

МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ И РЕАЛИЗАЦИИ МНОГОСВЯЗНЫХ АВТОНОМНО-ИНВАРИАНТНЫХ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

В.С. Кудряшов, С.В. Рязанцев, И.А. Козенко

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

Представлена членом редколлегии профессором Д.Ю. Муромцевым

Ключевые слова и фразы: автономный и инвариантный компенсаторы; многомерность; цифровая многосвязная система управления; эквивалентный объект.

Аннотация: Предлагается метод машинного расчета выходов автономных, инвариантных компенсаторов, эквивалентных объектов и многосвязных автономно-инвариантных цифровых систем управления в целом, обеспечивающий высокую точность вычислений, адаптацию компенсаторов и регуляторов. Метод включает синтез структуры компенсаторов перекрестных связей на основе реализации векторно-матричных преобразований в символьном виде. Представлены результаты расчета и моделирования многосвязной цифровой системы управления для получения аммиака.

Постановка задачи. Во многих случаях объект управления представляет собой сложную динамическую систему. Эта сложность определяется высоким порядком его дифференциальных уравнений и наличием сложных нелинейных связей между отдельными координатами.

Характерными примерами многомерных связанных объектов могут служить: технологические процессы разделения многокомпонентных смесей (ректификации, выпаривания, перегонки), процессы сушки различных веществ, реакционные процессы.

Примером четырехмерного связанного объекта управления является процесс получения аммиака, протекающий в четырехслойном полочном реакторе в присутствии катализатора с промежуточным охлаждением между слоями (рис. 1) [4].

Внутренняя структура многомерных объектов оказывает существенное влияние на проектирование и реализацию систем управления.

Высокое качество управление такими объектами обеспечивается многосвязными системами, в частности автономно-инвариантными (рис. 2), учитывающими влияние перекрестных связей и внешних воздействий (полезных сигналов и помех).

Моделирование автономно-инвариантных цифровых систем управления (АВИИЦСУ), имеющих достаточно сложную структуру, связано с расчетом автономных и инвариантных компенсаторов, а также эквивалентных объектов.

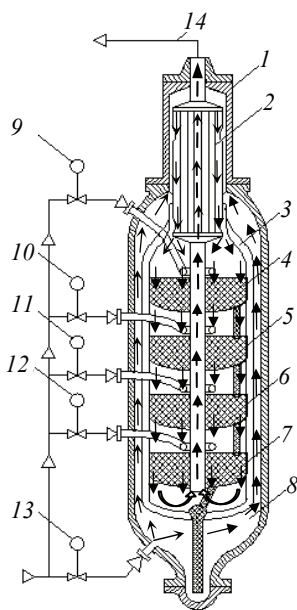


Рис. 1. Четырехслойный полочный реактор синтеза аммиака мощностью 1360 т/сут.: 1 – корпус колонны; 2 – внутренний теплообменник; 3 – корпус каталитической коробки; 4–7 – I–IV каталитические слои соответственно; 8 – пространство между корпусом колонны и каталитической коробки; 9–12 – клапаны подачи холодного газа на полки колонны; 13 – основной клапан подачи смеси по основному ходу колонны; 14 – выход колонны (смесь газообразного аммиака, водорода и азота)

