

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО ДВОПОЗИЦІЙНОГО РЕГУЛЯТОРА ІЗ МІНІМАЛЬНОЮ КІЛЬКІСТЮ ПЕРЕМИКАНЬ

Ю. О. Ромасевич, доктор технічних наук, доцент

В. С. Ловейкін, доктор технічних наук, професор

А. П. Ляшко, кандидат технічних наук

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: romasevichyuriy@ukr.net

Анотація. Розроблено метод синтезу оптимальних двопозиційних автоматичних регуляторів із мінімальною кількістю перемикань. Сутність методу полягає у зведенні вихідної задачі до задачі мінімізації функції узагальненого критерію в просторі параметрів регулятора. Топологія останнього дозволяє виконувати послідовне знаходження множин параметрів регулятора, які забезпечують виконання ранжованих умов задачі синтезу.

У роботі запропоновано двопозиційний ПІ-регулятор, для якого знайдено параметри (коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регулятора, а також величину порогу, при якій виконується перемикання функції регулювання).

Для доведення ефективності розробленого методу були проведені розрахунки для чотирьох об'єктів регулювання другого та третього порядків (один об'єкт із часовою затримкою). Якість регулювання порівнювалась за показниками: середньої нормальної похибки регулювання, модулем середнього регулювання, перерегулювання, тривалості регулювання та кількості перемикань. Результати проведено порівняльного аналізу за цими показниками показали, що при інших рівних умовах синтезований із використанням розробленого методу ПІ-регулятор має найменшу кількість перемикань функції регулювання. Цей результат дозволяє подовжити ресурс виконавчих пристроїв системи автоматичного регулювання.

Проведені розрахунки показали, що метод мінімізації кількості перемикань можна успішно застосовувати у рамках методології синтезу оптимальних регуляторів, яка була розроблена у попередніх роботах авторів.

Ключові слова: двопозиційний регулятор, синтез, критерій, оптимізація, перемикання

Актуальність. Значна частина регуляторів працює за найпростішим законом „включено-виключено”. Такі двопозиційні регулятори можуть реалізувати неперервні закони регулювання (наприклад, ПІД-алгоритм). Для цього на вихід ПІД-регулятора необхідно підключити широтно-імпульсний модулятор (ШІМ) [1]. У

цьому випадку кількість перемикачів залежить від несучої частоти ШІМ. Однак, значна величина несучої частоти ШІМ зумовлює велику кількість перемикачів, що для багатьох виконавчих пристроїв (електродвигунів, електроклапанів) є небажаним, оскільки при цьому зменшується їх ресурс роботи. З іншої сторони, зменшення кількості перемикачів зумовить погіршення якості регулювання, що також є негативним. Тому необхідно розробити метод, який би дозволив забезпечити раціональний компроміс між кількістю перемикачів та прийнятною якістю регулювання. Очевидно, що він повинен ґрунтуватись на оптимізаційному підході.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У роботі [1] експериментально підтверджено, що ПДД²-регулятор із ШІМ задовільно апроксимує ПД-закон в дуже вузькій області параметрів, забезпечуючи прийнятну якість регулювання.

У роботі [2] запропоновано використовувати двопозиційний регулятор для керування приводом мікроелектромеханічної системи. Синтез регулятора виконаний із врахуванням вимоги мінімізації кількості перемикачів, що позитивно впливає на мінімізацію споживання електроенергії в п'єзоелектричних актуаторах при переміщенні мікророботизованого суглоба ноги у потрібне положення.

У роботі [3] досліджено ПД-регулятор з ШІМ для класу білінійних об'єктів регулювання за допомогою ортогонально-функціонального підходу. На основі нього розроблено алгоритм, який включає лише алгебраїчні обчислення, що представляє задачу оптимізації статичних параметрів. Це значно спрощує обчислення. Для розв'язання задачі оптимізації використано гібридний Taguchi-генетичний алгоритм, який дозволив знайти мінімум лінійно-квадратичного критерію якості регулювання. Розроблений метод доволі простий та добре адаптований до обчислень на ПК.

У роботі [4] досліджено застосування робастного fuzzy-регулятора із ШІМ для регулювання руху лабораторної моделі робота. Параметри регулятора визначені за допомогою модифікованого методу зозулиного пошуку (метаевристичний підхід). Критерієм у цій задачі відслідковування положення робота виступала кількість та величина силових впливів приводу робота. У дослідженні виконано порівняння

роботи синтезованого та ПД-регулятора у різних тестових умовах, які показали перевагу першого.

Загалом задачі синтезу оптимальних двопозиційних регуляторів (у т.ч. з ШІМ) є актуальними, оскільки дозволяють забезпечити реалізацію регулювання за допомогою відносно простих виконавчих засобів. Разом з тим, в існуючих дослідженнях недостатньо уваги приділено методам підвищення ефективності їх функціонування, зокрема зменшенню кількості перемикачів.

