

УДК 28;62-52

С. В. Зайцев [S. V. Zaitsev]

## АДАПТИВНЫЙ РАСПРЕДЕЛЕННЫЙ ПРОПОРЦИОНАЛЬНО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ РЕГУЛЯТОР

## ADAPTIVE DISTRIBUTED PROPORTIONALLY-DIFFERENTIAL REGULATOR

ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», Институт сервиса, туризма и дизайна (филиал) г. Пятигорск, Россия / North Caucasus Federal University, Institute of service, tourism and design (branch) of NCFU in Pyatigorsk, Russia, e-mail: zaitsev.knv@gmail.com

**Аннотация.** В промышленности используются различные системы управления параметрами объекта такими как температура, давление и т. д. Очень часто объект имеет распределенную систему распределения подачи регулирующего воздействия.

**Материалы и методы, результаты и обсуждения.** В статье предложен метод синтеза, основанный на частотных свойствах пространственных объектов управления и адаптивная настройка распределенного пропорционально-дифференциального регулятора.

Адаптивная настройка распределенного регулятора заключается в реализации следующих этапов: - определение параметров объекта; - определение параметров распределенного регулятора; - адаптивная настройка параметров регулятора в процессе работы, если это необходимо для достижения приемлемых показателей качества регулирования. Реализация регулятора выполнялась на языке «FBD» в программном комплексе «CoDeSys».

**Заключение:** данный метод позволяет компенсировать трудность получения параметров регулятора РПДР, которые получены при синтезе регулятора из-за его не инвариантности. Реализация программы адаптации может быть выполнена с использованием языка «ST», а сам регулятор может быть реализован на языке «FBD».

**Ключевые слова:** регулятор, адаптивный распределенный пропорционально-дифференциальный регулятор.

**Abstract.** In industry, various systems are used to control object parameters such as temperature, pressure, etc.. Very often, the object has a distributed distribution system for the supply of regulatory influence.

**Materials and methods.** The article proposes a synthesis method based on the frequency properties of spatial control objects and adaptive tuning of a distributed proportionally differential controller. Adaptive adjustment of a distributed controller consists of the following steps: - determining the object parameters; - determining the parameters of a distributed controller; - adaptive adjustment of the controller parameters during operation, if this is necessary to achieve acceptable control quality indicators.

The controller was implemented in the "FBD" language in the "CoDeSys" software package.

**Conclusion:** this method makes it possible to compensate for the difficulty of obtaining the parameters of the RPDR controller, which were obtained during the synthesis of the controller due to its non-invariant nature. The implementation of the adaptation program can be performed using the "ST" language, and the controller itself can be implemented in the "FBD" language.

**Key words:** regulator, adaptive distributed proportionally-differential regulator.

**Введение.** В промышленности используются различные системы управления параметрами объекта такими как температура, давление и т. д. . Очень часто объект имеет распределенную систему распределения подачи регулирующего воздействия. Однако сама система управления работает как сосредоточенная (система управления регулирует мощность во всех зонах одновременно и пропорционально). Многие печи подают тепловую мощность по зонам и при этом технологический процесс требует регулирования подачи тепловой мощности по зонам. Однако загруженность печей может быть неравномерной, что создает неравномерность тепловых полей. Технологические процессы к тому же требуют иногда и неравномерное распределение температуры по протяженности печи. Стандартные регуляторы не могут обеспечить условия равномерности или необходимой неравномерности распределения температуры по длине печи. Поэтому для таких технологических требований разрабатываются распределенные регуляторы. Широкому использованию таких регуляторов препятствует сложность методов синтеза и не достаточная подготовка персонала для обслуживания и настройки регуляторов на производстве. Хорошо синтезируются пространственные регуляторы, которые относятся к классу пространственно инвариантных. Однако многие объекты относятся к объектам пространственно не инвариантным, что затрудняет синтез распределенного регулятора как многомерной или распределенной системы [1, 2, 3, 4].

**Материалы и методы, результаты и обсуждения.** Возможным решением этих проблем является разработка методов адаптивной настройки распределенного регулятора. Исследования методов адаптации и проверка результатов методов синтеза [3, 4] проводились на лабораторном стенде [7].

Адаптивная настройка распределенного регулятора заключается в реализации следующих этапов: - определение параметров объекта; - определение параметров распределенного регулятора; - адаптивная настройка параметров регулятора в процессе работы, если это необходимо для достижения приемлемых показателей качества регулирования.