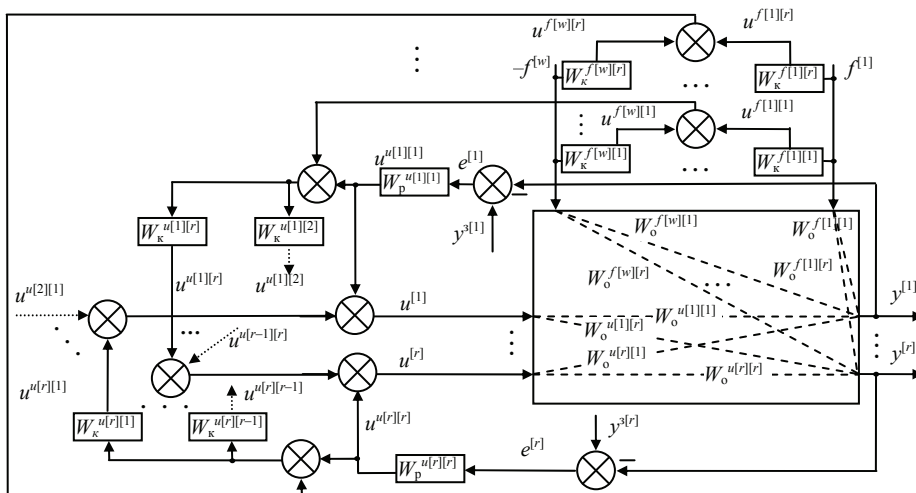


Рис. 2. Структурная схема многосвязной автономно-инвариантной цифровой системы управления: $W_o^{u[i][j]}$, $W_o^{f[i][j]}$ – передаточные функции объекта по каналам управления и возмущения соответственно; $W_k^{u[i][j]}$, $W_k^{f[i][j]}$ – передаточные функции компенсаторов перекрестных связей ($i \neq j$) и компенсаторов возмущений соответственно; $W_p^{u[i][i]}$ – передаточные функции регуляторов; $y^{[i]}$ – суммарный выход объекта управления; $u^{u[i][i]}$ – выход i -го основного регулятора; $u^{u[i][j]}$, $u^{f[i][j]}$ – выход компенсатора перекрестной связи ($i \neq j$) и компенсатора возмущения соответственно; $f^{[i]}$ – i -е возмущающее воздействие; w – количество возмущающих воздействий; $y^{3[i]}$ – задающее воздействие; $e^{[i]}$ – сигнал рассогласования; $u^{[i]}$ – суммарное управляющее воздействие; $i, j = \overline{1, r}$; r – размерность системы управления

Синтез и моделирование автономного компенсатора требует выполнения следующих этапов [1, 2].

1. Расчет структуры передаточных функций (**ПФ**) компенсаторов на основе векторно-матричного выражения (1) путем обращения и перемножения матриц в символьном виде

$$W_k^{u-авт} = (W_0^{u-авт})^{-1} W_0^{uu-авт}, \quad (1)$$

где $W_k^{u-авт}$ – блочный вектор, элементами которого являются векторы дискретных ПФ автономных компенсаторов; $W_0^{u-авт}$ – блочная матрица, элементами которой являются матрицы дискретных ПФ основных и перекрестных каналов объекта; $W_0^{uu-авт}$ – блочный вектор, элементами которого являются векторы дискретных ПФ перекрестных каналов объекта.

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

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

где $W_0^{u[\alpha^{\mu,v}][\beta^{\mu,v}]}(z)$, $W_0^{u[\lambda^{\mu',v'}][\gamma^{\mu',v'}]}(z)$ – ПФ каналов объекта; $\alpha^{\mu,v}$, $\beta^{\mu,v}$, $\lambda^{\mu',v'}$, $\gamma^{\mu',v'}$ – индексы, принимающие натуральные значения из диапазона $\overline{1, r}$; μ, v – номер слагаемого и номер сомножителя в числителе; μ', v' – номер слагаемого и номер сомножителя в знаменателе; z – оператор сдвига.

При этом остается неизвестным состав и порядок сочетания ПФ каналов объекта в слагаемых полиномов числителя и знаменателя выражения (2).

2. Подстановка в выражение (2) вместо обозначений ПФ каналов объекта $W_0^{u[\alpha^{\mu,v}][\beta^{\mu,v}]}(z)$ и $W_0^{u[\lambda^{\mu',v'}][\gamma^{\mu',v'}]}(z)$ дробно-рациональных выражений, приведение к общему знаменателю слагаемых в числителе и знаменателе, раскрытие скобок и приведение подобных с целью получения в числителе и знаменателе полиномов относительно оператора сдвига z .

3. Переход от ПФ к конечно-разностному уравнению.

