

For citation:

Tsykunov A. M. Robust Control of Object with Distributed Delay and Unknown Order of Mathematical Model, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 4, pp. 219–227.

DOI: 10.17587/mau/17.219-227

References

1. **Polyak B. T., Sherbakov P. S.** *Robustnaja ustojichivost i upravlenie* (Robust stability and control), Moscow, Nauka, 2001 (in Russian).
2. **Hassan L., Zemouche A., Boutayeb M.** H_∞ Unknown input observers design for a class of nonlinear time-delay systems, *Preprints of 18th IFAC World Congress*, 2011, pp. 3879–3884.
3. **Karimi H. R.** Robust adaptive H_∞ synchronization of master-slave systems with discrete and distributed time-varying delays and nonlinear perturbations, *Preprints of 18th IFAC World Congress*, 2011, pp. 302–307.
4. **Gao H., Lam J., Chen G.** New criteria for synchronization stability of general complex dynamical networks with coupling delay, *Physics Letters*, 2006, vol. 36, no. 2, pp. 263–273.
5. **Ge S. S., Hong F., Lee T. H.** Adaptive neural network control of nonlinear systems with unknown time delays, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 2003, vol. 48, no. 11, pp. 2004–2010.

6. **Gao H., Chen G., Lam J.** A new delay systems approach to network-based control, *Automatica*, 2008, vol. 44, no. 1, pp. 39–52.
7. **Nguang S. K.** Robust stabilization of a class of time-delay nonlinear systems, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 2000, vol. 45, no. 4, pp. 756–762.
8. **Han Q. L.** Robust stability of uncertain delay-differential systems of neutral type, *Automatica*, 2002, vol. 38, no. 4, pp. 719–723.
9. **Ivanescu D., Niculescu S. I., Dugard L., Dion J. M., Verriest E. I.** On delay dependent stability of neutral systems, *Automatica*, 2003, vol. 39, no. 2, pp. 255–261.
10. **Bobtsov A. A.** Output stabilization of nonlinear systems under delay conditions, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2008, vol. 47, no. 2, pp. 179–186.
11. **Tsykunov A. M.** Robust control algorithms with compensation of bounded perturbations, *Automation and Remote Control*, 2007, vol. 68, no. 7, pp. 1201–1212.
12. **Tsykunov A. M.** *Robustnoe upravlenie s kompensatsiei vozmushenii* (Robust control with compensation of perturbations), Moscow, Fizmatlit, 2012 (in Russian).
13. **Tsykunov A. M.** Decentralized robust control for multiconnected objects with structural uncertainty, *Automation and Remote Control*, 2010, vol. 71, no. 12, pp. 111–121.
14. **Khalil H. K.** *Nonlinear systems*, 2nd ed., N. Y., Prentice-Hall, 1996.
15. **Brusin V. A.** On a class of singularly disturbed adaptive systems, *Automation and Remote Control*, 1995, vol. 56, no. 4, pp. 119–127.

УДК 681.51

DOI: 10.17587/mau.17.227-232

Г. Д. Афанасьев, канд. техн. наук, доц., nauka-pf@yandex.ru,

И. Г. Афанасьева, аспирант, ira.afanaseva.70@mail.ru,

Северо-Кавказский федеральный университет (филиал в г. Пятигорске)

Расчет параметров распределенных систем автоматического регулирования с параллельным корректирующим устройством

Рассмотрен метод расчета параметров систем автоматического регулирования с обеспечивающим астатизм параллельным корректирующим устройством для объекта с распределенными параметрами, переходная характеристика которого аппроксимируется экспонентой второго порядка с запаздыванием. Методом математического моделирования продемонстрирована возможность получения высоких показателей качества регулирования при использовании систем рассматриваемого типа для объектов с распределенными параметрами.

Ключевые слова: система автоматического регулирования, объект с запаздыванием, параллельное корректирующее устройство, переходный процесс, аperiodическое звено первого порядка, объект регулирования, передаточная функция, объект с распределенными параметрами, усилительное звено, кривые переходных

Введение

Для обеспечения высоких показателей качества регулирования процессов в системах, имеющих объекты с распределенными параметрами, обычно применяют высокоточные регуляторы, включаемые последовательно с неизменяемой частью системы и реализующие пропорционально-интегрально-дифференциальный закон регулирования. Для расчета параметров настройки регуляторов обычно применяют частотные методы, в которых задаются запасы устойчивости по модулю и по фазе, гарантирующие устойчивость систем, но напрямую не связанные с показателями качества регулирования [1].

