

РОБАСТНОЕ АВТОНОМНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МНОГОСВЯЗНЫМ ЛИНЕЙНЫМ ОБЪЕКТОМ С ЗАПАЗДЫВАНИЯМИ ПО ВХОДУ

И. В. ГОГОЛЬ, О. А. РЕМИЗОВА, В. В. СЫРОКВАШИН, А. Л. ФОКИН

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет),
190013, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: remizova-oa@yandex.ru

Предложена новая методика компенсации перекрестных связей многосвязного объекта управления с запаздываниями в прямых и перекрестных связях. Применение методики позволяет получить физически реализуемую структуру компенсатора при любых соотношениях между величинами запаздываний в прямых и взаимных связях и для любых передаточных функций инерционных элементов, а также обеспечивает робастность системы к параметрической неопределенности объекта и величинам запаздывания.

Ключевые слова: робастная система, традиционные регуляторы, запаздывание по управлению, грубость, быстрдействие, метод компенсации, запас устойчивости по амплитуде, робастная устойчивость, запретная область, параметрическое возмущение, номинальная система

Введение. Проектирование многосвязной системы регулирования является одной из основных проблем теории управления, которой посвящено значительное число публикаций [1—3]. Наличие перекрестных связей в модели объекта уменьшает устойчивость и ухудшает качественные показатели системы при решении задач стабилизации технологических процессов. Эти проблемы усложняются в системах с запаздываниями при наличии неопределенности задания коэффициентов (параметров) модели и величин запаздывания (до 50 % от номинального значения), так как грубость системы (уменьшение чувствительности выхода к неопределенности) связана с запасом устойчивости.

Согласно теории многосвязных систем [1], динамическое качество многомерной системы тем выше, чем точнее она обрабатывает входной сигнал в каждом из прямых каналов управления для каждой выходной величины и чем меньше при этом влияние управления в данном канале на другие выходные переменные из-за взаимных связей. С этой точки зрения, идеальной является автономная система, в которой за счет компенсации перекрестных связей исключается взаимное влияние отдельных каналов. Именно такой подход обычно используется при автоматизации технологических процессов.

Однако переход к автономному управлению при наличии запаздываний по управлению в прямых и перекрестных каналах, а также параметрической неопределенности инерционных элементов является в некоторых случаях физически нереализуемой задачей при построении компенсатора. Решению этой проблемы и посвящена настоящая статья.

Постановка задачи. Рассмотрим математическую модель объекта управления:

$$y(p) = W(p)u(p), \quad (1)$$

где $W(p)$ — $m \times m$ -матрица передаточных функций с запаздываниями, $y(p)$, $u(p)$ — m -мерные векторы.

В развернутом виде модель (1) может быть представлена как

$$\begin{bmatrix} y_1(p) \\ y_2(p) \\ \vdots \\ y_m(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{11}(p) & W_{12}(p) & \dots & W_{1m}(p) \\ W_{21}(p) & W_{22}(p) & \dots & W_{2m}(p) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{m1}(p) & W_{m2}(p) & \dots & W_{mm}(p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(p) \\ u_2(p) \\ \vdots \\ u_m(p) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $W_{ij}(p) = \tilde{W}_{ij}(p) \exp(-\tau_{ij}p)$ — передаточные функции, связывающие управление $u_j(p)$ с выходным сигналом $y_i(p)$; τ_{ij} — величина запаздывания в канале (i, j) , $\underline{\tau}_{ij} \leq \tau_{ij} \leq \bar{\tau}_{ij}$; $\tilde{W}_{ij}(j\omega)$ — передаточные функции, заданные с неопределенностью, например $|\underline{\tilde{W}}_{ij}(j\omega)| \leq |\tilde{W}_{ij}(j\omega)| \leq |\bar{\tilde{W}}_{ij}(j\omega)|$, $0 \leq \omega < \infty$.