Определение параметров объекта производится методами согласно литературе [1, 2] или с использованием вектор – функции и разложения в ряд Фурье по пространственным модам [3]. Определение параметров регулятора основывается на частотных методах синтеза распределенного регулятора. Первый метод синтеза заключается в использовании модифицированной матрицы комплексных передаточных коэффициентов и спектров Гершгорина [6]. Второй метод основывается на определении модулей передачи по выбранным пространственным модам [4].

В настоящей статье рассмотрим один из вариантов адаптивного распределенного пропорционально-дифференциального регулятора (РПДР). Передаточная функция такого регулятора имеет вид [3]

$$W(G, s) = E_1 \left( \frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{G}{n_1} \right) + E_2 \left( \frac{n_2 - 1}{n_2} + \frac{G}{n_2} \right) s \quad (1)$$

где  $G$  – обобщенная координата;  $S$  – оператор Лапласа

$n_1$  – весовой коэффициент распределенного пропорционального звена,

$n_2$  – весовой коэффициент распределенного дифференциального звена,

$E_1$  – коэффициент пропорциональности распределенного пропорционального звена,

$E_2$  – коэффициент пропорциональности распределенного дифференциального звена;

$s$  – оператор Лапласа.

Для выполнения технологических требований в системах с распределенными параметрами важным условием является выбор ширины зоны  $\Delta G$ , которая определяется через частоты среза по первой и желательной последней моде и обобщенный коэффициент усиления распределенного усилительного звена. Зона  $\Delta G$ , определяется по формуле:

$$\Delta G = \lg(\omega_i) - \lg(\omega_1) \quad (2)$$

где  $\omega_i$  – частота среза выбранной моды;

$\omega_1$  – частота среза первой моды.

Расширение зоны  $\Delta G$  уменьшает амплитуду колебаний в установившемся режиме и немного увеличивает статическую ошибку, но практически не влияет на перерегулирование, при больших уровнях начального рассогласования или при запуске системы. Для снижения уровня перерегулирования возможным методом является изменение обобщенного коэффициента усиления определенным при синтезе в зависимости от величины рассогласования между уставкой и текущим значением координаты. Подобный метод используется фирмой «Овен» для сосредоточенных регуляторов [8].

Для снижения ошибки регулирования необходимо увеличить обобщенный коэффициент усиления пропорционального распределенного звена ( $K_1$ ), который определяется по формуле:

$$K_1 = E_1 \left( \frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{G_1}{n_1} \right); \quad (3)$$

где  $n_1$  – весовой коэффициент распределенного усилительного звена;

$E_1$  – коэффициент пропорциональности распределенного усилительного звена;

$G_1 = \left( \frac{\pi}{L_x} \right)^2$  – первая пространственная мода,  $L_x$  – длина туннельной печи.

На показатели качества регулирования в установившемся режиме существенно зависят от параметров  $K_1$  и  $\Delta G$ . Определим каким образом расширение зоны  $\Delta G$  Определим каким образом расширение зоны  $\Delta G$  влияет на параметры  $E_2$ .

Параметры  $n_1$ , и  $E_1$  определяется следующим образом:

Исходя из испытаний объекта определяем соотношение модулей коэффициентов передачи

$$\Delta M = \frac{K_{y,i}}{K_{y1}}; \quad (4)$$

где  $K_{y,i}$  – коэффициент усиления по выбранной моде;  $K_{y1}$  – коэффициент усиления по первой моде

Если  $\Delta M < 1$ , то  $n_1$  определяем:

$$n_1 = \frac{-1 + \Delta M - \Delta M G_i + G_1}{\Delta M - 1}; \quad (5)$$

Затем определяем  $E_1$  по формуле:

$$E_1 = \frac{K_{y1} n_1}{n_1 - 1 + G_1}; \quad (6)$$

После определения  $E_1$  определяем с учетом запаса устойчивости по фазе равное  $-\Delta\varphi = 30^\circ$ . Через отношение выбранных частот среза по формуле:

$$\Delta\omega^2 = \frac{\omega_{cpi}^2}{\omega_{cp1}^2}; \quad (7)$$

где  $\omega_{cpi}$  – частота среза по выбранной моде;  $\omega_{cp1}$  – частота среза по первой моде