Постановка задачи

В данной работе сделана попытка обосновать возможность применения согласно-параллельной

коррекции (СПК) для получения высоких показателей качества регулирования в системах, имеющих объекты с распределенными параметрами. Как справедливо отмечено авторами работы [2], в классической и современной литературе по теории автоматического регулирования использование СПК, как правило, остается за гранью внимания. В названной работе изложены три варианта использования СПК, позволяющие получить высокие показатели качества регулирования в системах управления линейными стационарными объектами с различными динамическими характеристиками. В работах [3–9] рассмотрены вопросы исследования динамики и расчета параметров систем автоматического регулирования (САР) с СПК для случаев различных объектов с запаздыванием, в том числе и с распределенными параметрами. Особенностью этих САР является то, что порядок их инерционно-

сти при соответствующем выборе типов и параметров корректирующих устройств остается равным порядку инерционности объекта регулирования, что, как правило, улучшает динамические показатели регулирования. В данной работе для расчета параметров систем использованы корневые методы [10, 11], напрямую связанные с основными показателями качества регулирования.

Метод решения задачи исследования

Структурная схема САР с параллельным корректирующим устройством, включающая объект с распределенными параметрами, представлена на рис. 1.

Операторное уравнение, соответствующее изображенной структурной схеме, имеет вид [3]

$$[1 + K_1 W_o(s) k_{OC} - W_k(s) k_{OC}] \tilde{T}(s) = K_1 W_o(s) F_3(s) + [k_{OC} W_k(s) W_B(s) - W_B(s)] F_B(s), \quad (1)$$

где $W_o(s)$ и $W_B(s)$ — передаточные функции объекта регулирования по управляющему и возмущающему воздействиям соответственно; F_B — возмущающее воздействие; F_3 — задающее воздействие; $W_k(s)$ — передаточная функция корректирующего устройства;

$K_1 = E_1 \left[\frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{1}{n_1} G_i \right]$ — передаточный коэффициент



Рис. 1. Структурная схема САР с параллельным корректирующим устройством

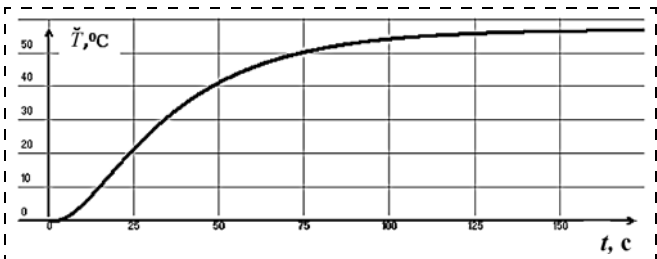


Рис. 2. Переходная характеристика пластины

Таблица 1

Параметры	Моды	
	Первая	Третья
Передаточный коэффициент	0,0568	0,0432
Постоянная времени T_1	29,1	27,0
Постоянная времени T_2	9,25	9,0
Запаздывание τ	2	2

ент пропорционального распределенного звена [1] (E_1 — коэффициент усиления, n_1 — весовой коэффициент, G_i — обобщенная координата, соответствующая i -й моде [12]); k_{OC} — коэффициент звена обратной связи, которое во всех случаях принимается безынерционным усилительным.

При выполнении условия $k_k k_{OC} = 1$, где k_k — передаточный коэффициент пропорциональной части корректирующего устройства, в системе обеспечивается астатизм, в установившемся режиме регулируемая величина $\tilde{T} = F_3/k_{OC}$ не зависит от возмущающего воздействия [6].

