

REFERENCES

1. **Jamison, T. H.** (1992) Athermalization of Optical Instruments from the Optomechanical Viewpoint. *Optical Design*, Vol. CR43, 131–159.
2. **Jamison, T. H.** (1981) Thermal Effects in Optical Systems. *Optical Engineering*, 20 (2), 156–160.
3. **Tejada J.** (2006) Passive Athermalization: Maintaining Uniform Temperature Fluctuations. *Photonics Handbook, May 2006. Optical Design*, 341–345.
4. **Latyev, S. M.** (1985) *Error Compensation in Optical Devices*. Leningrad, Mashinostroenie. 248 p. (in Russian).
5. **Slyusarev, G. G.** (1969) *Calculation Methods for Optical Systems*. Leningrad, Mashinostroenie, 273–285 (in Russian).
6. **Kucherenko, O. K., & Muraviov, A. V.** (2011) Athermalization of Thermal Imagery Device Objective in Artillery and Tank Sighting Systems. *Artileriyskoye i Strelkovoye Vooruzhenie* [Artillery Armament and Small Arms], 3, 28–33 (in Russian).
7. **Kucherenko, O. K., Muraviov, O. V., & Tiagur, V. M.** (2012) Achromatization and Athermazation of Objectives in Infrared Equipment. *Naukovi Visti Natsional'nogo Tekhnichnogo Universitetu Ukraini "Kiivs'kii Politekhnichnii Institut"* [Science News National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"], 5, 114–117 (in Ukrainian).
8. **Kucherenko, O. K., Muraviov, O. V., Ostapenko, D. O.** (2013) Influence of Temperature on Operational Characteristics of Objectives. *Naukovi Visti Natsional'nogo Tekhnichnogo Universitetu Ukraini "Kiivs'kii Politekhnichnii Institut"* [Science News National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"], 1, 99–105 (in Ukrainian).
9. **Tiagur, V. M., Kucherenko, O. K., & Muraviov, A. V.** (2014) Passive Optical Athermalization of Infrared Three-Lens Achromat. *Optichesky Zhurnal* [Optical Journal], 4, 42–47 (in Russian).
10. **Sokolsky, M. N., & Sovz, I. E.** (2012) High-Aperture Objective for Infrared Spectral Region. Patent RF No 2449327 (in Russian).

Поступила 24.01.2014

УДК 681.515

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ С ЦИФРОВЫМИ РЕГУЛЯТОРАМИ

Канд. техн. наук, доц. СТРИЖНЕВ А. Г.¹⁾, асп. РУСАКОВИЧ А. Н.²⁾

¹⁾Научно-производственное общество с ограниченной ответственностью «ОКБ ТСП»,

²⁾Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

E-mail: skb@tspb.com

В статье рассматривается проблема синтеза систем автоматического управления, работающих в различных режимах, например обработки скачкообразных воздействий и слежения за медленно изменяющимися входными сигналами. В большинстве случаев один регулятор не позволяет достичь требуемых показателей качества работы во всех режимах. Одним из способов решения данной задачи может служить создание системы переменной структуры. Предложена система автоматического управления переменной структуры, содержащая два цифровых регулятора, один из которых включен в прямую цепь последовательно, а второй – параллельно объекту управления, имеющему дополнительный усилитель и единичную обратную связь. Такая схема построения отличается простотой и обладает хорошим качеством при обработке ступенчатых и синусоидальных входных сигналов различной амплитуды.

Представлена разработанная структурная схема системы переменной структуры и описан принцип ее действия. Для проверки работы системы выбраны три различных объекта управления. С учетом требований, предъявляемых к качеству функционирования системы, выбраны цифровые регуляторы и определены их параметры. Для проверки работы предложенной системы с различными объектами управления и цифровыми регуляторами проведено математическое моделирование. Подтверждены хорошее быстродействие системы автоматического управления при обработке ступенчатых сигналов, обеспечение минимальной для данных регуляторов динамической ошибки и времени запаздывания при обработке гармонических воздействий различной амплитуды. Полученные результаты доведены до инженерного уровня и могут быть использованы при создании систем автоматического управления, содержащих другие объекты управления и цифровые регуляторы, к качеству работы которых предъявляются различные, порой противоречивые требования.

Ключевые слова: цифровая система автоматического управления переменной структуры, прямая цепь, обратная связь, цифровой регулятор, объект управления.

Ил. 4. Табл. 4. Библиогр.: 10 назв.

RECONFIGURABLE CONTROL SYSTEM WITH DISCRETE-TIME CONTROLLERS

STRIZHNEV A. G.¹⁾, RUSAKOVICH A. N.²⁾

¹⁾Research and Development Limited Liability Company "OKB TSP",

²⁾Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

The paper considers a synthesis problem for automatic control systems, which operate in various modes, for example, tracking step-wise effects and slowly changing input signals. Generally, one controller cannot ensure the required qualitative characteristics in all operational modes. One of the methods to solve this problem is to create a reconfigurable control system. The authors propose a reconfigurable control system with two discrete-time controllers. The first one is placed in series with the forward path and the second one is connected in parallel with the reverse path having additional gain and unity feedback. Such system structure is characterized by its simplicity and qualitative operational ability to track step-wise and sinusoidal inputs with different amplitudes.