Также рассмотрим номинальную модель, одну из множества (1):

$$y(p) = W^0(p)u(p), \quad (3)$$

где матрица $W^0(p)$ подобна $W(p)$ и состоит из передаточных функций

$$W_{ij}^0(p) = \tilde{W}_{ij}^0(p) \exp(-\tau_{ij}^0 p), \quad \underline{\tau}_{ij} \leq \tau_{ij}^0 \leq \bar{\tau}_{ij}, \quad |\underline{\tilde{W}}_{ij}^0(j\omega)| \leq |\tilde{W}_{ij}^0(j\omega)| \leq |\bar{\tilde{W}}_{ij}^0(j\omega)|,$$

здесь τ_{ij}^0 — номинальная величина запаздывания в перекрестной связи, действующей на входе звена $W_{ii}(p)$.

Для создания автономной системы обычно используют компенсатор на входе номинального объекта, так чтобы выполнялось условие

$$W^0(p)W_k(p) = \text{diag} W^0(p) = \text{diag} \{ \tilde{W}_{11}^0(p), \tilde{W}_{22}^0(p), \dots, \tilde{W}_{mm}^0(p) \}, \quad (4)$$

где $W_k(p)$ — передаточная функция компенсатора, определяется как

$$W_k(p) = (W^0(p))^{-1} \text{diag} W^0(p). \quad (5)$$

При использовании компенсатора (5) на входе реального объекта не происходит полной компенсации взаимных связей вследствие того, что применение такого подхода ограничено известными представлениями о передаточных функциях, наличием неустойчивых и неминимально фазовых звеньев, физической реализуемостью выражения (5) и наличием запаздываний в модели (3). Таким образом,

$$W(p)W_k(p) = W(p)(W^0(p))^{-1} \text{diag} W^0(p) \neq \text{diag} W(p). \quad (6)$$

При наличии запаздываний целесообразно пользоваться традиционным для автоматизации технологических процессов точным методом компенсации [4] перекрестных связей объекта с запаздыванием, который не предполагает обращения матрицы $W^0(p)$. Одна из возможных структурных схем, реализующих данный подход, для $m = 2$ показана на рис. 1, где $W_{pi}(p)$ — передаточные функции регуляторов.

Здесь для компенсации влияния перекрестной связи $W_{ij}(p)$, $i, j = 1, \dots, m$, $i \neq j$, используется компенсатор $W_{kj}(p)$, на входе которого действует управление $\bar{u}_j(p)$, а выходной сигнал подается на i -й вход объекта $u_i(p)$. Будем считать, что все передаточные функции $W_{ij}(p)$ устойчивы, но среди них при $i \neq j$ могут быть неминимально фазовые. В этом случае передаточная функция компенсатора может быть вычислена как

$$W_{kj}(p) = \left(W_{ii}^0\right)^{-1}(p)W_{ij}^0(p), \quad (7)$$

для физической реализуемости которой должно выполняться условие

$$\Delta\tau_{ij} = \tau_{ij}^0 - \tau_{ii}^0 \geq 0, \quad (8)$$

где τ_{ii}^0 – запаздывание в элементе $W_{ii}(p)$.