Мета дослідження. Мета роботи полягає у розробці методу синтезу оптимального двопозиційного регулятора із мінімальною кількістю перемикачів. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання: 1) розробити математичну модель двопозиційного регулятора; 2) виконати постановку задачі синтезу оптимального двопозиційного регулятора із мінімальною кількістю перемикачів; 3) виконати розрахунки налаштувань неперервних та двопозиційних ПД-регуляторів; 4) провести аналіз отриманих результатів та вказати перспективи подальших досліджень.

Матеріали і методи дослідження. Для того, щоб мінімізувати кількість перемикачів функції регулювання представимо її у вигляді наступної залежності:

$$u(A, x, b) = \begin{cases} u_{\min}, & \text{якщо } f(A, x) < b; \\ u_{\max}, & \text{якщо } f(A, x) \geq b, \end{cases} \quad (1)$$

де A – вектор параметрів регулятора, які необхідно налаштувати; x – вектор фазових координат системи; b – величина порогу, яка визначає перемикач між величинами $u_{\min}$ та $u_{\max}$; $u_{\min}$ та $u_{\max}$ – мінімальне та максимальне значення функції регулювання відповідно; f – функція своїх аргументів, яка у загальному випадку може бути нелінійною.

У частинному випадку застосування ПД-закону регулювання вираз (1) можна записати у наступному вигляді:

$$u = \begin{cases} u_{\min}, & \text{якщо } K_p e + T_i^{-1} \int_0^t e dt < b; \\ u_{\max}, & \text{якщо } K_p e + T_i^{-1} \int_0^t e dt \geq b, \end{cases} \quad (2)$$

де K_p та T_i – коефіцієнти налаштування пропорційної та інтегральної складових регулятора відповідно.

Таким чином, серед параметрів регулятора є додатковий параметр b , який необхідно налаштувати. Отже, загальна кількість параметрів (аргументів) для налаштування двопозиційного ПІ-регулятора рівна трьом. Їх вибір повинен задовольняти умову мінімальної кількості перемикачів регулювання при забезпеченні інших умов та вимог: умови стійкості регулювання; умов, які виражаються через нерівності (наприклад, умова рівності нулю перерегулювання); вимог мінімізації комплексу оптимізаційних критеріїв.

Процес знаходження оптимального двопозиційного регулятора подібний до того, який був розроблений у роботах [5-7]. Однак, в узагальнений оптимізаційний критерій необхідно ввести показник кількості перемикачів функції регулювання, що помножений на коефіцієнт δ_s . У цьому випадку узагальнений критерій Cr прийме такий вигляд:

$$Cr = Ter + Cr_{ineq} + S \cdot \delta_s + CC \rightarrow \min, \quad (3)$$

де Ter – термінальний критерій, який відображає вимоги стійкості регулювання і який виражається через норму фазового вектору в кінці процесу регулювання; Cr_{ineq} – критерій, який враховує вимоги на обмеження на регулювання; S – кількість перемикачів функції регулювання; CC – комплексний критерій у задачі синтезу оптимального регулятора.

Топологію критерію (3) можна проілюструвати за допомогою рис. 1. Верхня „яма” відповідає термінальному критерію Ter (тобто, критерію мінімізації фазових координат у кінці процесу регулювання, або, іншими словами, умові стійкості регулювання); „яма”, яка знаходиться нижче, відповідає топології критерію Cr_{ineq} ; наступна „яма” має складну форму – це поєднання перевернутого конуса із твірною, кут нахилу якої пропорційний коефіцієнту δ_s (вершина конуса відповідає мінімальній кількості перемикачів регулювання) та форми (топології) комплексного критерію оптимізації CC (рис. 1).

Необхідна топологія узагальненого критерію створена завдяки величинам вагових коефіцієнтів кожного із його компонентів:

$$\delta_T \gg \delta_p \gg \delta_S > 0, \quad (4)$$

де δ_T , δ_p та δ_S – вагові коефіцієнти термінального критерію, критерію, який відображає обмеження та критерію кількості перемикань відповідно.