The paper presents a developed block diagram of the reconfigurable system and describes its operational principle. Three various plants have been chosen with the purpose to check the operation of the system. Digital controllers have been selected and their parameters have been determined in accordance with the requirements to qualitative operational characteristics of the system. Mathematical modeling has been executed in order to check the operation of the proposed system with various plants and digital controllers. The modeling confirms good speed performance of the automatic control system while tracking step-wise signals, provision of minimum dynamic error for the given controllers and time delay while tracking harmonic signals with various amplitudes. The obtained results have been successfully tested and can be used for development of automatic control systems that contain other plants and digital controllers, if there are various and occasionally contradictory requirements to their operational quality.

Keywords: reconfigurable control system, forward path, feedback, discrete-time controller, plant.

Fig. 4. Tab. 4. Ref.: 10 titles.

Введение. Синтез регуляторов (корректирующих устройств) систем автоматического управления (САУ) – одна из важнейших задач, изучаемых теорией автоматического управления, которая является весьма сложной, неоднозначной, требующей творческого подхода. При решении указанной задачи необходимо учитывать особенности работы конкретных систем управления, их конструкцию, технические характеристики, вид входного воздействия. Проблема синтеза корректирующих устройств в большинстве случаев точно не решается [1].

Система, оптимальная с точки зрения одного критерия, обычно не имеет оптимальных характеристик по другому критерию. Кроме того, многие САУ работают в нескольких режимах, например обработки больших скачкообразных воздействий и слежения за медленно изменяющимися входными сигналами. Один из способов решения данной задачи – создание системы переменной структуры (СПС) [2–5], которую можно выполнить оптимальной по нескольким критериям. Под СПС следует понимать систему, содержащую несколько законов управления, которые переключаются в процессе функционирования и тем самым обеспечивают более высокие показатели качества работы. В зависимости от того, какие коор-

динаты системы и внешние воздействия доступны для измерения, переключение может происходить по величине ошибки, выходной координаты исполнительного устройства, задающего или возмущающего воздействий, регулируемого параметра [2]. Примером такой системы может служить САУ, содержащая ПИД-регулятор, параметры которого переключаются в зависимости от состояния элементов САУ [4], или САУ, содержащая в прямой цепи два цифровых корректирующих устройства, переключаемых в зависимости от величины ошибки рассогласования [6].

СПС можно реализовать и иначе. В статье предлагается вариант реализации СПС с применением двух переключаемых по выходу цифровых регуляторов (ЦР), один из которых включен в прямую цепь последовательно, а второй – в обратную связь, параллельно объекту управления (ОУ), имеющему дополнительный усилитель и единичную обратную связь. Коммутация выходов ЦР осуществляется в момент достижения величины ошибки определенного порога с некоторым гистерезисом [7]. Такая схема построения отличается простотой и обладает хорошим качеством при обработке ступенчатых и синусоидальных сигналов различной амплитуды.

Разработка схемы цифровой системы переменной структуры. Для обработки ступенчатых и синусоидальных сигналов различной амплитуды разработана схема цифровой СПС, которая приведена на рис. 1.

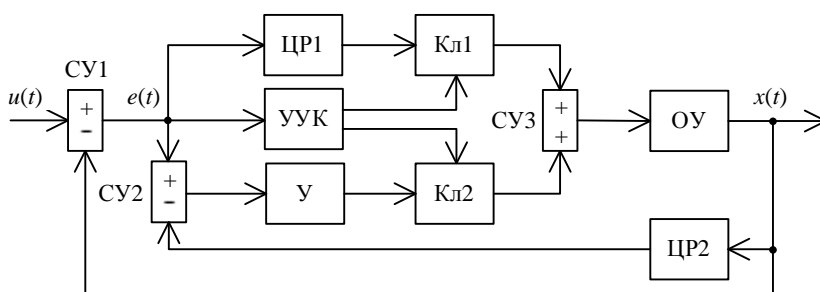


Рис.1. Схема цифровой СПС

Первая структура содержит сравнивающее устройство СУ1, цифровой регулятор ЦР1, коммутатор (ключ Кл1), ОУ и служит для обработки ошибки рассогласования не больше заданной e_1 . Вторая структура, кроме СУ1 и ОУ, включает блоки ЦР2, Кл2, СУ2 и дополнительный усилитель У. Эта структура служит для обработки ошибки рассогласования, превышающей e_1 . Переключение структур осуществляется при помощи устройства управления ключами УУК с некоторым гистерезисом, исключающим частое переключение вперед и назад. Когда ошибка рассогласования не превышает по модулю значения e_1 , ключ Кл1 замкнут, ключ Кл2 разомкнут, и работает первая структура. Когда ошибка рассогласования превышает величину e_1 , УУК срабатывает, ключ Кл1 размыкается, ключ Кл2 замыкается, и работает вторая структура. Возвратное включение в работу первой структуры происходит при уменьшении ошибки рассогласования ниже порога e_2 , причем $e_2 \leq e_1$. Пороги переключения e_1 и e_2 в дальнейшем будут определены исходя из качества работы каждой из структур САУ.