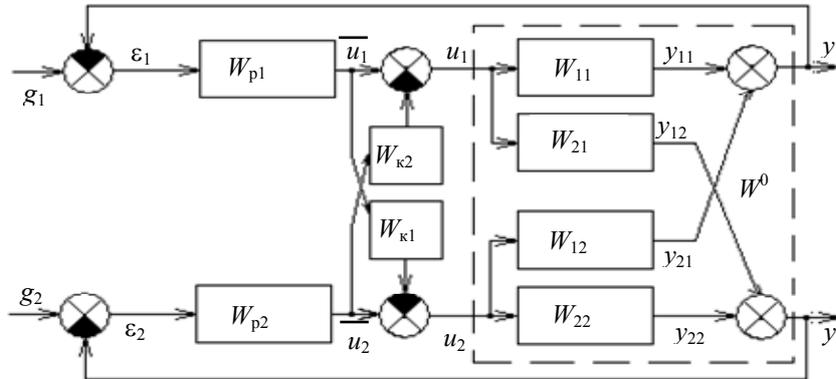


Рис. 1

Условие (8) означает, что запаздывание в перекрестной связи больше, чем запаздывание в диагональном элементе, на выходе которого действует перекрестная связь. Кроме того, для физической реализуемости передаточной функции (7) может понадобиться дополнительное введение малых постоянных времени из-за обращения передаточной функции $\tilde{W}_{ii}^0(p)$. Эти факторы, а также несоответствие номинальных и реальных передаточных функций обуславливают погрешность компенсации. Если условие (8) не выполняется, то принимается $\Delta\tau_{ij} = 0$.

Далее ставится задача построения структурной схемы многомерной системы с компенсацией, свободной от указанных недостатков.

Основной результат. В объекте без компенсатора сигнал $u_i = \bar{u}_i, i = 1, \dots, m$, поэтому в соответствии со структурной схемой (см. рис. 1) на выходе i -го канала многосвязного объекта получим дополнительный сигнал, вызванный влиянием перекрестных связей:

$$f_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m W_{ij}(p)\bar{u}_j. \quad (9)$$

В объекте с компенсатором на выходе i -го канала, с учетом выражения (7), появляется дополнительный компенсирующий сигнал

$$z_i = W_{ii}(p) \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m W_{kj}(p)\bar{u}_j(p) = W_{ii}(p) \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m \left(W_{ii}^0(p)\right)^{-1} W_{ij}^0(p)\bar{u}_j(p). \quad (10)$$

В результате на выходе формируется остаточный сигнал

$$\varphi_i = f_i - z_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m \left[W_{ij}(p) - W_{ii}(p)\left(W_{ii}^0(p)\right)^{-1} W_{ij}^0(p) \right] \bar{u}_j. \quad (11)$$

Для номинального i -го канала многосвязного объекта при $W_{ii}(p) = W_{ii}^0(p)$ получим

$$\varphi_i^0 = f_i - z_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m \left[W_{ij}(p) - W_{ij}^0(p) \right] \bar{u}_j. \quad (12)$$

При этом в качестве перекрестных связей рассматривается реальная, а не номинальная динамика, так как наличие этих связей является основной причиной ухудшения качества многомерной системы.

Это традиционный результат. Теперь для получения альтернативного компенсирующего сигнала воспользуемся результатами, приведенными в работах [5, 6]. Рассмотрим структурную схему, представленную на рис. 2. Здесь внутренняя модель использована для оценивания реакции \hat{f}_i на выходе системы, вызванной действием дополнительного сигнала f_i . Поскольку для оценивания использована номинальная передаточная функция i -го канала объекта, то полученная оценка является обобщенной, так как дополнительно содержит информацию о параметрической неопределенности передаточной функции реального объекта.