По аналогичной схеме (за исключением п.1.) осуществляется расчет эквивалентных объектов управления и инвариантных компенсаторов [6], ПФ которых имеют вид:

$$W_0^{u экв[j][j]} = W_0^{u[j][j]} + \sum_{l=1, l \neq j}^r W_0^{u[l][j]} W_k^{u[j][l]}; \quad (3)$$

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

где $W_0^{u экв[j][j]}$ – ПФ эквивалентного объекта управления; $W_k^{f[i][j]}(z)$ – ПФ инвариантного компенсатора.

Анализ зависимостей (1) – (4) и последовательности расчета автономного компенсатора, эквивалентного объекта и инвариантного компенсатора позволяет сделать ряд выводов.

1. Все преобразования выражений (1) – (4) носят аналитический характер.
2. Количество преобразований, выполняемых при использовании (1) – (4), резко увеличивается при росте размерности системы, что затрудняет их выполнение вручную (или делает невозможным), а также средствами прикладного программного обеспечения [5].
3. Однотипный характер задач, решаемых при моделировании автономных (инвариантных) компенсаторов и эквивалентных объектов управления, являющихся динамическими звеньями, ПФ которых имеют вид дробно-рациональных выражений (2).

Таким образом, в работе ставятся задачи разработки и применения способов машинного моделирования АвИнЦСУ на основе универсальной методики автоматизированного расчета численного значения выхода динамического звена, ПФ которого описывается дробно-рациональным выражением (2).

Алгоритм решения и моделирование. В работе [5] предложен способ синтеза структуры ПФ автономного компенсатора на основе обращения символьной матрицы (рис. 3), который базируется на разработанном алгоритме символьного расчета детерминанта. Главным достоинством данного алгоритма является расстановка множителей (ПФ каналов объекта) сразу во все слагаемые с параллельным формированием их знака, отсутствием генерации перестановок и подсчета инверсий в них. Конечным результатом работы алгоритма (см. рис. 3) являются дискретные ПФ компенсаторов для систем произвольной размерности.

Алгоритм расчета выхода динамического звена с ПФ, имеющей дробно-рациональную структуру (2), исключаящий получение результирующей ПФ путем перемножения полиномов, раскрытия скобок и приведения подобных, на примере автономных компенсаторов перекрестных связей описан в работе [3]. Идея алгоритма заключается в декомпозиции, то есть в представлении звена (2) в виде последовательного соединения звеньев с ПФ числителя и ПФ знаменателя (рис. 4).

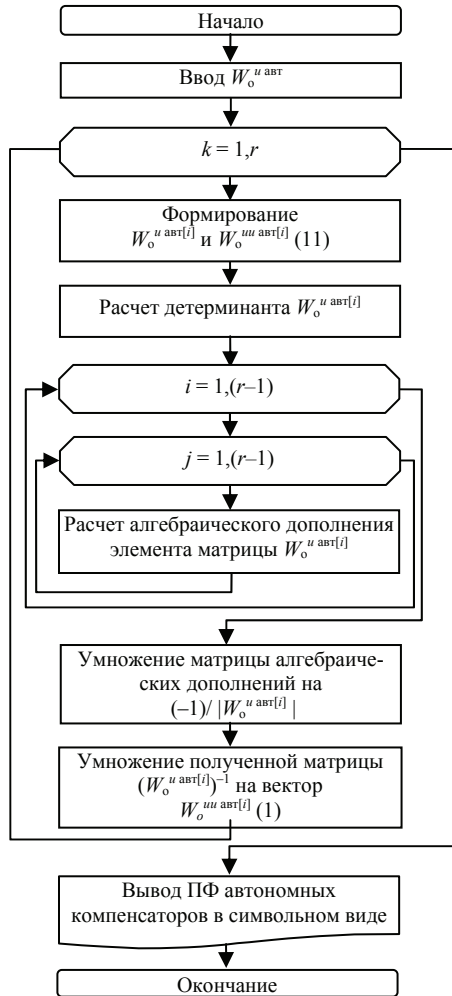


Рис. 3. Схема алгоритма синтеза структуры ПФ автономных компенсаторов АвИнЦСУ

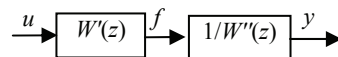


Рис. 4. Схема звена с ПФ: u – вход компенсатора; f – выход звена с ПФ $W'(z)$; y – выход компенсатора