Выбор цифрового регулятора для СПС, содержащей различные объекты управления. Для СПС (рис. 1), содержащей различные ОУ, выбраны следующие регуляторы. Для первой структуры использован оптимальный цифровой регулятор ЦР1, синтез которого

осуществлен с применением известной методики [6]. Такой регулятор имеет предельный коэффициент усиления и способен в линейной зоне регулирования обеспечить максимальное быстродействие при детерминированных входных воздействиях. Для второй структуры выбран ЦР2, ранее синтезированный по новой методике [8]. Данный ЦР хорошо работает при наличии различных нелинейностей (в том числе люфт, насыщение, неуравновешенность нагрузки и др.) и способен с достаточным быстродействием обрабатывать разные входные воздействия,

в том числе и произвольные. Примеры некоторых часто встречающихся ОУ и рассчитанных для них ЦР приведены в табл. 1.

Моделирование работы САУ с различными объектами управления. Для проверки работы СПС в среде Simulink пакета MatLab были составлены две схемы моделирования [9, 10], которые для ОУ $G_2(s)$ и ЦР $W_{2.1}(z)$, $W_{2.2}(z)$ приведены на рис. 2. Схема рис. 2а состоит из двух независимых цифровых САУ, первая из которых содержит ОУ $G_2(s)$ и ЦР $W_{2.1}(z)$, а вторая – ОУ $G_2(s)$ и ЦР $W_{2.2}(z)$. САУ1 выполнена по одноконтурной схеме и содержит в прямой цепи оптимальный цифровой регулятор $W_{2.1}(z)$. САУ2 выполнена по двухконтурной схеме. Внутренний контур состоит из регулятора $W_{2.2}(z)$, включенного параллельно ОУ $G_2(s)$, и дополнительного усилителя K_y в прямой цепи, а внешний контур содержит единичную обратную связь. Следует заметить, что ЦР $W_{2.1}(z)$ рассчитан для линейного ОУ $G_2(s)$, и для лучшей работы САУ при обработке ступенчатых сигналов большой амплитуды на входе ЦР установлен блок ограничения (Saturation) с порогом ограничения на уровне $u_2 \leq u_1/K_0 = 255/4,44 \approx 57$ дел, где u_1 – уровень насыщения ОУ; K_0 – коэффициент усиления ЦР $W_{2.1}(z)$.

Объекты управления и цифровые регуляторы

Объект управления	Регулятор ЦР1	Регулятор ЦР2
$G_1(s) = \frac{\alpha}{s(s+a)}$ $\alpha = 102,413 \text{ c}^{-3}; a = 1,415 \text{ c}^{-1}$	$W_{1,1}(z) = K_0 \frac{1+b_1z^{-1}}{1+a_1z^{-1}}$ $a_1 = 0,4941 \text{ c}^{-1}; b_1 = -0,9317 \text{ c}^{-1};$ $K_0 = 4,05 \text{ c}^{-1}; h = 0,05 \text{ c}$	$W_{1,2}(z) = K_0 \frac{1+b_1z^{-1}}{1+a_1z^{-1}}$ $a_1 = 0,5444 \text{ c}^{-1}; b_1 = -1 \text{ c}^{-1};$ $K_0 = 3,1 \text{ c}^{-1}; h = 0,01 \text{ c}; K_y = 3,4$
$G_2(s) = \frac{\alpha}{s(s+a)(s+b)}$ $\alpha = 4971,15 \text{ c}^{-3}; a = 1,415 \text{ c}^{-1};$ $b = 48,54 \text{ c}^{-1}$	$W_{2,1}(z) = K_0 \frac{1+b_1z^{-1}+b_2z^{-2}}{1+a_1z^{-1}+a_2z^{-2}}$ $a_1 = 0,7295 \text{ c}^{-1}; a_2 = 0,0798 \text{ c}^{-1};$ $b_1 = -1,0200 \text{ c}^{-1}; b_2 = 0,0823 \text{ c}^{-1};$ $K_0 = 4,44 \text{ c}^{-1}; h = 0,05 \text{ c}$	$W_{2,2}(z) = K_0 \frac{1+b_1z^{-1}}{1+a_1z^{-1}}$ $a_1 = -0,4925 \text{ c}^{-1}; b_1 = -1 \text{ c}^{-1};$ $K_0 = 6,42 \text{ c}^{-1}; h = 0,01 \text{ c}; K_y = 1$
$G_3(s) = \frac{\alpha}{s(s^2+bs+a)}$ $\alpha = 492,48 \text{ c}^{-3}; a = 1296 \text{ c}^{-1};$ $b = 10,8 \text{ c}^{-1}$	$W_{3,1}(z) = K_0 \frac{1+b_1z^{-1}+b_2z^{-2}}{1+a_1z^{-1}+a_2z^{-2}}$ $a_1 = 0,8121 \text{ c}^{-1}; a_2 = 0,1593 \text{ c}^{-1};$ $b_1 = -0,8199 \text{ c}^{-1}; b_2 = 0,7233 \text{ c}^{-1};$ $K_0 = 97,11 \text{ c}^{-1}; h = 0,03 \text{ c}$	$W_{3,2}(z) = K_0 \frac{1+b_1z^{-1}+b_2z^{-2}}{1+a_1z^{-1}+a_2z^{-2}}$ $a_1 = 0,2222 \text{ c}^{-1}; a_2 = 0,0123 \text{ c}^{-1};$ $b_1 = -1,9027 \text{ c}^{-1}; b_2 = 0,9027 \text{ c}^{-1};$ $K_0 = 22,0884 \text{ c}^{-1}; h = 0,01 \text{ c}; K_y = 50$