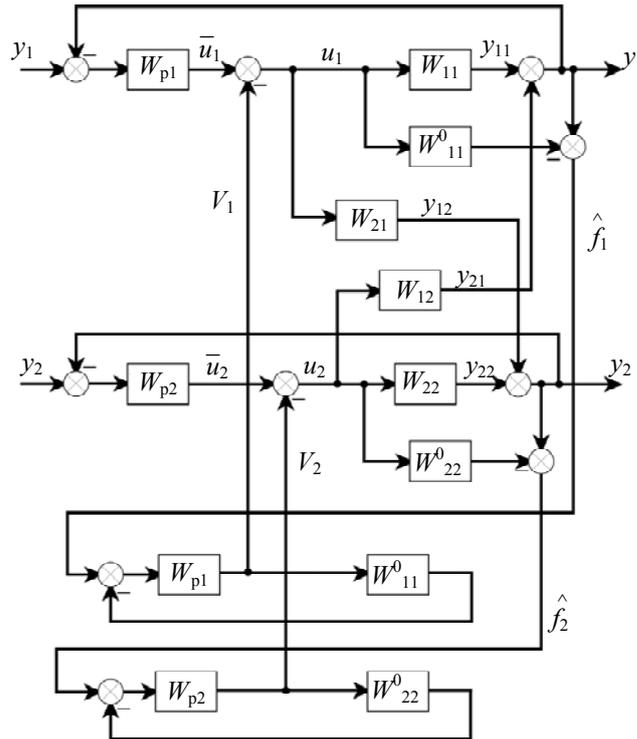


Рис. 2

Сигнал \hat{f}_i поступает на вход следящей системы, которая структурно совпадает с одноконтурной системой i -го канала, только вместо передаточной функции $W_{ii}(p)$ здесь использована номинальная передаточная функция $W_{ii}^0(p)$. Если, в идеале, предположить, что выходной сигнал следящей системы точно совпадает с \hat{f}_i и $W_{ii}^0(p) = W_{ii}(p)$, то такая система является точной моделью, по которой можно проследить, как действует возмущение в любой точке структурной схемы одноконтурной системы. Полученная таким образом переменная u_i используется в системе для компенсации сигнала f_i .

Дополнительный сигнал \hat{f}_i на выходе i -го канала многосвязного объекта, вызванный влиянием перекрестных связей, совпадает с сигналом (9). Определим компенсирующий сигнал — в соответствии со структурной схемой получим

$$\hat{f}_i = W_{ii}(p)u_i + f_i - W_{ii}^0(p)u_i = \Delta W_{ii}(p)u_i + f_i, \quad (13)$$

где $\Delta W_{ii}(p) = W_{ii}(p) - W_{ii}^0(p)$; $u_i = \bar{u}_i - V_i$, здесь V_i — результат работы следящей системы, характеризуемый выражением

$$V_i = \frac{W_{pi}(p)}{1 + W_{pi}(p)W_{ii}^0(p)} \hat{f}_i,$$

тогда

$$u_i = \bar{u}_i - V_i = \bar{u}_i - \frac{W_{pi}(p)}{1 + W_{pi}(p)W_{ii}^0(p)} (\Delta W_{ii}(p)u_i + f_i),$$

откуда при условии $W_{ii}(p) = W_{ii}^0(p) + \Delta W_{ii}(p)$ получим

$$u_i = \frac{1 + W_{pi}(p)W_{ii}^0(p)}{1 + W_{pi}(p)W_{ii}(p)} (\bar{u}_i + f_i).$$

Компенсирющий сигнал будет определяться как

$$\begin{aligned} z_i = W_{ii}(p)V_i &= \frac{W_{pi}(p)W_{ii}(p)}{1 + W_{pi}(p)W_{ii}^0(p)} \hat{f}_i = \frac{W_{pi}(p)W_{ii}(p)}{1 + W_{pi}(p)W_{ii}^0(p)} (\Delta W_{ii}(p)u_i + f_i) = \\ &= \frac{W_{pi}(p)W_{ii}(p)}{1 + W_{pi}(p)W_{ii}^0(p)} \left[\Delta W_{ii}(p) \frac{1 + W_{pi}(p)W_{ii}^0(p)}{1 + W_{pi}(p)W_{ii}(p)} (\bar{u}_i + f_i) + f_i \right] = \\ &= \frac{1 + W_{pi}(p)W_{ii}^0(p)}{1 + W_{pi}(p)W_{ii}(p)} \frac{W_{pi}(p)W_{ii}(p)\Delta W_{ii}(p)}{1 + W_{pi}(p)W_{ii}^0(p)} (\bar{u}_i + f_i) + \frac{W_{pi}(p)W_{ii}(p)}{1 + W_{pi}(p)W_{ii}^0(p)} f_i, \end{aligned} \quad (14)$$