Для иллюстрации метода расчета систем рассматриваемого типа в качестве объекта регулирования с распределенными параметрами выбрана стальная пластина, имеющая размеры $X_L = 0,6$, $Y_L = 0,6$, $Z_L = 0,03$ (все параметры и переменные здесь и в дальнейшем указаны в СИ), на поверхность которой ($X = 0$, $Y = 0$, $Z = Z_L$) направлен тепловой поток $U(X, Y, t)$, являющийся управляющим воздействием. В качестве регулируемой величины принята температура $\tilde{T}(X', Y', Z', t)$ в средней зоне пластины. Граничные и начальные условия приняты нулевыми. Математическая модель объекта имеет вид [1, 13]

$$\frac{\partial \tilde{T}(X, Y, Z, t)}{\partial t} = a \left[\frac{\partial^2 \tilde{T}(X, Y, Z, t)}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \tilde{T}(X, Y, Z, t)}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 \tilde{T}(X, Y, Z, t)}{\partial Z^2} \right]; \quad (2)$$

$$\lambda \frac{\partial \tilde{T}(X, Y, Z, t)}{\partial Z} = U(X, Y, t); \quad (3)$$

где $a = 0,000019$ и $\lambda = 0,23$ приняты для стали [14].

Переходная характеристика пластины, полученная математическим моделированием, представлена на рис. 2.

Для выполнения расчета параметров системы кривая аппроксимирована апериодическим звеном второго порядка с запаздыванием. Передаточная функция по управляющему воздействию при этом имеет вид

$$W_o(s) = \frac{k_0 e^{-s\tau}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}. \quad (4)$$

Для 1-й и 3-й мод входного воздействия полученные методом площадей Симою [15] параметры представлены в табл. 1.

Выбор типа корректирующего устройства и расчет его параметров проводили исходя из требования получить апериодический переходный процесс при минимальном времени регулирования. Для того чтобы порядок инерционности системы был равен порядку инерционности объекта регулирования, знаменатель передаточной функции корректирующего устройства необходимо принять та-

Параметры	Моды											
	Первая по X и Y						Первая по X и третья по Y					
k_d	0	10	20	30	40	50	0	10	20	30	40	50
k	1,19	1,83	2,58	3,42	4,35	5,36	1,16	1,82	2,60	3,48	4,53	5,51
K_1	21	32,2	45,4	60,2	76,6	94,4	26,7	42,1	60,1	80,5	103	127

ким же, как и у объекта [6]. Для получения возможности влиять на длительность переходного процесса в передаточную функцию корректирующего устройства введена производная. Таким образом, была принята передаточная функция корректирующего устройства следующего вида:

$$W_k(s) = \frac{k_k - k_{d1}s}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}. \quad (5)$$

С учетом (1), (4) и (5) характеристическое уравнение САР имеет вид

$$1 + \frac{K_1 k_o k_{OC} e^{-s\tau}}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} - \frac{k_{OC}(k_k - k_{d1}s)}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} = 0.$$

Обозначив $K_1 k_o k_{OC} = k$, $k_{OC} k_{d1} = k_d$ и учитывая, что $k_{OC} k_k = 1$, после элементарных преобразований получим

$$T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2 + k_d)s + k e^{-s\tau} = 0.$$

Чтобы переходный процесс был аperiodическим затухающим, корни характеристического уравнения должны быть вещественными отрицательными. Длительность переходного процесса определяется корнем, ближайшим к мнимой оси комплексной плоскости корней. В соответствии с этим в характеристическое уравнение подставим $s = -\alpha$ и найдем, при каких соотношениях k и k_d этот корень будет существовать:

$$T_1 T_2 \alpha^2 - (T_1 + T_2 + k_d)\alpha + k e^{\alpha\tau} = 0. \quad (6)$$

Последнее уравнение разрешим относительно k :

$$k = [(T_1 + T_2 + k_d)\alpha - T_1 T_2 \alpha^2] e^{-\alpha\tau}. \quad (7)$$

Функция $k(\alpha)$ при увеличении α имеет сначала положительное значение, затем отрицательное. Интерес представляют положительные максимальные значения k , так как при таких значениях на вход объекта регулирования будет поступать сигнал наибольшей мощности, и переходный процесс будет сходящимся и наименьшим по длительности. Для нахождения максимальных значений k производную $dk/d\alpha$ приравняем нулю, в результате получим уравнение

$$\tau T_1 T_2 \alpha^2 - [2T_1 T_2 + (T_1 + T_2 + k_d)\tau]\alpha + (T_1 + T_2 + k_d) = 0,$$

