es, den Steuerteil zu synthetisieren und autonome invariante digitale Steuersysteme zu modellieren. Durch Modellierung eines mehrfach vernetzten autonomen invarianten digitalen Ammoniaksynthesystems ist die Lebensfähigkeit und Wirksamkeit der vorgeschlagenen Methode nachgewiesen.

La méthode de la simulation d'un système numérique à multiples connexions de la commande du processus de la synthèse de l'ammoniac

Résumé: Est proposée une méthode de calcul des valeurs des sorties des compensateurs l'autonomes et invariables des systèmes numériques de la commande. La méthode permet d'effectuer la synthèse de l'unité de commande et la simulation de la partie de la commande des systèmes numériques de réglementation. Grâce à la modélisation d'un système numérique à multiples connexions de la commande du processus de la synthèse de l'ammoniac est prouvée la viabilité et l'efficacité de la méthode proposée.

Авторы: *Кудряшов Владимир Сергеевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные и управляющие системы»; *Тихомиров Сергей Германович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные и управляющие системы»; *Рязанцев Сергей Васильевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные и управляющие системы»; *Иванов Андрей Валентинович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные и управляющие системы»; *Козенко Иван Александрович* – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Информационные и управляющие системы», ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», г. Воронеж, Россия.

Рецензент: *Хвостов Анатолий Анатольевич* – доктор технических наук, профессор кафедры математики, ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», г. Воронеж, Россия.