Определяем  $n_2$  по формуле:

$$n_2 = \frac{\Delta\omega^2 - 1 + G_1 - \Delta\omega^2 \cdot G_2}{\Delta\omega^2 - 1}; \quad (8)$$

Через определение зоны  $\Delta G$  по формуле (2) определяем  $E_2$  по формуле:

$$E_2 = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{n_2 - 1 + G_1}{n_2}\right)^2 \cdot 10 \Delta(\omega_{cp1})^2}}; \quad (9)$$

Синтез системы управления на этом закончен. Переходим к адаптации системы управления, если полученные в процессе работы характеристики качества системы управления не соответствуют требуемым характеристикам качества управления технологическим процессом. Предлагаем следующий алгоритм адаптации:

– если колебательность системы выше заданной, то коэффициент пропорциональности распределенного пропорционального звена  $E_1$ , необходимо уменьшить, а коэффициент пропорциональности распределенного дифференциального звена  $E_2$  необходимо увеличить;

– если колебательность системы не выше заданной, а статическая ошибка регулирования больше заданной, то коэффициент пропорциональности распределенного пропорционального звена  $E_1$ , необходимо увеличить, а коэффициент пропорциональности распределенного дифференциального звена  $E_2$  необходимо уменьшить;

– после двух циклов изменения параметров РПДР можно рассчитать предполагаемое необходимое значение параметров для достижения требуемых характеристик качества регулирования

Алгоритм такой работы приведен на рис. 1 ниже и реализован на языке «ST» в программном комплексе «CoDeSys», который использует фирма ОВЕН на своих программируемых контроллерах.

Реализация регулятора выполнена на языке «FBD» в программном комплексе «CoDeSys». и На рис. 2 представлена пропорциональная составляющая регулятора для 3-х зонной печи с трубчатыми электрическими нагревателями тепловая мощность которых регулируется с помощью блока управления симисторами тиристорами (БУСТ). На рис. 3 показана дифференцирующая составляющая регулятора.



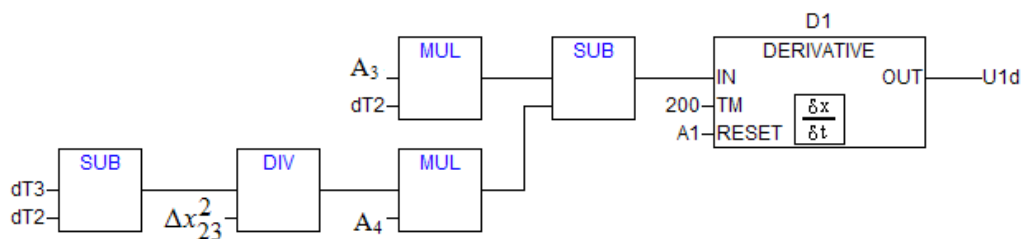


Рис. 3 Дифференцирующая составляющая ПИД регулятора / Fig. 3. Differentiating component of the PIDR

Блоки, используемые в алгоритме реализации:

SUB блок вычитания, MUL-блок умножения, ADD-блок сложения, DIV-блок деления, DERIVATIVE-блок дифференцирования, INTEGRAL-блок интегрирования, DIG\_FLTR-блок цифровой фильтрации входного сигнала.

Сигналы, используемые в алгоритме реализации:

in\_T2, in\_T3, in\_T4 – соответственно сигналы от датчиков температуры 1 - 3 каналов;

– U1, U2, U3 сигналы управляющего воздействия на усилитель мощности (БУСТ);

– U1d, U2d, U3d – сигналы дифференциальной составляющей по соответствующим каналам управления;

– T<sub>зд</sub>- сигнал задания температуры объекта;

–  $\Delta x_{23}^2$  – квадрат расстояния между зонами нагрева;

– A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, постоянные коэффициенты пространственного регулятора, вычисленные при синтезе регулятора.