откуда получим

$$\alpha = \frac{2T_1 T_2 + \tau(T_1 + T_2 + k_d) - \sqrt{4T_1^2 T_2^2 + \tau^2(T_1 + T_2 + k_d)^2}}{2\tau T_1 T_2}.$$

При вычислении α знак "+" перед корнем соответствует максимальному отрицательному значению k , поэтому учитывается только знак "-". Подставляя в формулу (7) найденные при различных значениях k_d корни α , получим соответствующие максимальные значения k , при которых обеспечивается аperiodический переходный процесс. Найденные для первой моды по X и Y и для первой моды по X и третьей по Y значения k и $K_1 = k/(k_{OC} k_o)$ при ряде принятых значений k_d представлены в табл. 2. Коэффициент обратной связи в расчетах и при моделировании принят равным единице.

Для нахождения коэффициента веса n_1 и коэффициента усиления E_1 распределенного усилительного звена использована система уравнений [1, 16]

$$\begin{cases} K1_1 = E_1 \left(\frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{1}{n_1} G_1 \right); \\ K1_3 = E_1 \left(\frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{1}{n_1} G_3 \right), \end{cases} \quad (8)$$

где $K1_1$ и $K1_3$ — коэффициенты 1-й и 3-й мод распределенного усилительного звена, G_1 и G_3 — обобщенные координаты по 1-й и 3-й модам:

$$G_1 = \left(\frac{\pi}{X_L} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{Y_L} \right)^2 = 54,8;$$

$$G_2 = \left(\frac{\pi}{X_L} \right)^2 + \left(\frac{3\pi}{Y_L} \right)^2 = 274.$$

Значения n_1 и E_1 , вычисленные для ряда значений k_d , представлены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры	Значения					
k_d	0	10	20	30	40	50
n_1	700	618	584	559	543	535
E_1	19,6	29,8	41,8	55,2	70,1	86,3
$t_{пер}, c$	110	95	85	80	75	70
$\sigma, \%$	0,62	0,71	0,76	0,80	0,82	0,83

При рассчитанных по изложенной методике параметрах выполнено математическое моделирование на ЦВМ. Математическая модель объекта регулирования представлена выше, математическая модель системы регулирования соответствует структурной схеме рис. 1, уравнениям (2), (3), (5), а также следующим уравнениям:

$$\begin{cases} F_1 = F_3 - F_{OC}; \\ U = E_1 \left[\frac{n_1 - 1}{n_1} F_1 - \frac{1}{n_1} \left(\frac{\partial^2 F_1}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 F_1}{\partial Y^2} \right) \right]; \\ T_1 T_2 \frac{\partial^2 F_K}{\partial t^2} + (T_1 + T_2) \frac{\partial F_K}{\partial t} + F_K = k_K F_1 - k_{d1} \frac{\partial F_1}{\partial t}; \\ F_2 = \dot{T} - F_K; \\ F_{OC} = k_{OC} F_2. \end{cases} \quad (9)$$

где $\dot{T}$ — температура в заданной области регулирования.

В табл. 3 представлены время регулирования $t_{рег}$ и перерегулирование σ . При определении времени регулирования было принято, что переходный процесс заканчивается, когда температура превышает

99 % установившегося значения. Наличие незначительного перерегулирования можно объяснить двумя причинами: дискретизацией пространственных координат при моделировании и допущениями при аппроксимации переходных характеристик объекта регулирования. Если при моделировании использовать звенья с сосредоточенными параметрами, соответствующие передаточной функции (4), то перерегулирование отсутствует.

Кривые переходного процесса, полученные математическим моделированием принятого объекта в системе с различными параметрами k_d , n_1 и E_1 , указанными в табл. 3, представлены на рис. 3.

Представленные кривые наглядно иллюстрируют уменьшение длительности переходного процесса при увеличении коэффициента при производной корректирующего устройства, при этом переходный процесс остается аperiодическим.

Выполнено также моделирование процессов при регулировании температуры в двух соседних по оси Y зонах пластины, отстоящих друг от друга на 0,1 м. Соответствующие кривые изменения температуры представлены на рис. 4. Задающий сигнал на второй канал регулирования подан через 20 с после

начала работы первого. Через 80 с на вторую зону регулирования температуры подано скачкообразное возмущающее воздействие, вызвавшее снижение температуры в этой зоне. Использование распределенного регулятора обеспечивает практически независимую работу двух контуров, что подтверждают полученные кривые. Рис. 4 также иллюстрирует свойство астатизма системы регулирования (после подачи возмущения температура во второй зоне вернулась к заданному значению).