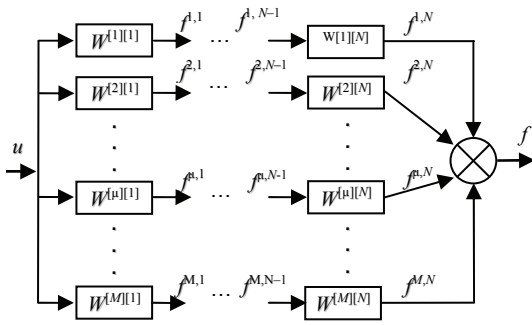


Рис. 5. Структура реализации полинома числителя ПФ: u, f – вход и выход соединения числителя соответственно; $W^{[M][N]}$ – ПФ каналов объекта; M, N – количество цепочек соединения и элементов в каждой из них соответственно

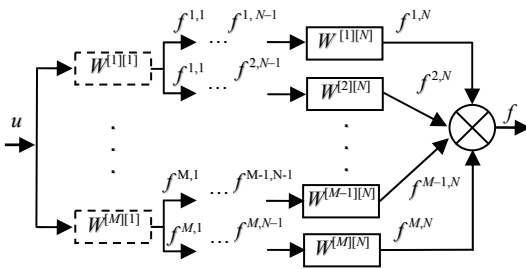


Рис. 6. Древовидная структура звена с ПФ числителя $W'(z)$

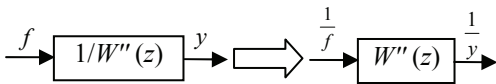


Рис. 7. Способ расчета выхода звена с ПФ $1/W'''(z)$ на основе обратных величин

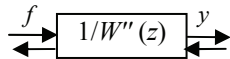


Рис. 8. Способ расчета выхода звена с ПФ $1/W'''(z)$ на основе инвертирования направления сигналов «вход–выход»

Расчет численного значения выхода сводится к последовательному расчету соединения звеньев с ПФ $W'(z)$ и $1/W'''(z)$.

При расчете выхода f рассмотрено два подхода. Первый подход заключается в последовательном расчете элементов цепочек и суммировании их выходов (рис. 5).

Анализ алгоритма синтеза структуры ПФ (2) позволяет сделать вывод, что у некоторых слагаемых имеются общие множители. Отсюда предложен второй подход, который способствует увеличению быстродействия алгоритма для систем большой размерности в результате представления соединения в виде древовидной формы (рис. 6). Передаточные функции, образующие разделяемые части соединения, рассчитываются один раз для нескольких цепочек на каждом такте квантования (см. рис. 6).

Описанный способ не применим к расчету элемента с ПФ $1/W'''(z)$. При решении данной задачи рассматривалось два способа: на основе обращения сигналов и на основе инвертирования направления сигналов [3]. Первый позволяет перейти от расчета выхода звена с ПФ $1/W'''(z)$ к расчету выхода $W'''(z)$ путем обращения сигналов (рис. 7).

В результате моделирование можно осуществить, используя один из описанных выше подходов к расчету $W'(z)$.

Второй способ расчета $1/W'''(z)$ избавляет от рациональности путем изменения направления сигналов f и y (рис. 8).

В работе [3] получена формула расчета входа y на основании выхода f

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

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

где p – количество цепочек, суммарное запаздывание которых неравно нулю; $a_i^{c,j}$, $b_i^{c,j}$ – параметры моделей каналов объекта; $\sum_{c=1}^p f_i^{c,N}$ – суммарный выход цепочек без запаздывания.

С учетом вышесказанного и статьи [3] алгоритм расчета численного значения выхода звена, описываемого дискретной ПФ (2), имеет вид схемы, представленной на рис. 9.

При расчете управляющей части автономной многосвязной системы необходима оптимизация основных регуляторов, синтез которых невозможен без расчета эквивалентных объектов (3), представляемых структурной схемой (рис. 10). Расчет численного значения выхода $y_{\text{эkv}}^{[i][j]}$ осуществляется путем последовательного расчета выходов всех r цепочек и их суммированием.