а остаточный сигнал на выходе — как

$$\begin{aligned} \Phi_i = f_i - z_i &= \left[1 - \frac{W_{pi}(p)W_{ii}(p)}{1 + W_{pi}(p)W_{ii}^0(p)} \right] f_i - \frac{1 + W_{pi}(p)W_{ii}^0(p)}{1 + W_{pi}(p)W_{ii}(p)} \frac{W_{pi}(p)W_{ii}(p)\Delta W_{ii}(p)}{1 + W_{pi}(p)W_{ii}^0(p)} (\bar{u}_i + f_i) = \\ &= - \frac{W_{pi}(p)\Delta W_{ii}(p)}{1 + W_{pi}(p)W_{ii}^0(p)} \left[1 + \frac{1 + W_{pi}(p)W_{ii}^0(p)}{1 + W_{pi}(p)W_{ii}(p)} W_{ii}(p) \right] f_i - \\ &\quad - \frac{1 + W_{pi}(p)W_{ii}^0(p)}{1 + W_{pi}(p)W_{ii}(p)} \frac{W_{pi}(p)W_{ii}(p)\Delta W_{ii}(p)}{1 + W_{pi}(p)W_{ii}^0(p)} \bar{u}_i. \end{aligned} \quad (15)$$

Для номинального i -го канала многосвязного объекта при $W_{ii}(p) = W_{ii}^0(p)$ получим $\Phi^0 = 0$ — это значение меньше, чем в выражении (12). Также для номинального i -го канала компенсирующий сигнал (14) будет определяться как

$$z_i^0 = \frac{W_{pi}(p)W_{ii}^0(p)}{1 + W_{pi}(p)W_{ii}^0(p)} f_i.$$

Утверждение. В рамках предложенной структуры (см. рис. 2) номинальная система компенсации сигнала f_i описывается передаточной функцией, совпадающей с передаточной функцией замкнутой номинальной системы основного i -го канала.

Следствие. Система компенсации и одноконтурная система i -го канала имеют одинаковую грубость, которая численно оценивается с помощью H^∞ -нормы функции чувствительности [7].

Таким образом, проблема робастности системы на этапе синтеза регулятора решается одновременно для одноконтурной системы при автономном управлении и для предлагаемого метода компенсации. Робастные алгоритмы управления для одноконтурных систем в классе ПИД-законов рассматривались в работах [8, 9]. Также могут быть использованы алгоритмы, полученные на основе качественной экспоненциальной устойчивости [10, 11].

Пример. Рассмотрим в качестве объекта управления дистилляционную колонну [12] для отделения метанола от воды, описываемую номинальной передаточной функцией

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{0,1153(10p+1)\exp(-0,1p)}{(4p+1)^3} & \frac{0,2429\exp(-2p)}{(33p+1)^2} \\ \frac{0,0887\exp(-12,6p)}{(43p+1)(22p+1)} & \frac{0,2429\exp(-13,4p)}{(53,1p+1)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}.$$

Пусть в качестве робастных законов регулирования используются передаточные функции регуляторов, полученные по методике, изложенной в работе [8]:

$$W_{p1}(p) = -\frac{0,343}{0,18448} \frac{(4p+1)(6,5p+1)}{p(10p+1)},$$

$$W_{p2}(p) = \frac{0,343}{0,2429 \cdot 13,4} \frac{53,1p+1}{p}.$$

При этом для уменьшения порядка передаточной функции $W_{p1}(p)$ рассматривается аппроксимация

$$W_{11}(p) = -\frac{0,1153(10p+1)\exp(-0,1p)}{(4p+1)^3} \approx -\frac{0,1153(10p+1)\exp(-1,6p)}{(4p+1)(6,5p+1)}.$$

