

РЕАЛИЗАЦИЯ АДАПТИВНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ

С. В. Зайцев

*Институт сервиса, туризма и дизайна Северо-Кавказского федерального университета,
Ставропольский край, Пятигорск, Российская Федерация*

Рассмотрены вопросы синтеза различных распределенных регуляторов и методы реализации системы адаптации этих регуляторов. Каждый вид распределенного регулятора имеет в своих передаточных функциях свои параметры. Параметры регулятора получаются после исследования и идентификации распределенного объекта управления. В передаточных функциях имеются два параметра, которые можно изменять, добиваясь качественных переходных процессов в системе управления. Такими параметрами являются весовой коэффициент распределенного звена n_i и коэффициент пропорциональности распределенного звена E_i . Параметры распределенного звена G и s зависят от конструкции объекта и от времени (или выбранного интервала дискретизации работы цифрового регулятора) соответственно. На основании синтеза параметров распределенных регуляторов предложены методы реализации адаптивной настройки различных регуляторов. В настоящее время имеются следующие регуляторы: распределенный высокоточный регулятор, пространственно-усилительный регулятор, пространственно-дифференцирующий усилительный регулятор, пространственно-изодромный регулятор для распределенных систем управления. Рассмотрен вариант реализации части распределенного РВВ регулятора, показано, в какой части его необходимо адаптировать. Тип регулятора выбирается исходя из задач, решаемых системой управления распределенным объектом. В зависимости от типа выбранного регулятора в реализации блоков регулятора можно использовать стандартные блоки интегрирования и дифференцирования, имеющиеся в различных языках программирования для программируемых логических контроллеров. Пример, приведенный в статье, разработан с помощью программного комплекса CoDeSys, поставляемого вместе с программируемым логическим контроллером фирмы «ОВЕН».

Ключевые слова: реализация, распределенные звенья, регулятор, система управления.

Для цитирования: *Зайцев С. В.* Реализация адаптивных регуляторов в распределенных системах управления // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2020. № 3. С. 99–104. DOI: 10.24143/2072-9502-2020-3-99-104.

Введение

Современное производство в основном использует регуляторы, которые рассматривают объекты управления как объекты с сосредоточенными параметрами. К регуляторам такого типа относятся регуляторы, выпускаемые фирмами «ОВЕН», Siemens, Omron, Delta. Эти регуляторы имеют функции не только задания параметров для реализации законов регулирования ПИД (пропорционально-интегрально-дифференциальный), ПИ (пропорционально-интегральный), но и самонастройки этих параметров при проведении режима идентификации объекта [1]. Однако многие объекты на производстве являются объектами с распределенными параметрами, т. к. имеют большую протяженность или требуют неравномерного распределения координат (параметров технологического процесса) управления, например роторные или туннельные печи обжига или сушки различных материалов. Управление такими объектами не может быть реализовано в соответствии с требованиями к технологическим процессам, или потребуются несколько регуляторов для каждой зоны регулирования. Реализация современных регуляторов практически не использует аппаратные методы, а в большинстве случаев применяет программные методы для использования в системах управления. Когда регуляторы не являются отдельными блоками, они входят в локальную систему управления в виде программы, которая входит в состав программного комплекса системы управления. Такие программы реализуются с помощью программируемых логических контроллеров (ПЛК), которые используются в распределенных системах управления в качестве одного из составных элементов. Основным элементом ПЛК

является микроконтроллер. Производительность ПЛК такая же, как у других современных процессоров персональных ЭВМ, поэтому реализация предложенных ниже алгоритмов разрабатывались и проверялись на ПЛК.

Виды распределенных регуляторов и методы определения их параметров

Рассмотрим различные распределенные регуляторы и методы их синтеза и адаптации, предлагаемые в литературе [2, 3].

Передаточная функция *распределенного высокоточного регулятора* (РВР) имеет следующий вид:

$$W(G, s) = E_1 \left(\frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{G}{n_1} \right) + E_2 \left(\frac{n_2 - 1}{n_2} + \frac{G}{n_2} \right) s + E_4 \left(\frac{n_4 - 1}{n_4} + \frac{G}{n_4} \right) \frac{1}{s},$$

где G – обобщенная координата; s – оператор Лапласа; n_1 – весовой коэффициент распределенного усилительного звена; n_2 – весовой коэффициент распределенного дифференцирующего звена; n_4 – весовой коэффициент интегрального распределенного звена; E_1 – коэффициент пропорциональности распределенного усилительного звена; E_2 – коэффициент пропорциональности распределенного дифференцирующего звена; E_4 – коэффициент пропорциональности распределенного интегрального звена и распределенных звеньев.