При этом явный вид ПФ автономных компенсаторов, входящих в цепочки не используется, расчет ведется по схеме (см. рис. 4). Подобная организация звена с ПФ в виде дробно-рационального выражения и предложенный алгоритм (рис. 11) позволяют рассчитать выход любого эквивалентного объекта с ПФ (3), и на его

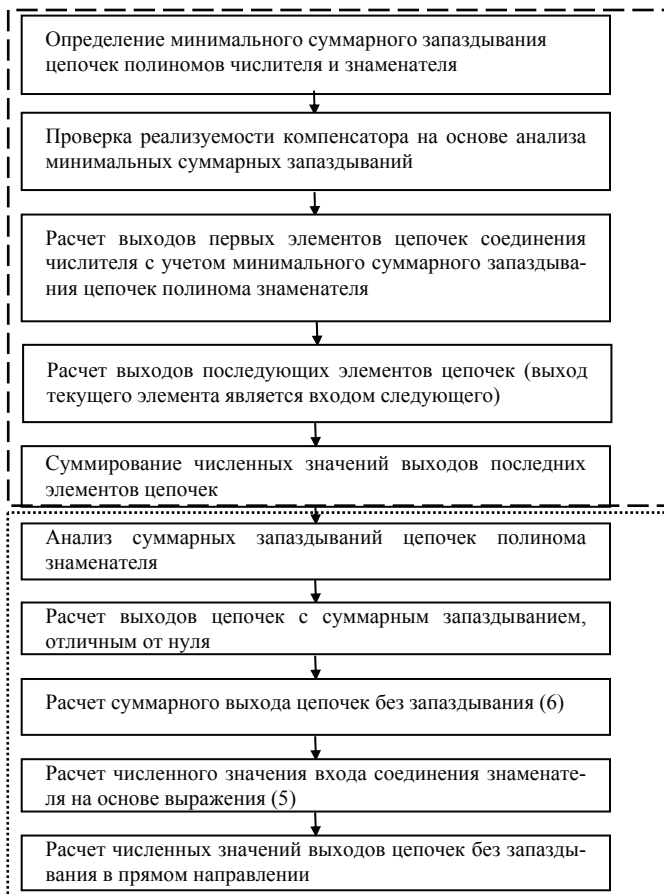


Рис. 9. Схема алгоритма расчета численного значения выхода звена с ПФ

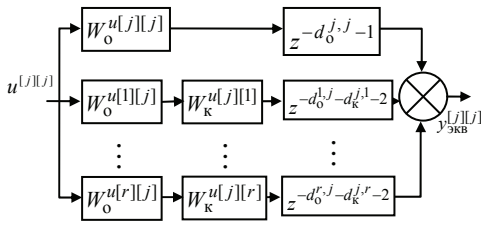


Рис. 10. Структурная схема ПФ эквивалентного объекта: $u^{[j][l]}$ – выход регулятора; $y_{\text{ЭКВ}}^{[j][l]}$ – выход эквивалентного объекта

основе осуществить настройку основных регуляторов одним из известных методов оптимизации [6]. 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 путем автоматизации аналитических преобразований, что, как было сказано

выше, требует немалых временных затрат и вычислительных ресурсов. Помимо внутренних связей многомерный объект управления характеризуется наличием возмущающих воздействий, компенсация которых в многосвязной системе является одной из основных проблем теории управления. Предложенный подход применим и к расчету инвариантных компенсаторов, исключаящих влияние на объект измеряемых внешних воздействий, однако, он осложняется наличием в элементе $1/W''(z)$ рациональности в виде ПФ эквивалентного объекта (3).