Сначала рассмотрим схему компенсации, приведенную на рис. 1. Тогда передаточные функции компенсаторов определяются как

$$W_{к1}(p) = \frac{0,2429}{0,1153} \frac{(4p+1)(6,5p+1)}{(10p+1)(33p+1)^2} \exp(-0,4p) \approx \frac{0,2429}{0,1153} \frac{(4p+1)(6,5p+1)(1-0,2p)}{(10p+1)(33p+1)^2(1+0,2p)},$$

$$W_{к2}(p) = -\frac{0,087}{0,2429} \frac{53,1p+1}{(43p+1)(22p+1)}.$$

Передаточная функция $W_{к2}(p)$ не содержит запаздывания, так как согласно (8) $\Delta\tau_{21} = \tau_{21} - \tau_{22} = 12,6 - 13,4 = -0,8$; тогда она может быть реализована только приближенно. Переходные характеристики по 1-му и 2-му каналам показаны на рис. 3, а, б.

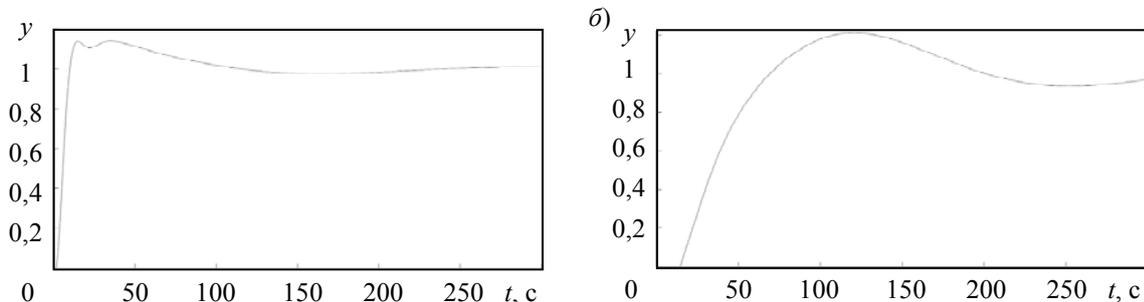


Рис. 3

В качестве альтернативного варианта была рассмотрена структурная схема, приведенная на рис. 2. Для этой системы соответствующие переходные характеристики (по 1-му и 2-му каналам) показаны на рис. 4, а, б.

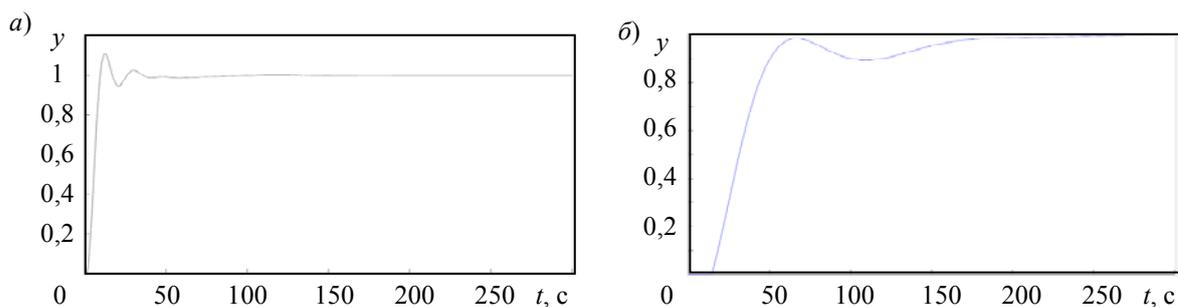


Рис. 4

Сравнительный анализ рис. 3 и 4 показывает, что качество управления улучшилось. Кроме того, такой подход позволяет парировать ограниченные возмущения на входе и выходе объекта, как это было показано в работах [5, 6].