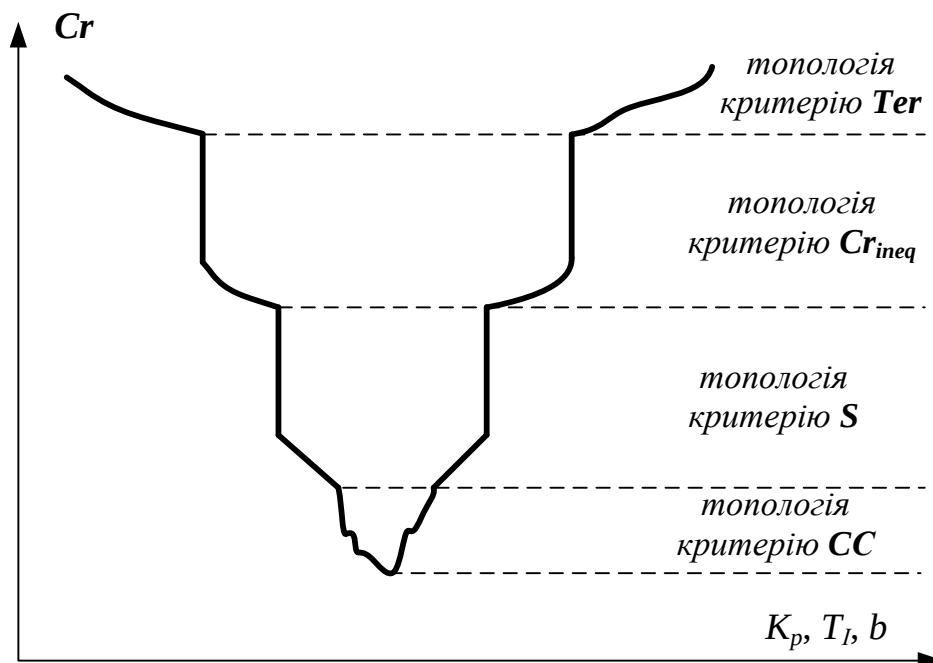


Рис. 1. Графік умовної залежності величини критерію (3) від параметрів двопозиційного ПІ-регулятора K_p , T_I та b

Характерна топологія критерію Cr (рис. 1) створена для того, щоб забезпечити послідовне забезпечення всіх умов задачі: спочатку відшукується точка на множині стійких розв'язків задачі, надалі знаходиться точка на підмножині, на якій забезпечуються нерівності при регулюванні, потім знаходиться точка на підмножині, на якій кількість перемикань є мінімальною, надалі знаходиться точка, яка забезпечує мінімум комплексного критерію оптимізації. Таке послідовне відшукування точок на підмножинах дозволяє використовувати методи чисельної оптимізації, зокрема, метаевристичні методи [8].

Результати досліджень та їх обговорення. Для того, щоб оцінити ефективність розробленого підходу, щодо синтезу оптимального двопозиційного ПІ-

регулятора із мінімальною кількістю перемикачів функції регулювання були проведені розрахунки для декількох об'єктів регулювання другого та третього порядків. Передатні функції цих об'єктів регулювання наведені у таблиці 1.

1. Передатні функції об'єктів регулювання та області пошуку коефіцієнтів K_p та T_i

Передатна функція	Область пошуку коефіцієнтів	
	K_p	T_i
$G_1(s) = \frac{1,83}{1,68 \cdot 10^4 s^2 + 4,60s + 1}$	$0 \dots 5 \cdot 10^0$	$0 \dots 5 \cdot 10^2$
$G_2(s) = \frac{2,60 \cdot 10^{-2}}{2,73 \cdot 10^5 s^2 + 1,35 \cdot 10^3 s + 1}$	$0 \dots 1 \cdot 10^2$	$0 \dots 1 \cdot 10^2$
$G_3(s) = \frac{4,47 \cdot 10^{-1} e^{-28.6s}}{1,83 \cdot 10^5 s^3 + 1,53 \cdot 10^4 s^2 + 9,40 \cdot 10^1 s}$	$0 \dots 5 \cdot 10^0$	$0 \dots 5 \cdot 10^7$
$G_4(s) = \frac{1}{8,20 \cdot 10^{-5} s^2 + 6,17 \cdot 10^{-3} s + 2,30 \cdot 10^{-2}}$	$0 \dots 2 \cdot 10^0$	$0 \dots 5 \cdot 10^0$

Для тестових передатних функцій у табл. 1 наведено області пошуку коефіцієнтів K_p та T_i .

Одна із передатних функцій має часову затримку. Перша передатна функція описує процес регулювання температури зерносушарки, друга – теплиці, третя – котла КВГМ-100, а четверта – електропривода мобільного робота, який використовується у теплиці [9]. Передатні функції $G_1(s)$ - $G_3(s)$ описують регулювання за каналом „потужність – температура”, а остання – регулювання за каналом „напруга живлення – кутова швидкість руху привода робота”. Передатні функції $G_1(s)$ - $G_3(s)$ мають досить значні постійні часу, на відміну від них передатна функція $G_4(s)$ описує швидкоплинні процеси, тому має малі постійні часу.