Передаточная функция *пространственно-изодромного регулятора* имеет следующий вид:

$$W(G, s) = E_5 \left(\frac{n_5 - 1}{n_5} + \frac{G}{n_5} \right) \frac{1}{s} + 1,$$

где n_5 – весовой коэффициент изодромного распределенного звена; E_5 – коэффициент пропорциональности распределенного звена.

Передаточная функция *пространственно-дифференцирующего усилительного регулятора* имеет вид

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

Передаточная функция *распределенного пропорционального регулятора* (РПР) имеет следующий вид:

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

Параметр G определяется исходя из конструкции объекта согласно [1]:

$$G_i = \left(\frac{i\pi}{L_x} \right)^2,$$

где i – соответствующая пространственная мода $i = 1, 2, 3, \dots$; L_x – протяженность объекта по соответствующей координате.

Параметры n_i и E_i определяются исходя из идентификации объекта, синтеза выбранного регулятора, путем решения системы уравнений, полученных из пространственной модальной матрицы. Желательно выбрать первую и последнюю моды. Согласно теории литературы [1], чем дальше моды находятся друг от друга, тем их статические коэффициенты передачи отличаются сильнее, а влияние зон регулирования слабее. Уравнения 1-й и 3-й моды для пропорционального звена имеют вид [4]

$$\bar{M}_1 = E_1 \left[\frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{G_1}{n_1} \right];$$

$$\bar{M}_3 = E_1 \left[\frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{G_3}{n_1} \right],$$

где \bar{M}_1 – статический коэффициент передачи по 1-й моде; \bar{M}_3 – статический коэффициент передачи по 3-й моде. В нашем случае взяты 1-я и 3-я мода, которая является последней, исходя из конструкции нашего объекта.

Из уравнений получаем формулу $n_1 = \frac{-1 + \Delta M - \Delta M \cdot G_1 + G_3}{\Delta M - 1}$, где $\Delta M = \bar{M}_3 \div \bar{M}_1$.

Для пропорционального звена параметром адаптации является коэффициент E_1 . Соответственно для звеньев интегрального и дифференциального – E_4, E_2 .

Кроме того, важным параметром для адаптации является параметр частоты среза для дифференциального блока, полученный заменой $s = j\omega$: $\lg \omega_1 = \lg \left(\frac{1}{K_2(G)} \right)$, где

$K_2(G) = E_2 \left(\frac{n_2 - 1}{n_2} + \frac{G}{n_2} \right) j\omega$, и для интегрального блока $\lg \omega_2 = \lg (K_4(G))$, где

$$K_4(G) = E_4 \left(\frac{n_2 - 1}{n_2} + \frac{G}{n_2} \right) \frac{1}{j\omega}.$$

Для РВР важным параметром, который определяет качество переходных процессов, является зона $\Delta(G_1) = \lg \omega_1 - \lg \omega_2$, которая при смещении $\lg \omega_2$ в область более низких частот (а $\lg \omega_1$ – при смещении в область более высоких частот) расширяет частотную зону работы пропорционального звена. Это приводит к снижению колебательности переходного процесса. Данная зона находится между точками перегиба амплитудно-частотной пространственной характеристики при переходе от преимущественно интегральной составляющей к пропорциональной и от пропорциональной преимущественно к дифференциальной (рис. 1).