Заключение. Предложена новая схема компенсации перекрестных связей многосвязного объекта с запаздываниями по управлению; ее отличие от традиционной обусловлено следующими факторами:

- схема всегда физически реализуема;
- позволяет получить лучшие качественные показатели переходного процесса;
- обеспечивает грубость по отношению к изменениям величин запаздываний и коэффициентов модели объекта,
- обеспечивает работоспособность при наличии ограниченных возмущений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 3. Синтез регуляторов систем автоматического управления / Под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егунова. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 616 с.
2. Гайдук А. Р. Теория и методы аналитического синтеза систем автоматического управления (полиномиальный подход). М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. 300 с.
3. Цыкунов А. М. Робастное управление с компенсацией возмущений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. 300 с.
4. Дудников Е. Г. Автоматическое управление в химической промышленности. М.: Химия, 1987. 368 с.
5. Ремизова О. А., Фокин А. Л. Робастное управление устойчивым техническим объектом при наличии запаздывания по управлению с компенсацией возмущений // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 12. С. 1010—1017.
6. Гоголь И. В., Ремизова О. А., Сыроквашин В. В., Фокин А. Л. Управление техническими системами с запаздыванием при помощи типовых регуляторов с компенсацией возмущений // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 9. С. 882—890.
7. Методы робастного, нейронечеткого и адаптивного управления / Под ред. Н. Д. Егунова. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 744 с.
8. Ремизова О. А., Сыроквашин В. В., Фокин А. Л. Синтез робастных систем управления с типовыми регуляторами // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 12. С. 966—972.
9. Гоголь И. В., Ремизова О. А., Сыроквашин В. В., Фокин А. Л. Синтез робастных регуляторов для управления технологическими процессами в классе традиционных законов регулирования // Изв. СПбГТИ(ТУ). 2018. № 44. С. 98—105.
10. Григорьев В. В. Качественная экспоненциальная устойчивость непрерывных и дискретных динамических систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2000. Т. 43, № 1—2. С. 18—23.
11. Григорьев В. В., Бойков В. И., Быстров С. В., Рябов А. И., Мансурова О. К. Исследование процессов позитивных систем на основе качественной экспоненциальной устойчивости // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 4. С. 15—20.

12. Спорягин К. В. Математическое моделирование, разработка методов и программного комплекса для настройки параметров типовых законов регулирования динамических систем с запаздыванием: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб, 2010.

Сведения об авторах

- Иван Владимирович Гоголь** — аспирант; СПбГТИ(ТУ); кафедра автоматизации процессов химической промышленности; E-mail: new.ivan.gogol@gmail.com
- Ольга Александровна Ремизова** — канд. техн. наук, доцент; СПбГТИ(ТУ); кафедра автоматизации процессов химической промышленности; E-mail: remizova-oa@yandex.ru
- Владислав Викторович Сыроквашин** — канд. техн. наук, доцент; СПбГТИ(ТУ); кафедра автоматизации процессов химической промышленности
- Александр Леонидович Фокин** — д-р техн. наук, профессор; СПбГТИ(ТУ); кафедра автоматизации процессов химической промышленности; E-mail: fokin_sa@mail.ru

Поступила в редакцию
21.05.19 г.

Ссылка для цитирования: Гоголь И. В., Ремизова О. А., Сыроквашин В. В., Фокин А. Л. Робастное автономное управление многосвязным линейным объектом с запаздываниями по входу // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 9. С. 825—833.

ROBUST AUTONOMOUS CONTROL OF A MULTIPLY CONNECTED LINEAR OBJECT WITH ENTRY DELAYS

I. V. Gogol, O. A. Remizova, V. V. Syrokvashin, A. L. Fokin

St. Petersburg State Institute of Technology, 190013, St. Petersburg, Russia
E-mail: remizova-oa@yandex.ru

A new technique is proposed for compensation for cross-links of a multiply connected control object with delays in direct and cross links. Application of the technique allows one to obtain a physically realizable compensator structure for any correlation between the values of delays in direct and reciprocal relationships and for any transfer functions of inertial elements, and also ensures the robustness of the system to the parametric uncertainty of the object and the values of delay.