Задача налаштування ПІ-регулятора полягала у визначенні значень коефіцієнтів пропорційної K_p та інтегральної T_i складових, які б забезпечували мінімум такого критерію:

$$CC = 0,5t_p^{-1} \int_0^{t_p} u dt + 0,3t_p^{-1} \int_0^{t_p} e dt + 0,6t_p \rightarrow \min. \quad (5)$$

де t_p – тривалість регулювання; u – регулювання; e – похибка, $e=r-x(t)$; $x(t)$ – регульований параметр; r – уставка (завдання). Коефіцієнти у виразі (5) наведені в числовій формі: вони зводять їх розміри до безрозмірної форми і відповідають важливості кожного з них.

Оскільки у цьому дослідженні розглядаються двопозиційні регулятори, то необхідно вказати значення верхньої та нижньої меж регулювання. Для всіх об'єктів регулювання нижня межа регулювання рівна нулю $u_{\min}=0$, а верхні такі: для $G_1(s)$ $u_{\max}=2$; для $G_2(s)$ $u_{\max}=50$; для $G_3(s)$ $u_{\max}=1$; для $G_4(s)$ $u_{\max}=0,05$.

Для оптимальних регуляторів із формувачем ШІМ сигналу на виході задачу оптимального налаштування коефіцієнтів регулятора було розв'язано без врахування модуляції сигналу, тобто у розрахунках прийнято, що регулятор є неперервним. У подальшому при моделюванні роботи регулятора та визначенні показників якості регулювання, було застосовано широтно-імпульсну модуляцію сигналу із різною несучою частотою. Для різних об'єктів регулювання межі зміни несучої частоти ШІМ різні, що викликано різними значеннями постійних часу об'єктів регулювання.

Показниками якості регулювання обрано: середню нормальну похибку регулювання (СНПР), $t_p^{-1} \int_0^{t_p} |e| dt$; модуль середнього регулювання (МСР), $t_p^{-1} \int_0^{t_p} |u| dt$; перерегулювання (ПР), $\frac{\max(x-r)}{r} \cdot 100$; тривалість регулювання (ТР) $t_p=t$, при $|x(t)-r| \leq 0,05r$ (для всіх випадків $r=1$); кількість перемикань (КП) функції регулювання.

Чисельні показники якості регулювання різних об'єктів налаштованими ПІ-регуляторами наведено у таблиці 2.

Аналіз даних, які наведені у табл. 2, показує, що введення у постановку задачі критерію – кількості перемикань керування – дає змогу зменшити її. Крім того,

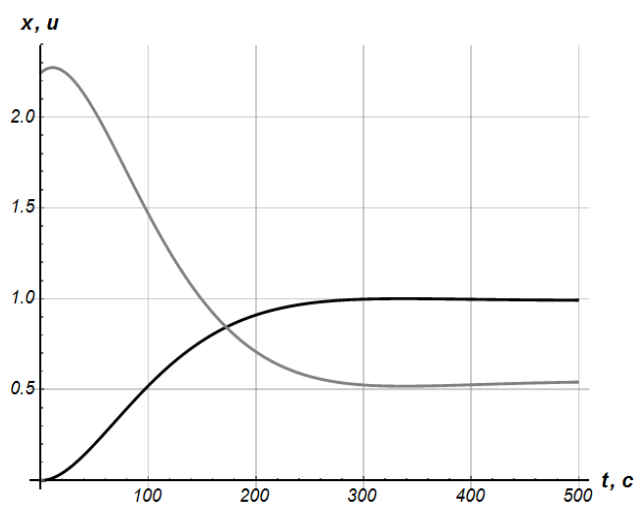
наприклад, для об'єкта із передаточною функцією $G_3(s)$ у результаті розв'язування задачі отримано лише одне перемикання. При цьому тривалість такого регулювання менша, ніж при неперервному регулюванні. Таке регулювання може розглядатись як квазіоптимальне за швидкодією.

2. Якісні показники регулювання оптимальними регуляторами: неперервним, двопозиційними (із різними несучими частотами ШІМ), двопозиційним із мінімальною кількістю перемикань регулювання