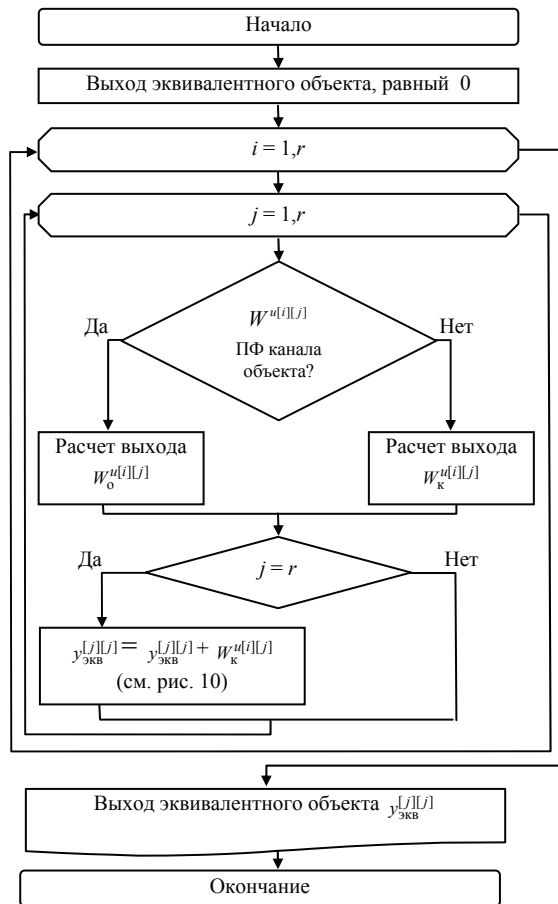


Рис. 11. Схема алгоритма расчета численного значения выхода эквивалентного объекта

Использование алгоритма расчета звена с ПФ, имеющей вид дробно-рационального выражения, предполагает наличие известной структуры ПФ всех входящих в него элементов, что в данном случае не может быть выполненным, так как коэффициенты ПФ автономных компенсаторов неизвестны (не получены путем преобразований). Для выхода из сложившейся ситуации можно выбрать один из двух путей: первый – заключается в получении результирующих ПФ компенсаторов перекрестных связей (расчет коэффициентов полиномов числителя и знаменателя) путем преобразований [6], что связано с некоторыми трудностями (автоматизация аналитических преобразований) и высокими требованиями к точности коэффициентов; второй – базируется на описанной методике и сравнительном анализе суммарных запаздываний цепочек. При этом возможны два случая:

- минимальное суммарное запаздывание имеет цепочка, содержащая только одно динамическое звено (ПФ основного канала объекта);
- минимальное запаздывание содержат цепочки с двумя динамическими звеньями (последовательное соединение $W_0^{u[i][j]}$ и $W_k^{u[i][j]}$), а также цепочку с ПФ канала объекта.

Оба случая реализуются на основании алгоритма расчета дробно-рационального выражения [3] с некоторыми ограничениями для последнего (возможен только для объектов диагональной структуры).

Предложенный алгоритм (рис. 12) позволяет рассчитать не только инвариантный компенсатор структуры (4), но и компенсаторы других структур системы управления, когда выходы компенсаторов подаются на входы объекта или на входы основных регуляторов [7]. При этом их ПФ усложняются наличием в знаменателе не только эквивалентных объектов, но и ПФ основных регуляторов.

Полученная методика к расчету ПФ дробно-рациональной структуры [3] позволяет рассчитывать автономные и инвариантные компенсаторы, эквивалентные объекты, а также в целом АвИИЦСУ.

На базе математического и алгоритмического обеспечений разработано программное обеспечение (ПО) синтеза и моделирования АвИИЦСУ, включающее: синтез и моделирование структуры автономных и инвариантных компенсаторов, эквивалентных объектов на основе векторно-матричного выражения (1), а также расчет управляющей части АвИИЦСУ в целом.