Выполненные расчеты и моделирование позволяют сделать вывод о том, что уменьшение времени регулирования в рассматриваемой системе достигается увеличением коэффициента при производной в корректирующем устройстве. Но при этом необходимо увеличивать коэффициент распределенного усилительного звена, т.е. повышать мощность сигнала на входе объекта регулирования. Таким образом, минимальное время регулирования в системах рассматриваемого типа ограничивается мощностью устройства, формирующего сигнал управления, и допустимой мощностью на входе объекта регулирования.

Для сравнения на рис. 5 представлены кривые переходных процессов, полученные в системе с па-

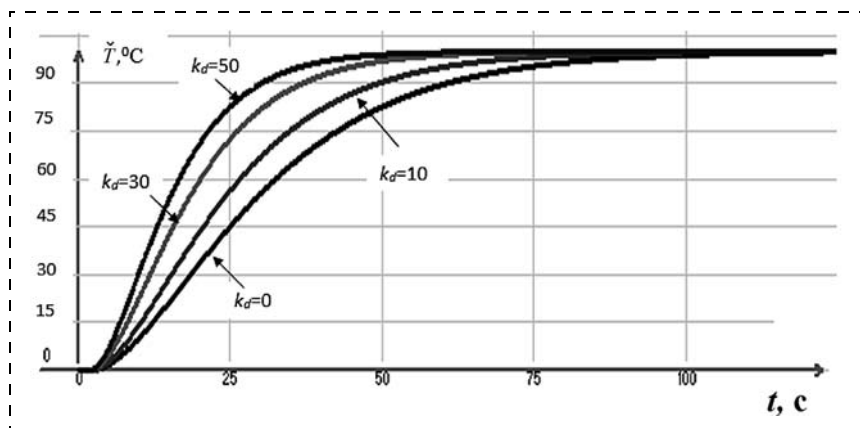


Рис. 3. Кривые переходных процессов

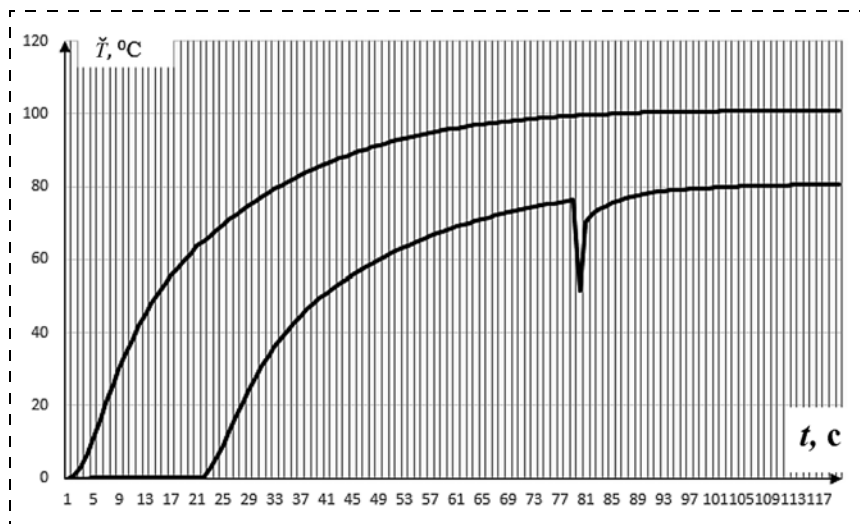


Рис. 4. Переходные характеристики при регулировании температуры в двух зонах

раллельным корректирующим устройством при $k = 11,3$ и $k_d = 100$, и в системе с распределенным ПИД регулятором для одного и того же объекта. Параметры ПИД регулятора для первой и третьей моды входного воздействия рассчитаны по квадратичному минимуму с первой производной. Коэффициенты веса и коэффициенты усиления для пропорциональной, интегральной и дифференциальной частей распределенного регулятора рассчитаны по формулам, аналогичным (10). Следует заметить, что при использовании ПИД регулятора сократить время регулирования при апериодическом переходном процессе по сравнению с полученным не представляется возможным.