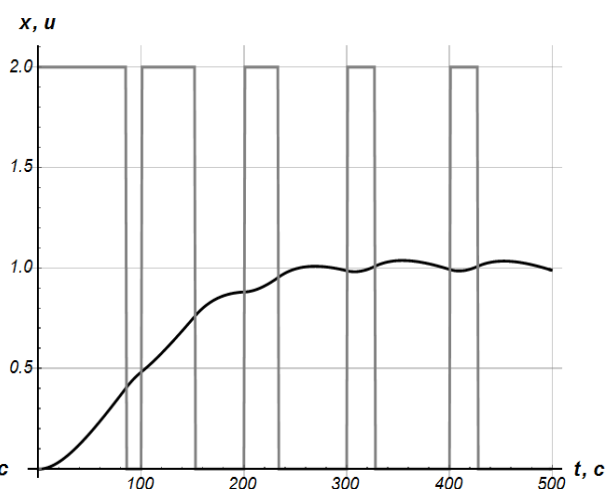
Спосіб регулювання	Параметри			СНПР	МСР	ТР, с	ПР, %	КП
	K_p	T_i	b					
Об'єкт із передаточною функцією $G_1(s)$								
НЕПЕРЕРВНЕ РЕГУЛЮВАННЯ	2,23	209,67	-	0,42	1,32	255	0,0	-
ДВОПОЗИЦІЙНЕ РЕГУЛЮВАННЯ (ЧАСТОТА ШІМ – 0,01 ГЦ)				0,48	1,46	232	3,8	4
ДВОПОЗИЦІЙНЕ РЕГУЛЮВАННЯ (ЧАСТОТА ШІМ – 0,05 ГЦ)				0,49	1,42	221	2,3	15
ДВОПОЗИЦІЙНЕ РЕГУЛЮВАННЯ (ЧАСТОТА ШІМ – 0,2 ГЦ)				0,32	1,15	346	7,0	101
ДВОПОЗИЦІЙНЕ РЕГУЛЮВАННЯ (ЧАСТОТА ШІМ – 1 ГЦ)				0,19	0,86	662	5,1	1176
РЕГУЛЮВАННЯ ІЗ МІНІМАЛЬНОЮ КІЛЬКІСТЮ ПЕРЕМІКАНЬ	1,19	171,26	0,75	0,26	0,97	450	0,0	6
Об'єкт із передаточною функцією $G_2(s)$								
НЕПЕРЕРВНЕ РЕГУЛЮВАННЯ	85,68	15,66	-	0,49	66,72	1125	0,0	-
ДВОПОЗИЦІЙНЕ РЕГУЛЮВАННЯ (ЧАСТОТА ШІМ – 0,002 ГЦ)				0,16	42,52	6944	12,5	19
ДВОПОЗИЦІЙНЕ РЕГУЛЮВАННЯ (ЧАСТОТА ШІМ – 0,005 ГЦ)				0,20	43,60	5411	12,2	34
ДВОПОЗИЦІЙНЕ РЕГУЛЮВАННЯ (ЧАСТОТА ШІМ – 0,01 ГЦ)				0,20	43,81	5321	12,2	64
ДВОПОЗИЦІЙНЕ РЕГУЛЮВАННЯ (ЧАСТОТА ШІМ – 0,2 ГЦ)				0,21	43,93	5047	12,1	1146
РЕГУЛЮВАННЯ ІЗ МІНІМАЛЬНОЮ КІЛЬКІСТЮ ПЕРЕМІКАНЬ	572,84	33,47	30,89	0,39	46,85	2222	0,0	2
Об'єкт із передаточною функцією $G_3(s)$								

НЕПЕРЕРВНЕ РЕГУЛЮВАННЯ	0,32	4,68x x10 ⁷	-	0,36	0,12	1683	0,0	-
ДВОПОЗИЦІЙНЕ РЕГУЛЮВАННЯ (ЧАСТОТА ШІМ – 0,002 ГЦ)				0,33	0,18	1051	1,2	5
ДВОПОЗИЦІЙНЕ РЕГУЛЮВАННЯ (ЧАСТОТА ШІМ – 0,005 ГЦ)				0,32	0,13	1434	0,7	15
ДВОПОЗИЦІЙНЕ РЕГУЛЮВАННЯ (ЧАСТОТА ШІМ – 0,01 ГЦ)				0,35	0,13	1401	1,2	27
РЕГУЛЮВАННЯ ІЗ МІНІМАЛЬНОЮ КІЛЬКІСТЮ ПЕРЕМИКАНЬ	9,28	2,41x x10 ⁷	6,41	0,36	0,25	738	0,0	1
Об'єкт із передаточною функцією $G_4(s)$								
НЕПЕРЕРВНЕ РЕГУЛЮВАННЯ	0,12	2,31	-	0,39	0,07	0,126	0,0	-
ДВОПОЗИЦІЙНЕ РЕГУЛЮВАННЯ (ЧАСТОТА ШІМ – 20 ГЦ)				0,20	0,03	0,501	9,9	15
ДВОПОЗИЦІЙНЕ РЕГУЛЮВАННЯ (ЧАСТОТА ШІМ – 50 ГЦ)				0,23	0,03	0,388	9,0	25
ДВОПОЗИЦІЙНЕ РЕГУЛЮВАННЯ (ЧАСТОТА ШІМ – 100 ГЦ)				0,25	0,03	0,397	9,0	51
ДВОПОЗИЦІЙНЕ РЕГУЛЮВАННЯ (ЧАСТОТА ШІМ – 200 ГЦ)				0,26	0,04	0,402	9,2	99
РЕГУЛЮВАННЯ ІЗ МІНІМАЛЬНОЮ КІЛЬКІСТЮ ПЕРЕМИКАНЬ	14,64	25,35	0,02	0,52	0,05	0,205	1,8	0

Для того, щоб наглядно оцінити якість регулювання, наведемо графічні залежності (рис. 2). Графік чорного кольору відповідає зміні регульованого параметру, а сірого – функції регулювання (сигнал з виходу регулятора).