**Заключение:** данный метод позволяет скомпенсировать трудность получения параметров регулятора РПДР, которые получены при синтезе регулятора из-за его не инвариантности. Реализация программы адаптации может быть выполнена с использованием языка «ST», а сам регулятор может быть реализован на языке «FBD»

## ЛИТЕРАТУРА

1. Александров А. Г. Паленов М. В. Состояние и перспективы развития адаптивных ПИД регуляторов в технических системах// Труды участников конференции УКИ'12 / Научное издание. Электрон. текстовые дан. М.: ИПУ РАН, 2012. 36-48 с.
2. Александров А. Г. Паленов М. В. Состояние и перспективы развития адаптивных ПИД регуляторов в технических системах// Автоматика и телемеханика № 2. 2014. 16-30 с.
3. Першин И. М. Анализ и синтез систем с распределенными параметрами. Пятигорск: Изд-во РИА КМВ, 2007. 244 с.
4. Першин И. М. Синтез систем с распределенными параметрами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 6. С. 2.
5. Воронин А. Ю., Зайцев С. В. Синтез пространственного регулятора тепловой камеры пищевого производства// Системный анализ и прикладная синергетика: тезисы доклада на 4 международной конференции г. Пятигорск, 2011. С. 194-199.
6. Зайцев С. В. Методика адаптивной настройки РВР// Материалы Всероссийской научной конференции «Вузовская наука Северо-Кавказскому федеральному округу» Т 3 (часть 1). Пятигорск: ФГАОУ ВПО СКФУ филиал в г. Пятигорске, 2013. 215 с.
7. Зайцев С. В. Повышение эффективности образования за счет использования моделирующих лабораторных комплексов с удаленным доступом //Машиностроение и инженерное образование. М., 2012. № 1. 325 с.
8. [Электронный ресурс]: <http://www.owen.ru>, e-mail: support@owen.ru

## REFERENCES

1. Aleksandrov A. G., Palenov M. V. Sostojanie i perspektivy razvitiya adaptivnyh PID reguljatorov v tehniceskix sistemah [Status and prospects of development of adaptive PID controllers in technical systems] // 'Trudy uchastnikov konferencii UKI'12 / Nauchnoe izdanie. Jelektron. tekstovye dan. M.: IPU RAN, 2012. 36-48 s.
2. Aleksandrov A. G., Palenov M. V. Sostojanie i perspektivy razvitiya adaptivnyh PID reguljatorov v tehniceskix sistemah [Status and prospects of development of adaptive PID controllers in technical systems] Avtomatika i telemehanika № 2, 2014. 16-30 s.
3. Pershin I.M. Analiz i sintez sistem s raspredeleennyimi parametrami [Analysis and synthesis of systems with distributed parameters]. Pjatigorsk: izd-vo RIA KMV, 2007. 244 s.
4. Pershin I. M. Sintez sistem s raspredeleennyimi parametrami [Synthesis of distributed parameter systems] // Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie. 2005. № 6. S. 2.

5. Voronin A. Ju., Zaitsev S. V. Sintez prostranstvennogo reguljatora teplovoj kamery pishhevogo proizvodstva [Synthesis of spatial control of the heat chamber of food production] // Sistemnyj analiz i prikladnaja sinergetika: tezisy doklada na 4 mezhdunarodnoj konferencii g. Pjatigorsk, 2011. 194-199 s.

6. Zaitsev S. V. Metodika adaptivnoj nastrojki RVR [Methods of adaptive adjustment PBP] // Materialy Vserossijskoj nauchnoj konferencii «Vuzovskaja nauka Severo-Kavkazskomu federal'nomu okrugu». T 3 (chast' 1). Pjatigorsk: FGAOU VPO SKFU filial v g. Pjatigorske, 2013. 215 s.

7. Zaitsev S. V. Rise efficacy education with use modeling laboratorial set with distance access // Machine-building and engineering education. M., 2012. №1. 325 s.

8. [Elektronnyy resurs]: <http://www.owen.ru>, e-mail: support@owen.ru

#### ОБ АВТОРЕ

**Зайцев Сергей Владиленович**, доцент кафедры управления в технических системах Северо-Кавказский Федеральный Университет филиал в г. Пятигорске (Институт сервиса, туризма и дизайна), ул. Ореховая, 42, г. Ессентуки, 357600, Россия, e-mail: zaytsev.kmv@gmail.com

**Zajcev Sergej Vladilenovich**, Associate Professor of Department of Management in engineering and biomedical systems, North-Caucasus Federal University (branch) in Pyatigorsk, 42, Orekhovaja street, Essentuki, Stavropol Region, 357600, Russia, e-mail: zaytsev.kmv@gmail.com

Дата поступления в редакцию: 16.07.2019

После рецензирования: 15.08.2019

Дата принятия к публикации: 04.09.2019