Выводы

1. Использование САР с параллельным корректирующим устройством для объектов с распределенными параметрами позволяет получить переходные процессы с незначительным, не превышающим 1 %, перерегулированием и скоростью регулирования, более высокой, чем при использовании систем с ПИД регулятором.

2. Для получения возможности выполнить расчет параметров корректирующего устройства с введением производной в закон регулирования переходные характеристики распределенного объекта регулирования по каждой пространственной моде следует аппроксимировать апериодическим звеном не ниже второго порядка с запаздыванием.

3. Использованный корневой метод расчета позволяет получить параметры САР, обеспечивающие изменение регулируемой величины на выходе объекта регулирования с распределенными параметрами по апериодическому закону с незначительным перерегулированием и временем, ограничивающимся только допустимым максимальным сигналом на входе объекта регулирования.

Список литературы

1. Малков А. В., Першин И. М. Системы с распределенными параметрами. Анализ и синтез. М.: Научный мир, 2012. 472 с.
2. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. О проблеме согласо- параллельной коррекции систем регулирования // Мехатроника, автоматизация, управление. Том 16. 2015. № 8. С. 507—514.
3. Афанасьев Г. Д. Один из способов построения астатических САР // Материалы всероссийской научной конференции "Вузовская наука Северо-Кавказскому федеральному округу". Пятигорск: Изд. СКФУ. 2013. С. 17—22.
4. Афанасьев Г. Д., Афанасьева И. Г. Расчет систем автоматического регулирования с параллельным корректирующим

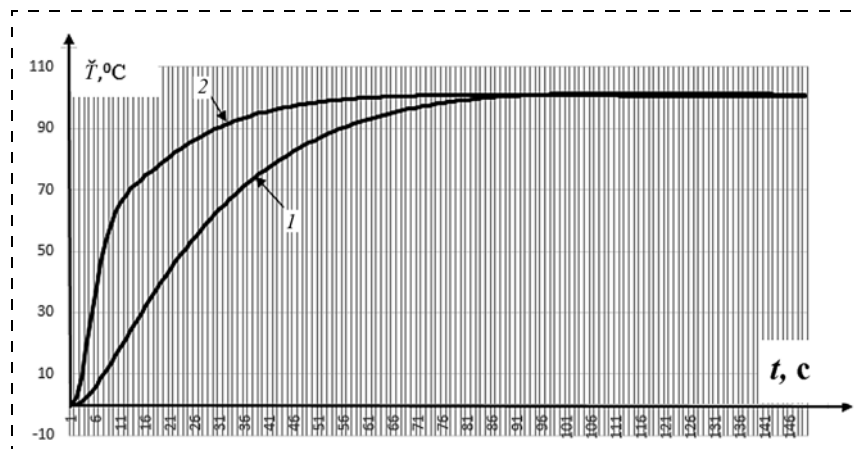


Рис. 5. Переходные характеристики: 1 — в системе с ПИД регулятором; 2 — в системе с параллельным корректирующим устройством

устройством. // Сборник научных трудов V Международной научной конференции "Системный анализ и прикладная синергетика". Том III. Пятигорск: Изд. СКФУ, 2013. С. 18—24.

5. Афанасьева И. Г. Расчет параметров САР с параллельным корректирующим устройством и объектом регулирования с запаздыванием // Сборник научных трудов 2-й ежегодной научно-практической конференции преподавателей, студентов и молодых ученых СКФУ "Университетская наука региону". Т. I. Пятигорск: Изд. СКФУ, 2014. С. 102—108.

6. Афанасьева И. Г. Системы автоматического регулирования с параллельным корректирующим устройством // Материалы Всероссийской научной конференции "Системный анализ и прикладная синергетика". Таганрог: Изд. ЮФУ, 2015. С. 196—204.

7. Афанасьева И. Г. Устойчивость распределенных систем автоматического регулирования с параллельным корректирующим устройством. // В мире научных открытий. — Красноярск: Научно-инновационный центр. 2015. № 6. 1 (166). С. 462—475.