а



б

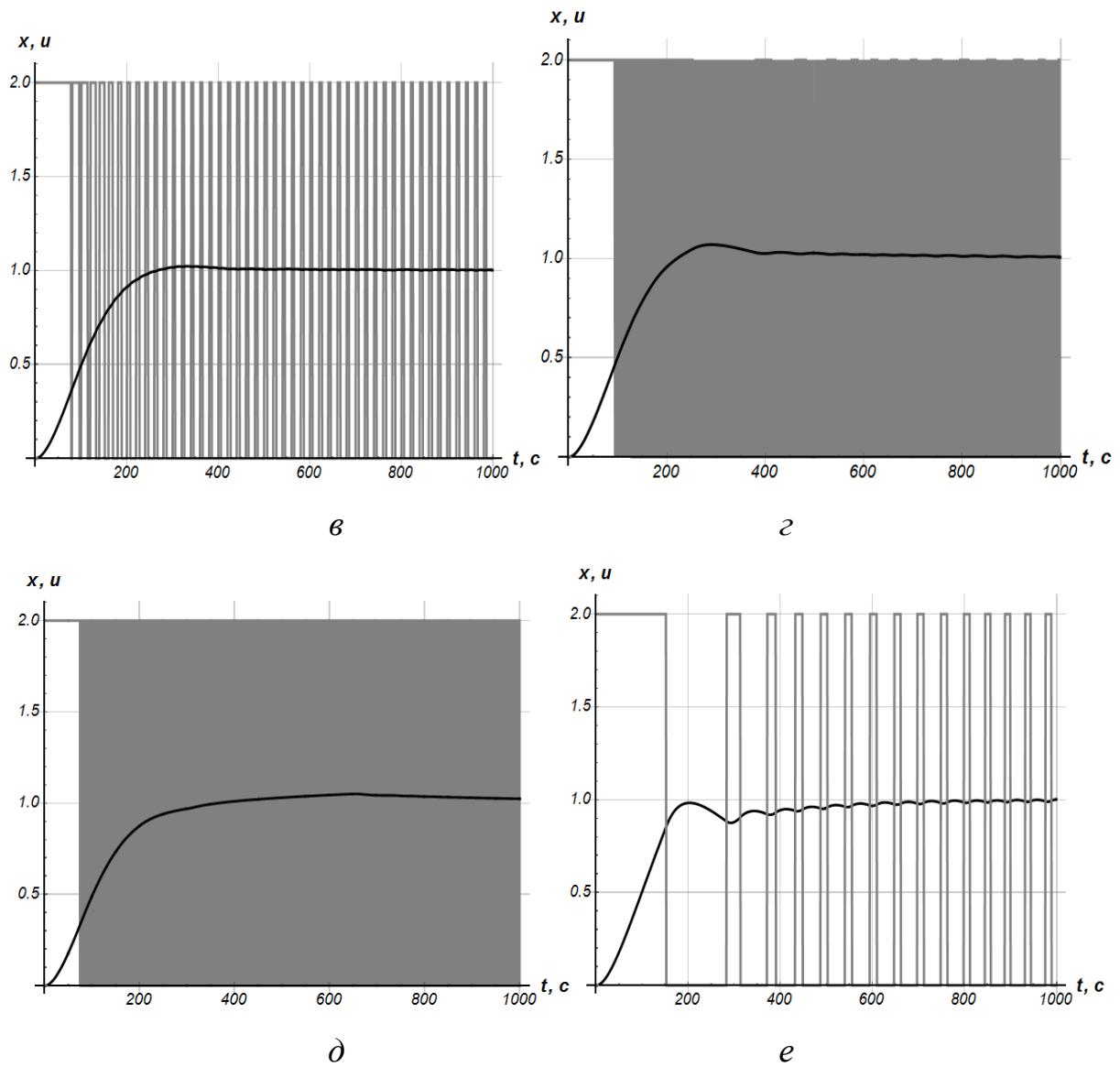


Рис. 2. Графіки регулювання для передаточної функції $g_1(s)$:

a – неперервне регулювання; *б* – двопозиційне регулювання (несуча частота шім – 0,01 Гц); *в* – двопозиційне регулювання (несуча частота шім – 0,05 Гц); *г* – двопозиційне регулювання (несуча частота шім – 0,2 Гц); *д* – двопозиційне регулювання (несуча частота шім – 1 Гц); *е* – регулювання із мінімальною кількістю перемикачів

Аналіз графіків, які наведена на рис. 2, показує, що збільшення несучої частоти ШІМ зумовлює збільшення кількості перемикачів, що є цілком очевидним фактом. Разом з тим, при будь-якій частоті ШІМ виникає небажаний ефект перерегулювання, у той час як для неперервного варіанту оптимального регулятора

перерегулювання майже для всіх об'єктів регулювання рівне нулю (для передаточної функції $G_4(s)$ перерегулювання при роботі регулятора з мінімальною кількістю перемикачів рівне 1,8%, хоча за час перехідного режиму перемикачів регулювання немає).