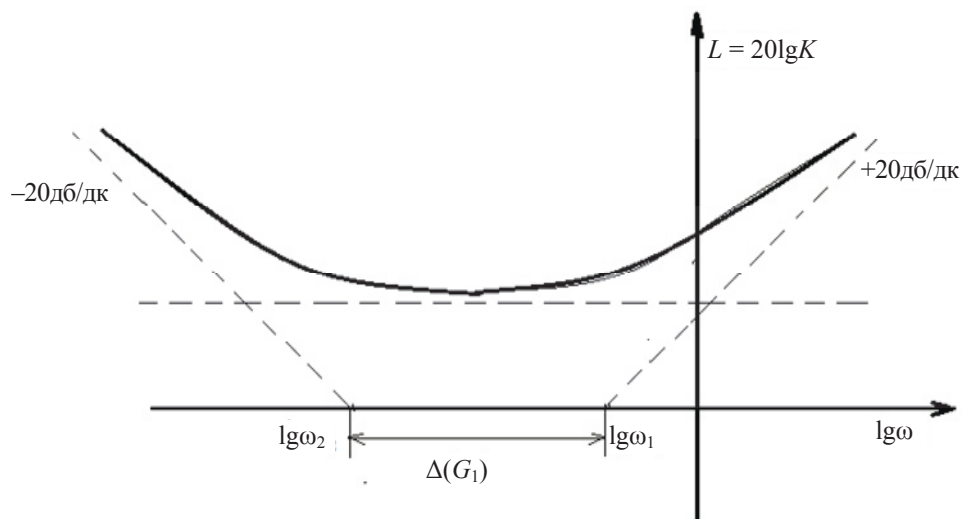


Рис. 1. Амплитудно-частотная характеристика регулятора [5]

Частоты среза ω_1 и ω_2 влияют на коэффициенты регулятора n_2 и n_4 соответственно, которые выбираются по формулам: для n_2 : $n_2 = \frac{\Delta\omega^2 - 1 + G_i - \Delta\omega^2 \cdot G_1}{\Delta\omega^2 - 1}$, для n_4 : $n_4 = \frac{\Delta\omega^2 - 1 + G_1 - \Delta\omega^2 \cdot G_i}{\Delta\omega^2 - 1}$, где $\Delta\omega^2$ определяется по формуле $\Delta\omega^2 = \frac{\omega_2^2}{\omega_1^2}$.

После определения $E_1, n_1, E_2, n_2, E_4, n_4$ в соответствии выбранным типом регулятора переходим к программной реализации регулятора.

Например, для первой зоны регулирования при выборе РВР такая реализация выглядит следующим образом (рис. 2).