8. Bar-Kana I. Parallel Feedforward and Simplified Adaptive Control // Int. Journ. Adapt. Control and Signal Processing. 1987. Vol. 1. P. 95—109.

9. Bartolini G., Ferrara A., Stotsky A. Stability and Exponential Stability of an Adaptive Control Scheme for Plants of any Relative Degree // IEEE Trans. Autom. Contr. 1995. Vol. 40, N 1.

10. Бессекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1972. 767 с.

11. Техническая кибернетика. Теория автоматического регулирования. Кн. I. Математическое описание, анализ устойчивости и качества систем автоматического регулирования / Под ред. В. В. Солодовникова. М.: Машиностроение, 1967. 768 с.

12. Першин И. М. Синтез систем с распределенными параметрами. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 6. С. 235—241.

13. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 599 с.

14. Теплохимический справочник. Т. 2 / Под ред. В. Н. Юрнева, П. Д. Лебедева. М.: Энергия, 1976. 896 с.

15. Олейников В. А., Тихонов О. В. Автоматизация обога- тельных фабрик. Ленинград: Недра, 1966. 325 с.

16. Першин И. М. Синтез систем с распределенными параметрами. Пятигорск: Изд-во "РИО КМВ", 2002. 212 с.

Calculation of the Parameters of the Distributed Automatic Control Systems with Parallel Corrective Devices

G. D. Afanasyev, nauka-pf@yandex.ru✉, **I. G. Afanasyeva**, ira.afanaseva.70@mail.ru,
North-Caucasian Federal University (Pyatigorsk Branch), Pyatigorsk, 357500, Russian Federation

Corresponding author: **Afanasyev Gennadiy D.**, Ph. D., Associate Professor,
Pyatigorsk, 357500, Russian Federation,
e-mail: nauka-pf@yandex.ru

Received on April 21, 2015

Accepted on September 22, 2015

For dimensioning of the regulators of the automatic control objects with the distributed parameters the methods are used, which take into account the final range of the spatial modes. In this case, for each mode the transfer function is approximated by the finite polynomials of the degree of n . As a rule, the transfer function of the first order and an aperiodic link with a delay are used. In this paper, the authors consider the systems, in which astatism is achieved due to a correction device included in parallel with the unchangeable part of the system. Here a methodology is presented for calculation of the system parameters at an approximation object of a regulation aperiodic link of the second order. This approximation allows us to use the methodology for calculation of a correction device, which forms a signal containing the first derivative of the input signal. The design procedure of the parameters is based on the requirement to obtain for each spatial mode an aperiodic transition process with the least possible time of regulation. It is demonstrated that introduction of a derivative in the law of the signal at the output of the correction device with increasing of the coefficient of derivative can appropriately increase the distribution coefficient of the amplifier unit, resulting in enhancing of the performance of the system during the transition process. In such a way the system's performance is limited only by the maximal permissible signal at the input object of regulation. By means of a mathematical adjustment the work confirms the possibility of obtaining high levels of the quality control when using the systems in question and the proposed method of calculation for the objects with the distributed parameters. It shows the curves of the transient processes' temperature control in a single distribution point object (steel plate), and two closely spaced points. It was demonstrated that the use of the considered systems and the distributed amplifier links ensured a virtually independent temperature control in the two areas of the object.

Keywords: automatic control system, object with delay, parallel correcting device, transition process, aperiodic element of the first order, object of regulation, transfer function, object with distributed parameters, amplifier link, curves of the transient processes

For citation:

Afanasyev G. D., Afanasyeva I. G. Calculation of the Parameters of the Distributed Automatic Control Systems with Parallel Corrective Devices, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no 1, pp. 227—232.