Аналіз показників, які наведені у табл. 1, а також графічних залежностей, які наведені на рис. 2, дає змогу зробити висновок: при синтезі двопозиційних оптимальних регуляторів необхідно враховувати їх специфіку на етапі постановки задачі. У випадках, коли цього не буде зроблено кількість перемикачів керування (регулювання) буде більшою, ніж мінімально можлива. Тобто, такий регулятор не можна розглядати як оптимальний з позицій кількості перемикачів. Обидва регулятори: неперервний та регулятор із мінімальною кількістю перемикачів мають різні коефіцієнти налаштування пропорційної та інтегральної складових. Це ще раз підтверджує попередню тезу.

Висновки і перспективи. Результати проведеного аналізу отриманих результатів показали ефективність застосування методу, який можна розглядати як подальший розвиток методології синтезу оптимальних автоматичних регуляторів, що був розроблений авторами у попередніх роботах.

Якість регулювання оптимальним двопозиційним регулятором для різних об'єктів регулювання є високою, що підтверджується проведенням аналізом чисельних значень показників регулювання. Це підтверджує універсальність методу синтезу регуляторів із мінімальною кількістю перемикачів.

Перспективи подальших досліджень у цій галузі полягають у застосуванні методу для синтезу регуляторів більш складної структури (ПД, нелінійних, зокрема на основі штучних нейронних мереж тощо).

Крім того, будуть проведені розрахунки для трипозиційних регуляторів.

Список використаних джерел

1. Горюнов А. Г., Ливенцов С. Н. Цифровой регулятор для системы управления с исполнительным механизмом постоянной скорости. Известия Томского политехнического университета. 2004. Т. 307. № 6. - С. 131-134.

2. Edamana B., Oldham K. An optimal on-off controller with switching costs using non-linear binary programming 2009 American Control Conference. 2009. P. 4227-4232.
3. Hsieh C.-H., Chou J.-H. Design of Optimal PID Controllers for PWM Feedback Systems With Bilinear Plants. IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2007. 15(6). P. 1075–1079.
4. Moezi S.A., Rafeeyan M., Zakeri E., Zare A. Simulation and experimental control of a 3-RPR parallel robot using optimal fuzzy controller and fast on/off solenoid valves based on the PWM wave. ISA Transactions. 2016. 61. P. 265–286.
5. Romasevych Y., Loveikin, V., Usenko S. PI-controller tuning optimization via PSO-based technique. Przegląd Elektrotechniczny. 2019. R. 95 NR 7. P. 33-37.
6. Ромасевич Ю. О., Ловейкін В. С., Ляшко А. П., Макарець В. В. Метод оптимального налаштування ПІ-регуляторів із врахуванням обмежень. Енергетика і автоматика, 2019. №3. С. 49-71.
7. Ромасевич Ю. О., Ловейкін В.С., Ляшко А.П., Макарець В.В. Розробка методу оптимального налаштування ПІ-регуляторів. Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. 2019. Вип. 53. С. 56-65.
8. Romasevych Yu., Loveikin V. A Novel Multi-Epoch Particle Swarm Optimization Technique Cybernetics and Information Technologies. 2018. 18(3). P. 62-74.
9. Lysenko V., Bolbot I., Romasevych Y., Loveykin V., Voytiuk V. Algorithms of robotic electrotechnical complex control in agricultural production. Control Systems: Theory and Applications. River Publishers. 2018. Ch. 11. P. 271-289.