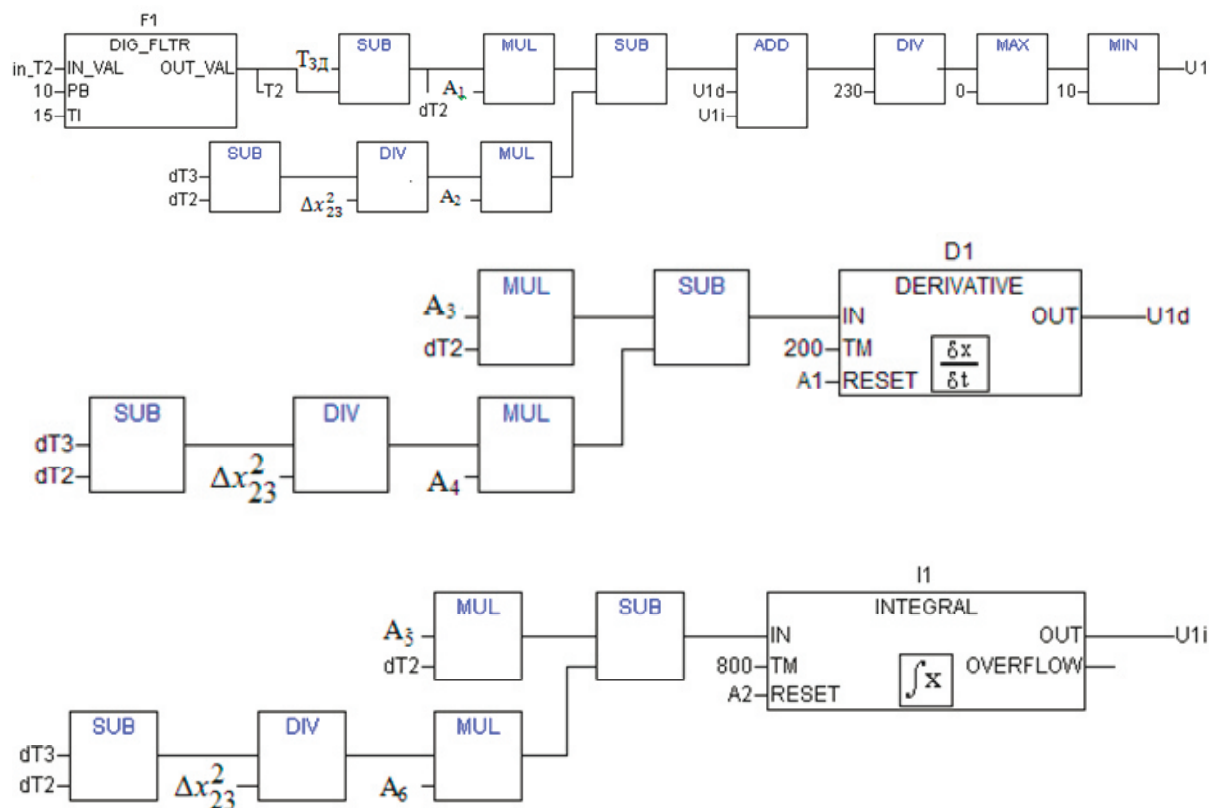


Рис. 2. Реализация регулятора для первой зоны регулирования:

SUB – блок вычитания; MUL – блок умножения; ADD – блок сложения; DIV – блок деления; DERIVATIVE (D_1) – блок дифференцирования; INTEGRAL – блок интегрирования; DIG_FLTR (F_1) – блок цифровой фильтрации входного сигнала; in_T_2 – сигнал от датчика температуры по первому каналу соответственно; U_1 – сигнал управляющего воздействия на усилитель мощности; $U1d$ – сигнал дифференциальной составляющей по соответствующим каналам управления; $U1i$ – сигнал интегральной составляющей по соответствующим каналам управления; $T_{зд}$ – сигнал задания температуры объекта; Δx_{23}^2 – квадрат расстояния между зонами нагрева; A_1 – A_6 – постоянные коэффициенты пространственного регулятора; IN_VAL – входной сигнал для блока DIG_FLTR; OUT_VAL – выходной сигнал для блока DIG_FLTR; T_2 – вспомогательный индикационный сигнал; IN – входные сигналы соответствующих блоков; TM – интервалы временных задержек, определяются в соответствии с описанием блоков в CoDeSys; $RESET$ – сигнал периодического сброса блоков, выбирается исходя из недопущения переполнения памяти; OUT – выходные сигналы соответствующих блоков; $OVERFLOW$ – сигнал переполнения памяти блока интегрирования

Реализация написана на языке FBD программного комплекса CoDeSys, который применяется для различных ПЛК.

Коэффициенты A_1 – A_6 вычисляются как $E_1 \frac{n_1 - 1}{n_1} = A_1$; $E_1 \frac{1}{n_1} = A_2$; $E_2 \frac{n_2 - 1}{n_2} = A_3$; $E_2 \frac{1}{n_2} = A_4$; $E_4 \frac{n_4 - 1}{n_4} = A_5$; $E_4 \frac{1}{n_4} = A_6$. Эти коэффициенты программой адаптации могут меняться в соответствии с требуемыми показателями качества переходных процессов $dT_2 := |T_{21} - T_{22}|$; $dT_3 := |T_{31} - T_{32}|$, где T_{21} – текущая температура в начале временной задержки, T_{22} – текущая температура в конце временной задержки по первому каналу; T_{31} – текущая температура в начале временной задержки, T_{32} – текущая температура в конце временной задержки по второму каналу регулирования.

Аналогично реализуются блоки по другим зонам регулирования.

Заключение

Используя различные варианты регуляторов и их реализацию на ПЛК, можно реализовать адаптированную систему управления распределенным объектом. Методы адаптации, хотя и используют значительные вычислительные мощности ПЛК, позволяют вычислять и подбирать коэффициенты распределенного пространственного регулятора. Например для распределенного высокоточного регулятора подбираются параметры $(E_1, n_1, E_2, n_2, E_4, n_4)$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров А. Г., Паленов М. В. Состояние и перспективы развития адаптивных ПИД регуляторов в технических системах // Автоматика и телемеханика. 2014. № 2. С. 16–30.
2. Першин И. М. Анализ и синтез систем с распределенными параметрами. Пятигорск: Изд-во РИА КМВ, 2007. 244 с.
3. Быстров С. В., Григорьев В. В., Першин И. М., Мансурова О. К. Адаптивная настройка распределенных регуляторов // Изв. высш. учеб. заведений. Сер.: Приборостроение. 2019. Т. 62. № 9. С. 814–824.
4. Воронин А. Ю., Зайцев С. В. Синтез пространственного регулятора тепловой камеры пищевого производства // Системный анализ и прикладная синергетика: тез. докл. IV Междунар. конф. Пятигорск, 2011. С. 194–199.
5. Зайцев С. В. Методика адаптивной настройки РВП // Вузовская наука – Северо-Кавказскому федеральному округу: материалы Всерос. науч. конф. Пятигорск: Изд-во ФГАОУ ВПО СКФУ, 2013. Т. 3. Ч. 1. 215 с.