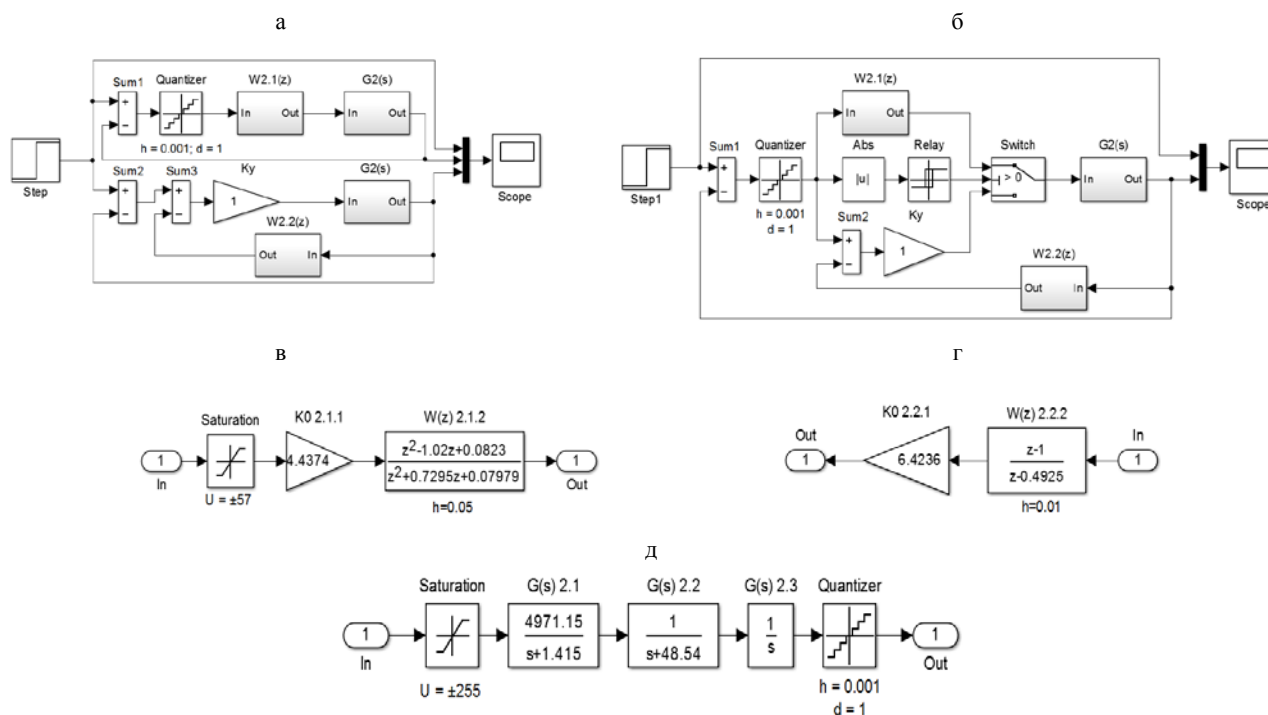


Рис. 2. Схемы моделирования работы САУ: а – САУ с обычной структурой; б – САУ переменной структуры; в – ЦР в прямой цепи; г – ЦР в обратной цепи; д – объект управления

На рис. 2б представлена схема цифровой СПС, первая структура которой содержит ЦР $W_{2,1}(z)$, включенный последовательно ОУ $G_2(s)$, а вторая – ЦР $W_{2,2}(z)$, включенный параллельно ОУ $G_2(s)$ и реализующий гибкую обратную связь. Единичная обрат-

ная связь является общей для двух структур. Для переключения структур используется коммутирующее устройство, содержащее блок вычисления модуля (Abs), релейный блок с гистерезисом (Relay) и двухканальный переключатель (Switch).