DOI: 10.17587/mau/17.227-232

References

1. **Malkov A. V., Pershin I. M.** *Sistemy s raspredelyonnymi parametrami. Analiz i sintez* (Systems with distributed parameters. Analysis and Synthesis), Moscow, Nauchnyj mir, 2012, 473 p. (in Russian).
2. **Filimonov A. B., Filimonov N. B.** *Oprobleme soglasno-paralleln'oj korektsii sistem regulirovaniya* (Concerning the Problem of a Parallel Feedforward Correction of the Regulation Systems), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2015, vol. 16, no. 8, p. 507—514 (in Russian).
3. **Afanas'ev G. D.** *Odin iz sposobov postroeniya astaticheskikh SAR* (One of the ways for constructing astatic SAR), *Proc. of the Scientific Conf. "Vuzovskaya nauka Severo-Kavkazskomu federal'nomu okргу"*, Pyatigorsk, Publishing house of SKFU, 2013, p. 17—22 (in Russian).
4. **Afanas'ev G. D., Afanas'eva I. G.** *Raschyot sistem avtomaticheskogo regulirovaniya s parallel'nym korrrektiruyushchim ustroystvom* (Automatic control systems with parallel correction device), *Sbornik nauchnykh trudov V Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii Sistemnyj analiz i prikladnaya sinergetika*, vol. 3, Pyatigorsk, Publishing house of SKFU, 2013, p. 18—24 (in Russian).
5. **Afanas'eva I. G.** *Raschyot parametrov SAR s parallel'nym korrrektiruyushchim ustroystvom i ob'ektom regulirovaniya s zapazdyvaniem* (Calculation of automatic control system with parallel correction devices and objects regulation with delay), *Sbornik nauchnykh trudov 2-j ezhegodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii prepodavatelej, studentov i molodykh uchyonnykh SKFU "Universitetskaya nauka regionu"*, vol. 1, Pyatigorsk, Publishing house of SKFU, 2014, p. 102—108 (in Russian).
6. **Afanas'eva I. G.** *Sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya s parallel'nym korrrektiruyushchim ustroystvom* (Automatic control systems with parallel correction device), *Proc. of the 7 th All-Russian Scientific. Con. "System synthesis and Applied Synergetics" (SSPS-2015)*, Taganrog, Publishing house of SFU, 2015, p. 196—205 (in Russian).
7. **Afanas'eva I. G.** *Ustojchivost' raspredelyonnykh sistem avtomaticheskogo regulirovaniya s parallel'nym korrrektiruyushchim ustroystvom* (Stability of distributed systems of automatic control with parallel corrective device), *V mire nauchnykh otkrytij*, Krasnoyarsk, Nauchno-innovacionnyj centr, 2015, no. 6. 1 (166), p. 462—475 (in Russian).
8. **Bar-Kana I.** *Parallel Feedforward and Simplified Adaptive Control*, *Int. Journ. Adapt. Control and Signal Processing*, 1987, vol. 1, p. 95—109.
9. **Bartolini G., Ferrara A., Stotsky A.** *Stability and Exponential Stability of an Adaptive Control Scheme for Plants of any Relative Degree*, *IEEE Trans. Autom. Contr.*, 1995, vol. 40, no. 1.
10. **Bessekerskij V. A., Popov E. P.** *Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* (The theory of automatic control systems), Moscow, Nauka, 1972, 767 p. (in Russian).
11. **Solodovnikov V. V.** *Tekhnicheskaya kibernetika. Teoriya avtomaticheskogo regulirovaniya. Kn. 1. Matematicheskoe opisaniye, analiz ustojchivosti i kachestva sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* (Theory of automatic regulation. Book 1. Mathematical description, analysis of the stability and quality of the automatic control systems), Moscow, Mashinostroenie, 1967, 768 p. (in Russian).
12. **Pershin I. M.** *Sintez sistem s raspredelyonnymi parametrami* (Synthesis systems with distributed parameters), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2005, no. 6, p. 235—241 (in Russian).
13. **Lykov A. V.** *Teoriya teploprovodnosti* (The theory of thermal conductivity), Moscow, Vysshaya shkola, 1967, 599 p. (in Russian).
14. **Yurnev V. N., Lebedev P. D. ed.** *Teplokhimicheskij spravochnik* (Thermotechnical reference book), vol. 2, Moscow, Energiya, 1976, 896 p. (in Russian).
15. **Olejnikov V. A., Tikhonov O. V.** *Avtomatizatsiya obogatitelnykh fabrik* (Automation of concentrating factories), Leningrad, Nedra, 1966, 325 p. (in Russian).
16. **Pershin I. M.** *Sintez sistem s raspredelennymi parametrami* (Synthesis of systems with distributed parameters), Pyatigorsk, Publishing house of "RIO KVM", 2002, 212 p. (in Russian).