Статья поступила в редакцию 17.04.2020

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Зайцев Сергей Владиленович – Россия, 357500, Пятигорск; Институт сервиса, туризма и дизайна Северо-Кавказского федерального университета; доцент кафедры систем управления и информационных технологий; zaytsev.kmv@gmail.com.



REALIZATION OF ADAPTIVE REGULATORS IN DISTRIBUTION CONTROL SYSTEMS

S. V. Zaytsev

*Institute of Service, Tourism and Design, branch of North Caucasus Federal University,
Stavropol Region, Pyatigorsk, Russian Federation*

Abstract. The article considers the problems of synthesis of different distributed controllers and methods for implementing the adaptation the system of these controllers. Each type of distributed controllers has its own parameters in the transfer functions. The parameters of the controller can be

obtained after studying and identification of the distributed control object. In the transfer functions there are two parameters that can be changed in order to achieve the high-quality transient processes in the control system. These parameters are: weight coefficient of the distributed link n_i and the proportionality coefficient of the distributed link E_i . The parameters of the distributed link G and s depend on the object structure and on the time (or the selected sampling interval of the digital controller), respectively. According to the results of the synthesis of parameters of distributed controllers, there have been proposed the methods for implementing adaptive setup of different controllers. Currently, the following controllers are available: distributed high-precision controller, space-amplifying controller, space-differentiating amplifier controller, spatially-isodromic controller for distributed control systems. There has been considered implementing a distributed controller and shown in which part it is necessary to be adapted. The controller type is selected according to the tasks to be solved by the distributed object control system. Depending on the controller type, in the implementation of controller blocks, there can be used the standard integration and differentiation blocks available in different programming languages for programmable logic controllers. The example given in the article was developed using the CoDeSys software package supplied with OVEN programmable logic controller.

Key words: realization, distributed links, regulator, control system.

For citation: Zaytsev S. V. Realization of adaptive regulators in distribution control systems. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics.* 2020;3:99-104. (In Russ.) DOI: 10.24143/2072-9502-2020-3-99-104.

REFERENCES

1. Aleksandrov A. G., Palenov M. V. Sostoianie i perspektivy razvitiia adaptivnykh PID regulatorov v tekhnicheskikh sistemakh [Status and development prospects of adaptive PID controllers in technical systems]. *Avtomatika i telemekhanika*, 2014, no. 2, pp. 16-30.
2. Pershin I. M. *Analiz i sintez sistem s raspredelennymi parametrami* [Analysis and synthesis of systems with distributed parameters]. Piatigorsk, Izd-vo RIA KMV, 2007. 244 p.
3. Bystrov S. V., Grigor'ev V. V., Pershin I. M., Mansurova O. K. Adaptivnaia nastroyka raspredelennykh regulatorov [Adaptive setup of distributed controllers]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Seriya: Priborostroenie*, 2019, vol. 62, no. 9, pp. 814-824.
4. Voronin A. Iu., Zaitsev S. V. Sintez prostranstvennogo regulatora teplovoi kamery pishchevogo proizvodstva [Synthesis of spatial controller of heat chamber in food production]. *Sistemnyi analiz i prikladnaia sinergetika: tezisy doklada IV Mezhdunarodnoi konferentsii*. Piatigorsk, 2011. Pp. 194-199.
5. Zaitsev S. V. Metodika adaptivnoi nastroyki RVR [Adaptive setup technique of distributed high-precision regulator]. *Vuzovskaia nauka – Severo-Kavkazskomu federal'nomu okrugu: materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii*. Piatigorsk, Izd-vo FGAOU VPO SKFU, 2013. Vol. 3, part 1. 215 p.

The article submitted to the editors 17.04.2020

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Zaytsev Sergej Vladilenovich – Russia, 357500, Pyatigorsk; Institute of Service, Tourism and Design, branch of North Caucasus Federal University; Assistant Professor of the Department of Control Systems and Information Technologies; zaytsev.kmv@gmail.com.