Keywords: robust system, traditional regulator, control delay, roughness, performance, compensation method, stability gain margin, robust stability, restricted area, parametric disturbance, nominal system

REFERENCES

1. Pupkov K.A., Egupov N.D., ed., *Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya. T. 3. Sintez regulyatorov sistem avtomaticheskogo upravleniya* (Methods of the Classical and Modern Theory of Automatic Control. Vol. 3. Synthesis of Regulators of Automatic Control Systems), Moscow, 2004, 616 p. (in Russ.)
2. Gayduk A.R. *Teoriya i metody analiticheskogo sinteza sistem avtomaticheskogo upravleniya (polinomial'nyy podkhod)* (Theory and Methods of Analytical Synthesis of Automatic Control Systems (Polynomial Approach)), Moscow, 2012, 360 p. (in Russ.)
3. Tsykunov A.M. *Robastnoe upravlenie s kompensatsiyey vozmushcheniy* (Robust Control with Disturbance Compensation), Moscow, 2012, 300 p. (in Russ.)
4. Dudnikov E.G. *Avtomaticheskoye upravleniye v khimicheskoy promyshlennosti* (Automatic Control in the Chemical Industry), Moscow, 1987, 368 p. (in Russ.)
5. Remizova O.A., Fokin A.L. *Journal of Instrument Engineering*, 2016, no. 12(59), pp. 1010–1017. (in Russ.)
6. Gogol' I.V., Remizova O.A., Syrokvashin V.V., Fokin A.L. *Journal of Instrument Engineering*, 2017, no. 9(60), pp. 882–890.
7. Egupov N.D., ed., *Metody robastnogo, neyro-nechetkogo i adaptivnogo upravleniya* (Robust, Neuro-Fuzzy and Adaptive Control Methods), Moscow, 2002, 744 p. (in Russ.)
8. Remizova O.A., Syrokvashin V.V., Fokin A.L. *Journal of Instrument Engineering*, 2015, no. 12(58), pp. 966–972. (in Russ.)
9. Gogol' I.V., Remizova O.A., Syrokvashin V.V., Fokin A.L. *Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*, 2018, no. 44, pp. 98–105. (in Russ.)
10. Grigor'yev V.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2000, no. 1–2(43), pp. 18–23.
11. Grigor'yev V.V., Boykov V.I., Bystrov S.V., Ryabov A.I., Mansurova O.K. *Journal of Instrument Engineering*, 2013, no. 4(56), pp. 15–20. (in Russ.)

12. Sporyagin K.V. *Matematicheskoye modelirovaniye, razrabotka metodov i programmogo kompleksa dlya nastroyki parametrov tipovykh zakonov regulirovaniya dinamicheskikh sistem s zapazdyvaniyem* (Mathematical Modeling, Development of Methods and Software for Setting Parameters of Typical Laws of Regulation of Dynamic Systems with Delay), Candidate's thesis, St. Petersburg, 2010, 237 p. (in Russ.)

Data on authors

- Ivan V. Gogol** — Post-Graduate Student; St. Petersburg State Institute of Technology, Department of Processes Automation in Chemical Industry; E-mail: new.ivan.gogol@gmail.com
- Olga A. Remizova** — PhD, Associate Professor; St. Petersburg State Institute of Technology, Department of Processes Automation in Chemical Industry; E-mail: remizova-oa@yandex.ru
- Vladislav V. Syrokvashin** — PhD, Associate Professor; St. Petersburg State Institute of Technology, Department of Processes Automation in Chemical Industry
- Aleksander L. Fokin** — Dr. Sci., Professor; St. Petersburg State Institute of Technology, Department of Processes Automation in Chemical Industry; E-mail: fokin_sa@mail.ru

For citation: Gogol I. V., Remizova O. A., Syrokvashin V. V., Fokin A. L. Robust autonomous control of a multiply connected linear object with entry delays. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 9. P. 825—833 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-9-825-833