

151 АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 681.5

doi: 10.31498/2225-6733.48.2024.310687

© Ісаєв А.Б.¹, Мірошніченко В.І.², Койфман О.О.³, Сімкін О.І.⁴

ЗАСТОСУВАННЯ ДВОСХІДЧАСТОГО ВХІДНОГО ВПЛИВУ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ДИНАМІЧНОГО ВІДХИЛЕННЯ ПЕРЕХІДНОГО ПРОЦЕСУ ЗА ЗАВДАННЯМ У СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ

Встановлено, що застосування двосхідчастого вхідного впливу за завданням в системах автоматичного регулювання (САР) призводить до зменшення значення максимального динамічного перевищення перехідного процесу більш ніж в три рази порівняно з односхідчастим. Визначено інтервал часу між східцями впливу, що дозволяє досягти найбільшої ефективності, а також наведено метод його визначення. Запропонована методика може бути використана для підвищення точності регулювання в САР, в яких регульований параметр повинен змінюватися східчасто, наприклад, в системах керування температурою в нагрівальних пристроях.

Ключові слова: односхідчастий вхідний вплив, двосхідчастий вхідний вплив, лінійно зростаючий вхідний вплив, динамічна помилка, статичний об'єкт керування.

A.B. Isaiev, V.I. Miroshnychenko, O.O. Koyfman, O.I. Simkin. Application of two-step input to reduce overshoot of the transient response at automated control systems. The problems of quality improving for technology control are very important and are considered in works on the theory of automatic control and related fields. Various approaches to solving the problems are known especially by the decreasing overshoot of step response. To provide this the most of existing methods require: to adjust a controller parameters; development of a mathematical model of a controlled object; additional filters applications, that as a whole is difficult to implement under industrial conditions. The authors have proposed another approach to solving the above problems, contrary to the known ones. Namely, to apply two successive inputs with lower amplitudes and delay in time instead of the known one step input. The response of the controlled system on the complex two step inputs was considered and the optimal time delay was defined. The investigations were conducted by the modelling a typical classic linear automation control system that consists of a static control object of the first order with time delay, proposal - integration - difference controllers. The modelling results for a transient under the various applied one and two step inputs, including their ramp variation were obtained. It was shown that the two-step inputs with their ramp application gives the decreasing of the maximum displacement for a transient in a typical control system: more than 3 times increase was shown comparing with the one-step approach. The optimal time interval between the steps was determined that leads to the maximum effectiveness of the technology application. The procedure to define the details of the approach application was developed.

¹ ст. викладач, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-5966-4886, isaev_a_b@pstu.edu

² канд. техн. наук, доцент, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: 0000-0002-5956-7867, y.i.miroshnychenko@mipolytech.education

³ канд. техн. наук, доцент, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: 0000-0003-2075-7417, aleksey.koyfman@mipolytech.education

⁴ канд. техн. наук, професор, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: 0000-0002-9939-7866, a.i.simkin@mipolytech.education

Key words: step response, two-step response, ramp response, overshoot, control system.

Постановка проблеми. Однією із визначальних характеристик якості роботи систем керування є максимальне динамічне відхилення (*overshoot*). Цей показник характеризує реакцію системи керування на різкі зміни режимів роботи технологічного агрегату та можливе перевищення регульованим параметром його заданого значення.

У системах програмного керування наслідком стрибкоподібної зміни заданого значення регульованого параметра (уставки) є перехідний процес за завданням. При цьому, у випадку наявності в об'єкта властивості саморегулювання, його вихідна величина досягає нового рівноважного значення зазвичай з певною інерційністю. В умовах промислового виробництва такі процеси мають місце, наприклад, у системі керування температурою в нагрівальних пристроях. Величина максимального відхилення регульованого параметру залежить від динамічних властивостей об'єкта керування та налаштувань регулятора, що переважно є умовно постійними в процесі роботи агрегату. Також наявна прямопропорційна її залежність від значення східчастої зміни уставки. Суттєве перевищення поточним значенням заданого є небажаним явищем для більшості технологічних процесів, тому актуальним завданням є зменшення максимального динамічного відхилення при перехідних процесах за завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання підвищення якості регулювання мають важливе значення та розглядаються в роботах з теорії автоматичного управління та суміжних галузей.

У роботі [1] наведено математичні моделі традиційних систем фазового автопідстроювання (ФАП) та фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ) із принципом керування за відхиленням, проаналізовано динамічні характеристики цих систем, визначено показники якості відповідних перехідних процесів. Показана можливість підвищення якості роботи систем традиційних ФАП та ФАПЧ шляхом побудови комбінованих систем введенням розімкнених компенсаційних зв'язків щодо збурення, а також диференціальних зв'язків.

У роботі [2] сформовано векторно-матричну модель регулятора управління зі зворотним зв'язком за станом, виведено аналітичну формулу для визначення коефіцієнтів корекції для забезпечення нульової помилки усталеного керування.

У статті [3] представлено конструкцію надійних регуляторів без перевищення для регулювання вихідного сигналу для безперервної лінійно-інваріантної системи зворотного зв'язку на основі стану з багатьма входами та багатьма виходами. У цьому методі проектування регулятора для дескрипторної системи використовується техніка інтегрального ковзного режиму разом з узагальненим методом призначення власної структури Мура та теорією вихідного регулювання для дескрипторної системи для забезпечення надійного регулювання виходу з недопущенням перевищення. Продемонстровано ефективність роботи запропонованого регулятора за допомогою числового прикладу та результатів моделювання.