Коммутирующее устройство работает следующим образом. На выходе блока Sum1 образуется ошибка рассогласования $\pm e$, из которой блок Abs выделяет модуль $|e|$. Сигнал $|e|$ поступает на вход блока Relay, имеющего два порога переключения e_1 и e_2 . При работе САУ и выполнении условия $|e| < e_1$ блок Relay формирует сигнал логической «1», которая воздействует на управляющий вход переключателя Switch. В этом случае переключатель Switch подключает выход ЦР $W_{2,1}(z)$ к входу ОУ $G_2(s)$ и тем самым реализует работу первой структуры. Если выполняется условие $|e| \geq e_1$, то блок Relay формирует сигнал логического «0», который, воздействуя на управляющий вход переключателя Switch, обеспечивает отключение выхода ЦР $W_{2,1}(z)$ от входа ОУ $G_2(s)$ и подключение к нему выхода дополнительного усилителя K_y . В этом случае реализуется работа второй структуры. Порог переключения $e_1 = 150$ дел выбран из условия примерной длительности переходного процесса двух систем (рис. 2а) при обработке ступенчатого воздействия данной амплитуды.

При дальнейшей работе САУ и выполнении условия $|e| < e_2$ происходит обратное срабатывание блока Relay и формирование им сигнала логической «1». В этом случае переключатель Switch отключает выход дополнительного усилителя K_y , подключает выход ЦР $W_{2,1}(z)$ к входу ОУ $G_2(s)$ и тем самым возвращает к работе первую структуру. Порог переключения

$e_2 = 35$ дел выбран из условия $e_2 \leq u_2$ обеспечения работы первой структуры САУ в линейной зоне регулирования и исключения длительных переходных процессов при переключении структур.

В процессе моделирования использовали различные ОУ и рассчитанные для них ЦР (табл. 1). Объекты управления имеют цифровые (квантованные по времени $h = 0,001$ с и уровню $d = 1$ дел) входы-выходы и обладают нелинейностью типа «насыщение», величина которой для объектов $G_1(s)$, $G_2(s)$ составляет $u_1 = \pm 255$ дел, а для объекта $G_3(s)$ она равна $u_1 = \pm 12900$ дел. Цифровые регуляторы $W_{1,1}(z)$, $W_{2,1}(z)$ имеют шаг квантования $h = 0,05$ с; у $W_{3,1}(z)$ этот показатель $h = 0,03$ с; у $W_{1,2}(z)$ – $W_{3,2}(z)$ он составляет $h = 0,01$ с. Для блоков Relay и Saturation определены параметры: $e_1 = 100$ дел, $e_2 = 0$, $u_2 = \pm 62$ дела – для объекта $G_1(s)$; $e_1 = 200$ дел, $e_2 = 0$, $u_2 = \pm 132$ дела – для объекта $G_3(s)$.

Результаты работы САУ (рис. 2) при обработке ступенчатых ($x = A$) и гармонических ($x = A \sin \omega t$; $\omega = 3,14 \text{ с}^{-1}$) воздействий различной амплитуды ($A = 0,28$ град. = 50 дел; $A = 0,82$ град. = 150 дел; $A = 2,75$ град. = 500 дел) приведены на рис. 3, 4 и в табл. 2.

На рис. 3, 4 нанесены линии: верхняя горизонтальная соответствует +5 % от сигнала задания; средняя горизонтальная – сигналу задания; нижняя горизонтальная –5 % от сигнала задания. Длительность переходного процесса при обработке ступенчатых воздействий зафиксирована по уровню 95 %.

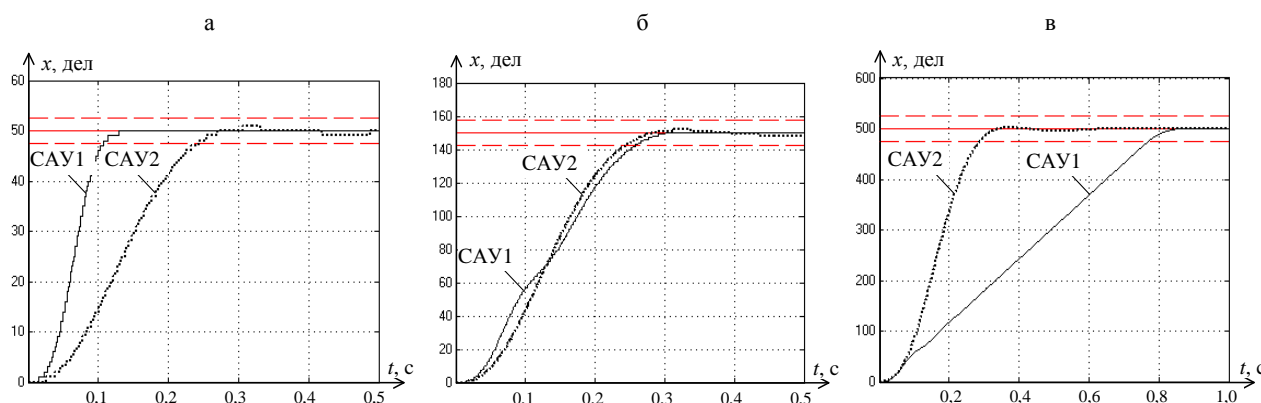


Рис. 3. Переходные процессы в САУ (рис. 2а) при обработке ступенчатых воздействий:

а – $A = 50$ дел; б – 150; в – 500 дел

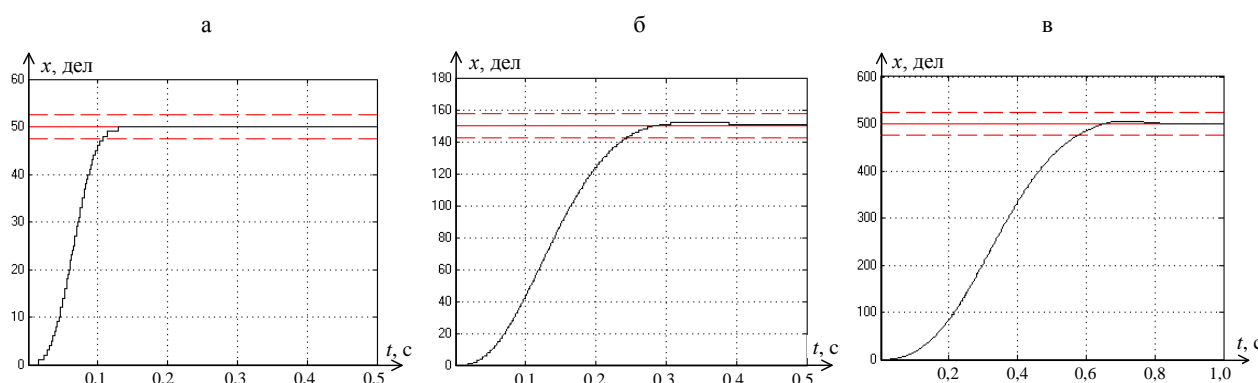


Рис. 4. Переходные процессы в САУ (рис. 2б) при отработке ступенчатых воздействий:
а – $A = 50$ дел; б – 150 ; в – 500 дел

Таблица 2

Результаты работы САУ с ОУ $G_2(s)$ и ЦР $W_{2.1}(z), W_{2.2}(z)$

САУ с ЦР	Длительность переходного процесса, с, при отработке ступенчатых воздействий различной амплитуды		
	$A = 50$ дел	$A = 150$ дел	$A = 500$ дел
$W_{2.1}(z)$	0,106	0,258	0,770
$W_{2.2}(z)$	0,245	0,245	0,289
$W_{2.1}(z) + W_{2.2}(z)$	0,106	0,245	0,289
САУ с ЦР	Максимальная ошибка (e /запаздывание) при отработке синусоидальных воздействий различной амплитуды		
	$A = 50$ дел	$A = 150$ дел	$A = 500$ дел
$W_{2.1}(z)$	14,1 дела / 0,091 с	42,4 дела / 0,091 с	Срыв
$W_{2.2}(z)$	21,5 дела / 0,140 с	64,5 дела / 0,140 с	215 дел / 0,140 с
$W_{2.1}(z) + W_{2.2}(z)$	14,1 дела / 0,091 с	42,4 дела / 0,091 с	215 дел / 0,140 с

Анализируя результаты моделирования (табл. 2), можно сделать вывод о том, что САУ с регулятором $W_{2.1}(z)$ обрабатывает ступенчатый сигнал амплитудой $A = 50$ дел значительно быстрее (0,106 с против 0,245 с), чем с регулятором $W_{2.2}(z)$. При отработке ступенчатого сигнала амплитудой $A = 150$ дел САУ с регуляторами $W_{2.1}(z)$ и $W_{2.2}(z)$ обеспечивает примерно одинаковое быстродействие (0,258 с и 0,245 с). При отработке ступенчатого сигнала амплитудой $A = 500$ дел САУ с регулятором $W_{2.2}(z)$ обеспечивает значительно лучшее, чем с регулятором $W_{2.1}(z)$, быстродействие (0,289 с против 0,770 с). В любом случае при отработке ступенчатых сигналов вид переходного процесса является близким к апериодическому. При отработке гармонических воздействий

($x = A \sin \omega t$; $\omega = 3,14 \text{ с}^{-1}$) малой амплитуды ($A \leq 150$ дел) САУ с регулятором $W_{2.1}(z)$ обеспечивает значительно меньшую максимальную ошибку и запаздывание, чем с регулятором $W_{2.2}(z)$. При отработке гармонических воздействий большой амплитуды ($A = 500$ дел) в САУ с регулятором $W_{2.1}(z)$ наблюдается срыв слежения, а регулятор $W_{2.2}(z)$ обеспечивает отработку без срыва.