References

1. Horiunov, A. H., Lyventsov, S. N. (2004). Tsyfrovoi rehuliator dlia systemy upravleniya s yspolnytel'nyim mekhanizmom postoiannoï skorosty [Digital controller for control system with constant speed actuator] Izvestiya Tomskogo polytekhnicheskogo unyversyteta, 307 (6.), 131-134.
2. Edamana, B., Oldham, K. (2009). An optimal on-off controller with switching costs using non-linear binary programming. 2009 American Control Conference, 4227-4232. DOI:10.1109/acc.2009.5160394
3. Hsieh, C.-H., Chou, J.-H. (2007). Design of Optimal PID Controllers for PWM Feedback Systems With Bilinear Plants. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 15(6), 1075–1079. DOI: 10.1109/tcst.2007.908084
4. Moezi, S. A., Rafeeyan, M., Zakeri, E., Zare, A. (2016). Simulation and experimental control of a 3-RPR parallel robot using optimal fuzzy controller and fast on/off solenoid valves based on the PWM wave. ISA Transactions, 61, 265–286. DOI:10.1016/j.isatra.2015.12.005
5. Romasevych, Y., Loveikin, V., Usenko, S. (2019). PI-controller tuning optimization via PSO-based technique. Przegląd Elektrotechniczny, 95 (7), 33-37.
6. Romasevych, Yu. O., Loveikin, V. S., Liashko, A. P., Makarets, V. V. (2019). Metod optymal'nogo nalashtuvannia PI-rehuliatoriv iz vrakhuvanniam obmezhen [The method of optimal tuning of PI-controllers with constraints] Enerhetyka i avtomatyka, 3, 49-71.

7. Romasevych, Yu. O., Loveikin, V. S., Liashko, A. P., Makarets, V. V. (2019). Rozrobka metodu optymalnoho nalashtuvannia PI-rehulatoriv [Development of the method for PI-controllers optimal tuning] Avtomatyzatsiia vyrobnychkh protsesiv u mashynobuduvanni ta pryladobuduvanni, 53, 56-65.

8. Romasevych, Yu., Loveikin, V. (2018). A Novel Multi-Epoch Particle Swarm Optimization Technique. Cybernetics and Information Technologies, 18(3), 62-74.

9. Lysenko, V., Bolbot, I., Romasevych, Y., Loveykin, V., Voytiuk, V. (2018). Algorithms of robotic electrotechnical complex control in agricultural production. Control Systems: Theory and Applications. River Publishers,. 11, 271-289.

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО ДВУХПОЗИЦИОННОГО РЕГУЛЯТОРА С МИНИМАЛЬНЫМ КОЛИЧЕСТВОМ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ

Ю. А. Ромасевич, В. С. Ловейкин, А. П. Ляшко

Аннотация. Разработан метод синтеза оптимальных двухпозиционных автоматических регуляторов с минимальным количеством переключений. Сущность метода заключается в сведении исходной задачи к задаче минимизации функции обобщенного критерия в пространстве параметров регулятора. Топология последнего позволяет выполнять последовательное нахождение множеств параметров регулятора, обеспечивающих выполнение ранжированных условий задачи синтеза.

В работе предложен двухпозиционный ПИ-регулятор, для которого найдены параметры (коэффициенты пропорциональной и интегральной составляющих регулятора, а также величина порога, при котором выполняется переключение функции регулирования).

Для доказательства эффективности разработанного метода были проведены расчеты для четырех объектов регулирования второго и третьего порядков (один объект имел временную задержку). Качество регулирования сравнивалось по показателям: средней нормальной погрешности регулирования, модуля среднего регулирования, перерегулирования, продолжительности регулирования и количества переключений. Результаты проведения сравнительного анализа по этим показателям показали, что при прочих равных условиях синтезированный с использованием разработанного метода ПИ-регулятор имеет наименьшее количество переключений функции регулирования. Этот результат позволяет продлить ресурс исполнительных устройств системы автоматического регулирования.

Проведенные расчеты показали, что метод минимизации количества переключений можно успешно применять в рамках методологии синтеза оптимальных регуляторов, которая была разработана в предыдущих работах авторов.

Ключевые слова: двухпозиционный регулятор, синтез, критерий, оптимизация, переключение

THE SYNTHESIS OF AN OPTIMAL ON-OFF CONTROLLER WITH MINIMUM NUMBER OF SWITCHINGS

Yu. Romasevych, V. Loveikin, A. Lyashko

Abstract. *A method of synthesis of optimal on-off controllers with a minimum number of switchings is developed in the work. The essence of the method is in reducing the original problem to the problem of minimizing the function of the generalized criterion in the parameter domain of the controller. The topology of the latter makes it possible to sequentially find sets of controller parameters that ensure the fulfillment of ranked problem conditions.*

An on-off-PI-controller has been proposed in the paper. Its parameters (gains of proportional and integral components of the controller, as well as the threshold at which switching of the control function is carried-out) have been found in the article.

In order to prove the effectiveness of the developed method, calculations were performed for four second- and third-order plants (one plant has a time delay). The quality of controlled processes was compared in terms of: average normal error, module of average control, overshoot, settling time and number of switchings. The results of the comparative analysis on these indicators showed that ceteris paribus the synthesized PI-controller has the least number of control switchings. This result extends the duration of use of the automatic control system actuators.

The calculations showed that the method of minimizing the number of switchings can be successfully applied within the methodology of synthesis of optimal regulators, which had been developed in the previous author's researches.

Key words: *on-off controller, synthesis, criterion, optimization, switching*