Состоятельность предложенных подходов и алгоритмов, а также эффективность ПО подтверждены экспериментально. В качестве технологического объекта управления взят процесс синтеза аммиака (см. рис. 1). Для описания каналов объекта использовались дискретные модели второго порядка с запаздыванием

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

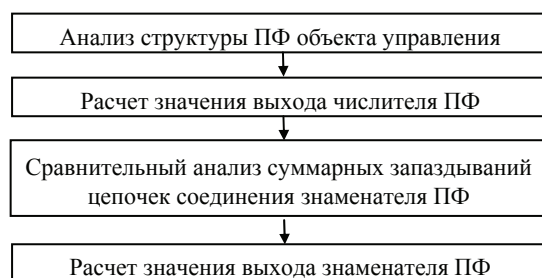


Рис. 12. Схема алгоритма расчета численного значения выхода инвариантного компенсатора

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

В качестве регуляторов по основным каналам приняты ПИД-регуляторы

$$W_p^{u[j][j]}(z) = \frac{u^{u[j][j]}(z)}{e^{[j]}(z)} = \frac{q_0^{u[j][j]}z^0 + q_1^{u[j][j]}z^{-1} + q_2^{u[j][j]}z^{-2}}{1 - p_0^{u[j][j]}z^{-1}},$$

где $q_m^{u[j][j]}, p_0^{u[j][j]}$ – параметры числителя и знаменателя дискретной ПФ регулятора; $m = \overline{0,2}$.

Оптимизация настроек регуляторов выполнена градиентным методом по критерию минимума интегрально-квадратичной ошибки на основе расчета эквивалентных объектов.

При моделировании автономной системы в целом знаменатель ПФ (2) автономных компенсаторов был просчитан двумя способами: на основе обращения сигналов и на основе инвертирования направления входа–выхода (рис. 13).

Анализ динамических характеристик показал, что использование первого способа не позволяет полностью компенсировать влияние перекрестных связей на температуру во втором, третьем и четвертом слоях катализатора. Применение второго способа реализует автономность в полной мере.

Динамические характеристики многосвязной автономно-инвариантной системы при использовании второго способа к расчету всех компенсаторов (автономных и инвариантных) представлены на рис. 14.

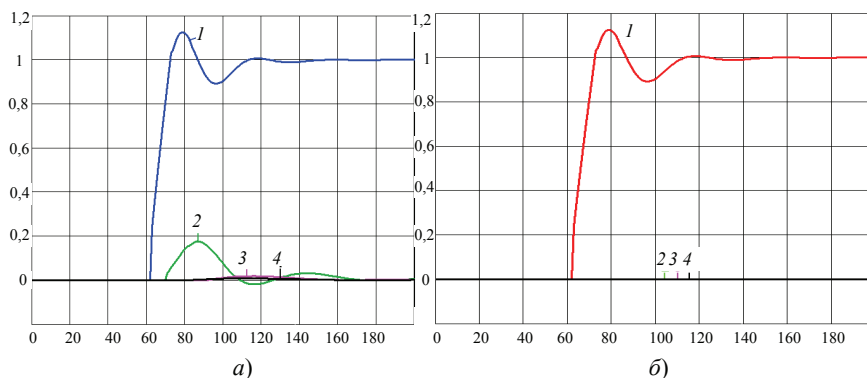


Рис. 13. Динамические характеристики процесса синтеза аммиака (по заданию только на первый канал): *а* – рассчитанные при обращении сигналов; *б* – рассчитанные при инвертировании направления сигналов; 1–4 – температура катализатора в соответствующих слоях

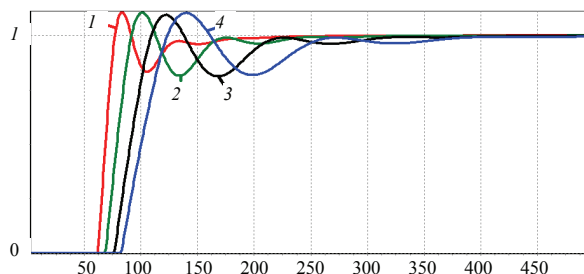


Рис. 14. Динамические характеристики процесса синтеза аммиака при изменении заданий по температурам на всех слоях катализатора: 1–4 – температура в каждом слое

Выводы. Таким образом, предложенная методика и разработанный алгоритм позволяют моделировать многосвязные АвИнЦСУ путем расчета отдельных элементов системы (автономные и инвариантные компенсаторы) 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 и автоматизации вычислительных процедур.