САУ переменной структуры хорошо обрабатывает ступенчатые сигналы различной амплитуды ($A = 50; 150; 505$ дел), обеспечивает близко апериодический переходной процесс и быстродействие (0,106; 0,245; 0,245 с). При отработке гармонических воздействий амплитудой, меньшей 150 дел, показатели качества работы САУ такие же, как и с регулято-

ром $W_{2,1}(z)$. При обработке гармонических воздействий с амплитудой, большей 150 дел, показатели качества работы САУ такие же, как и с регулятором $W_{2,2}(z)$.

Для сравнения в табл. 3 приведены результаты работы САУ с ОУ $G_1(s)$ и ЦР $W_{1,1}(z)$, $W_{1,2}(z)$, а в табл. 4 – с ОУ $G_3(s)$ и ЦР $W_{3,1}(z)$,

$W_{3,2}(z)$ при обработке ступенчатых ($x = A$) и гармонических ($x = A \sin \omega t$; $\omega = 3,14 \text{ c}^{-1}$) воздействий различной амплитуды.

Анализ результатов моделирования (табл. 3, 4) подтверждает хорошую работу систем, содержащих различные ОУ и ЦР, что согласуется с выбранной стратегией создания СПС.

Таблица 3

Результаты работы САУ с ОУ $G_1(s)$ и ЦР $W_{1,1}(z)$, $W_{1,2}(z)$

САУ с ЦР	Длительность переходного процесса, с, при обработке ступенчатых воздействий различной амплитуды		
	A = 50 дел	A = 100 дел	A = 500 дел
$W_{1,1}(z)$	0,084	0,140	0,583
$W_{1,2}(z)$	0,124	0,130	0,229
$W_{1,1}(z) + W_{1,2}(z)$	0,084	0,140	0,229
САУ с ЦР	Максимальная ошибка (q/запаздывание) при обработке гармонических воздействий различной амплитуды		
	A = 50 дел	A = 100 дел	A = 500 дел
$W_{1,1}(z)$	11,7 дела / 0,075 с	23,4 дела / 0,075 с	423 дела / 0,262 с
$W_{1,2}(z)$	11,1 дела / 0,072 с	22,3 дела / 0,072 с	111 дел / 0,072 с
$W_{1,1}(z) + W_{1,2}(z)$	11,7 дела / 0,075 с	23,4 дела / 0,075 с	111 дел / 0,072 с

Таблица 4

Результаты работы САУ с ОУ $G_3(s)$ и ЦР $W_{3,1}(z)$, $W_{3,2}(z)$

САУ с ЦР	Длительность переходного процесса, с, при обработке ступенчатых воздействий различной амплитуды		
	A = 50 дел	A = 200 дел	A = 500 дел
$W_{3,1}(z)$	0,070	0,127	0,238
$W_{3,2}(z)$	0,138	0,138	0,151
$W_{3,1}(z) + W_{3,2}(z)$	0,070	0,138	0,151
САУ с ЦР	Максимальная ошибка (q/запаздывание) при обработке гармонических воздействий различной амплитуды		
	A = 50 дел	A = 200 дел	A = 500 дел
$W_{3,1}(z)$	9,3 дела / 0,059 с	37,1 дела / 0,059 с	92,6 дела / 0,059 с
$W_{3,2}(z)$	10,9 дела / 0,071 с	43,8 дела / 0,071 с	109,5 дела / 0,071 с
$W_{3,1}(z) + W_{3,2}(z)$	9,3 дела / 0,059 с	37,1 дела / 0,059 с	92,6 дела / 0,059 с

ВЫВОДЫ

1. Разработана структурная схема системы переменной структуры, содержащая две структуры. Первая в прямой цепи содержит оптимальный цифровой регулятор [6], включенный последовательно с объектом управления, а вторая – цифровой регулятор [8], реализую-

щий гибкую обратную связь и включенный параллельно объекту управления с дополнительным усилителем и единичной обратной связью. Для улучшения работы первой структуры системы автоматического управления при обработке ступенчатых сигналов большой амплитуды на входе цифрового регулятора установлен ограничитель с порогом u_2 . Переключение

структур осуществляется при помощи специального коммутирующего устройства с некоторым гистерезисом, исключающим частое переключение вперед и назад. С учетом качества работы отдельных структур системы автоматического управления определены их пороги переключения e_1 и e_2 . Такое построение системы автоматического управления позволяет реализовать преимущества оптимального цифрового регулятора при обработке малых сигналов, не превышающих величины $2u_2$, и хорошую работу цифрового регулятора в цепи гибкой обратной связи при обработке входных сигналов большой амплитуды, превышающей значения $2u_2$.

2. С помощью математического моделирования осуществлена проверка работы системы переменной структуры с различными объектами управления и цифровыми регуляторами. Подтверждены хорошее быстродействие системы автоматического управления при обработке ступенчатых сигналов, обеспечение минимальной для данных регуляторов динамической ошибки и времени запаздывания при обработке гармонических воздействий различной амплитуды.

3. Схема системы автоматического управления переменной структуры является новой, отличается простотой и хорошим качеством работы. Полученные результаты доведены до инженерного уровня и могут быть успешно использованы при создании систем автоматического управления, содержащих другие объекты управления и цифровые регуляторы, к качеству работы которых предъявляются различные, порой противоречивые требования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пупков, К. А. Методы классической и современной теории автоматического управления: учеб.: в 5 т. / К. А. Пупков, Н. Д. Егупов. – М.: Изд-во МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2004. – Т. 3: Синтез регуляторов систем автоматического управления. – 614 с.
2. Шидловский, С. В. Автоматическое управление. Перестраиваемые структуры / С. В. Шидловский. – Томск: Томский гос. ин-т, 2006. – 288 с.
3. Rihтер, J. H. Reconfigurable Control of Nonlinear Dynamical Systems / J. H. Rihтер. – Berlin: Springer, 2011. – 312 p.
4. Kovacs hazy, T. Transient Reduction in Reconfigurable Control Systems Utilizing Structure Dependence / T. Kovacs hazy, G. Peceli, G. Simon // 18th IEEE Instru-

mentation and Measurement of Informatics-Rediscovering Measurement in the Age of Informatics. – Hungary: Budapest, 2001. – Vol. 2. – P. 1143–1147.

5. Konstantopoulos, I. K. A New Strategy for Reconfigurable Control Systems / I. K. Konstantopoulos, P. J. Antsaklis // Proc. of the 3rd Annual Conf. on Communications, Control and Computing. – Monticello, 1995. – P. 69–78.

6. Гостев, В. И. Системы автоматического управления с цифровыми регуляторами: справочник / В. И. Гостев. – Киев: Тэхника, 1990. – 279 с.

7. Лурье, Б. Я. Классические методы автоматического управления / Б. Я. Лурье, П. Дж. Энрайт. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 624 с.

8. Стрижнев, А. Г. Синтез цифрового регулятора, включенного параллельно единичной обратной связи / А. Г. Стрижнев, М. К. Хаджинов, А. Н. Русакович // Доклады БГУИР. – 2014. – № 4 (82). – С. 80–86.

9. Tewari, A. Modern Control Design with MatLab and Simulink / A. Tewari. – Weinheim: John Wiley & Sons Ltd., 2002. – 518 p.

10. Nuruzzaman, M. Modeling and Simulation in Simulink for Engineers and Scientists / M. Nuruzzaman. – Bloomington: AuthorHouse, 2005.

REFERENCES

1. Pупков, K. A., & Egupov, N. D. (2004) *Methods of Classical and Modern Theory for Automation Control. Vol. 3. Synthesis of Controllers for Automation Control Systems*. Moscow, Publisher Bauman. 614 p. (in Russian).
2. Shidlovsky, S. V. (2006) *Automation Control. Reconfigurable Structures*. Tomsk: Tomsk State Institute. 288 p. (in Russian).
3. Rihтер, J. H. (2011) *Reconfigurable Control of Nonlinear Dynamical Systems*. Berlin, Springer. 312 p. (in Russian).
4. Kovacs hazy, T., Peceli, G., & Simon, G. (2001) Transient Reduction in Reconfigurable Control Systems Utilizing Structure Dependence. *18th IEEE Instrumentation and Measurement of Informatics-Rediscovering Measurement in the Age of Informatics*. Budapest, Hungary. Vol. 2, 1143–1147.
5. Konstantopoulos, I. K., & Antsaklis, P. J. (1995) A New Strategy for Reconfigurable Control Systems. *Proc. of the 3rd Annual Conf. on Communications, Control and Computing*. Monticello, 69–78.
6. Gostev, V. I. (1990) *Automation Control Systems with Digital Controllers*. Kiev, Tekhnika. 279 p. (in Russian).
7. Lurie, B. Ya., & Enright, P. J. (2004) *Classical Automation Control Methods*. Saint-Petersburg, BHV-Petersburg. 624 p. (in Russian).
8. Strizhnev, A. G., Khadzhinov, M. K., & Rusakovich, A. N. (2014) Synthesis of the Digital Controller in the Reverse Path with Additional Unity Feedback. *Doklady BGUIR [Reports of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics]*, 4 (82), 80–86 (in Russian).
9. Tewari, A. (2002) *Modern Control Design with MatLab and Simulink*. Weinheim, John Wiley & Sons Ltd. 518 p.
10. Nuruzzaman, M. (2005) *Modeling and Simulation in Simulink for Engineers and Scientists*. Bloomington, Author-House.

Поступила 21.08.2014