Список литературы

1. Синтез цифровых компенсаторов многосвязных систем управления на основе принципа автономности / В.С. Кудряшов [и др.] // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2003. – № 10. – С. 15–20.
2. Кудряшов, В.С. Алгоритм синтеза адаптивного многосвязного цифрового управления / В.С. Кудряшов, С.В. Рязанцев // Автоматизация технологических процессов : управление, моделирование, контроль, диагностика. Прил. к журн. Мехатроника, автоматизация, управление. – 2006. – № 7. – С. 2–7.
3. Кудряшов, В.С. Алгоритм расчета выходов автономных компенсаторов многосвязной цифровой системы управления / В.С. Кудряшов, С.В. Рязанцев, И.А. Козенко // Вестн. Воронеж. гос. технол. акад. Сер. Информ. технологии, моделирование и управление. – 2010. – № 2. – С. 21–26.
4. Иванов, А.В. Разработка и моделирование цифровой системы многосвязного управления процессом синтеза аммиака : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.01, 05.13.06 / А.В. Иванов. – Воронеж, 2010. – 16 с.
5. Способ автоматизированного синтеза структуры передаточных функций автономных компенсаторов многосвязной цифровой системы управления / В.С. Кудряшов [и др.] // Вестн. Воронеж. гос. технол. акад. Сер. Информ. технологии, моделирование и управление. – 2011. – № 2. – С. 16–20.
6. 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.
7. Кудряшов, В.С. Синтез цифровых компенсаторов возмущений многосвязных 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.

The Method of Modeling and Implementation of Multidimensional Autonomous Invariant Digital Control Systems

V.S. Kudryashov, S.V. Ryazantsev, I.A. Kozenko

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

Key words and phrases: autonomous; compensators; equivalent object; invariant; multi-dimensional; multiply digital control system.

Abstract: The paper offers the method for computer calculation of outputs of autonomous, invariant compensators, equivalent objects and multiply autonomous-invariant digital control systems in general, providing high accuracy of calculations, an adaptation of compensators and regulators. The method involves the synthesis of cross-

linking structure of the compensators based on the implementation of vector-matrix transformations in symbolic form. The results of calculation and simulation of multiply-connected digital control system produce ammonia have been presented.

Methode der Modellierung und der Realisierung der multidimensionalen autonom-invarianten Digitalssysteme der Steuerung

Zusammenfassung: Es wird die Methode der Computerkalkulation der Ausgangseinrichtungen der autonomen invarianten Kompensatoren, der äquivalenten Objekte und der multidimensionalen autonom-invarianten Digitalssysteme der Steuerung vorgeschlagen. Die Methode gewährleistet die hohe Genauigkeit der Kalkulationen, die Adaptierung der Kompensatoren und der Regulatoren. Die Methode einschließt die Synthese der Struktur der Kompensatoren der Kreuzverbindungen auf Grund der Realisierung der Vektormatrixtransformationen in der Symbolform. Es sind die Ergebnisse der Kalkulation und der Modellierung der multidimensionalen Digitalssysteme der Steuerung des Ammoniakes vorgelegt.

Méthode du modélage et de la réalisation des systèmes de commande digitaux autonomes et invariants

Résumé: Est proposée la méthode du calcul informatique des données de sortie des compensateurs autonomes invariants des objets équivalents et des systèmes de commande digitaux autonomes et invariants à multiples liens au total, assurant une haute précision des calculs, l'adaptation des compensateurs et des régulateurs. La méthode comprend la synthèse de la structure des compensateurs des liens croisés à la base de la réalisation des transformations de vecteur et de matrice dans la vue symbolique. Sont présentés les résultats du calcul et du modélage du système de commande digital à multiples liens de l'obtention de l'ammoniaque.

Авторы: *Кудряшов Владимир Сергеевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные и управляющие системы»; *Рязанцев Сергей Васильевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные и управляющие системы»; *Козенко Иван Александрович* – аспирант кафедры «Информационные и управляющие системы», ФБГОУ ВПО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», г. Воронеж.

Рецензент: *Хвостов Анатолий Анатольевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные и управляющие системы», ФБГОУ ВПО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», г. Воронеж.