У роботі [4] розглянуто класичну задачу точного регулювання продуктивності для інваріантного об'єкта з лінійним часом. Виходячи з припущення, що існує або регулятор зворотного зв'язку стану, або регулятор зворотного зв'язку вимірювання, наведені методи проектування для отримання регулятора, який дозволяє уникнути перевищення та недосягання заданого значення перехідної характеристики.

У статті [5] представлена структура пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) регулятора для монотонних, неперевисуючих вихідних реакцій об'єктів керування другого порядку, які не потребують початкового сталого стану. Запропонована схема застосовна до двічі диференційованих характеристик, монотонні реакції без перевищення досягаються компенсацією початкового значення інтегральної складової стану. У запропонованій схемі початкове значення інтегрального зворотного зв'язку є нелінійною функцією початкового стану об'єкта керування. Такий підхід на практиці застосовується для пошарового управління стрибками і однокільного управління стрибками оптичного дисководу. Наведені експериментальні результати підтверджують ефективність запропонованої схеми та її застосовність до систем управління перемиканням режимів.

У роботі [6] представлена еталонна схема регулятора для пом'якшення перевищення в системі управління відстеженням. Запропонована схема, відома як еталонний регулятор із

динамічним обмеженням, переосмислює проблему пом'якшення перевищення як проблему управління обмеженнями. Результатом цього переформулювання є динамічна максимально допустима множина, яка змінюється в реальному часі як функція опорного сигналу. Еталонний регулятор із динамічним обмеженням використовує динамічну максимально допустиму множину, а також нову логіку перемикавання для модифікації опорного сигналу, щоб запобігти або пом'якшити перевищення. Наведені кілька властивостей динамічної максимально допустимої множини та алгоритмів, необхідних для її обчислення. Також наведені результати досліджень стабільності та рекурсивної доцільності еталонного регулятора із динамічним обмеженням, які демонструють ефективність підходу, а також підкреслюють його обмеженість.

У статті [7] для налаштування ПД-регулятора пропонується використовувати метод перевищення заданого значення, який ґрунтується на використанні адаптивного коефіцієнта підсилення, який визначається в залежності величини динамічного перевищення, що допомагає регулятору бути більш агресивним, коли помилка має велике значення, і більш плавним, коли помилка малого значення. Також пропонується використання фільтр першого порядку на вході регулятора для згладжування шуму. Системи з високим часом затримки або з нелінійними характеристиками можуть не реагувати сприятливо на цей метод. Також використання такого підходу може призвести до прискореного зносу виконавчої та регулюючої апаратури.

У статті [8] представлено фільтр заданого значення першого порядку, призначений для зменшення динамічного перевищення для низькопорядкових процесів. Запропонований метод потребує інформації про пікове перевищення та піковий час спрацьовування системи незалежно від типу і порядку роботи системи з довільними параметрами ПД.

Авторами [9] розглянуто спосіб зменшення динамічного перевищення при регулюванні для нестабільних систем першого порядку з часовою затримкою за допомогою каскадного регулятора. Компенсатор з фазовим зсувом у внутрішньому контурі регулювання проектується на основі діаграми Боде системи та бажаного значення фазового запасу та використовується для підвищення фазового запасу системи та покращення її стійкості. ПД-регулятор в зовнішньому контурі забезпечує управління системою з надійною, зниженою реакцією, і, таким чином, зменшення перевищення в часовій характеристиці. До недоліків такого підходу можна віднести залежність від параметрів ПД-контролера та компенсатора, а також додаткові обчислення для реалізації каскадного контролера.

В роботі [10] запропоновано метод оцінки ефективності контурів з ПД-регуляторами, призначеними для нестабільних процесів, для аналізу якості перехідних процесів як по завданню, так і за збуреннями. Для налаштування регулятора автори використовують безрозмірний індекс продуктивності, розроблений з урахуванням методу прямого синтезу для проектування ПД-регуляторів, як відношення теоретичної та фактичної інтегральної абсолютної помилки, отриманої з реакції замкнутого контуру на східчасту та зростаючу зміну заданого значення та збурення навантаження.

Автори [11] для підвищення якості регулювання застосовують ПД-регулятор з фіксованим значенням ваги для структури керування, яка використовує переваги ПД-регулятора з двома ступенями свободи над класичною формою, що дозволяє одночасно компенсувати збурення та забезпечувати прийнятне динамічне відхилення при зміні уставки як для лінійних, так і для нелінійних систем.

У статті [12] розглядається проста практична техніка для запобігання виходу реактору в аварійний стан, яка полягає в збільшенні заданого значення регулятора температури/тиску з певною швидкістю, але якщо потреба в охолоджуючій рідині зростає занадто сильно, ця зміна зупиняється до тих пір, поки потреба в керуючому впливі не знизиться до нормального рівня.

У роботі [13] проілюстровано достатність максимальної чутливості як параметра налаштування для конструкції регулятора та надано рекомендації щодо вибору цього параметра налаштування для плавного та жорсткого керування для стабільних моделей процесів процесу першого і другого порядку із запізненням. Крім того, представлена емпірична залежність між перевищенням і нормалізованим параметром фільтра ІМС для полегшення налаштування регулятора за визначеним користувачем значенням перевищення. Також для запобігання раптових змін, які можуть викликати нестабільність об'єкта керування застосовують програмне регулювання (set

point ramping), що передбачає зміни вхідного впливу за завданням за лінійною функцією із заданістю визначеною швидкістю [14].

В промислових умовах лінійний зростаючий вплив за завданням для технологічних параметрів, таких як тиск або швидкість потоку, допомагає забезпечити стабільність і оптимізувати продуктивність. Проаналізовані роботи пропонують різні підходи до підвищення якості регулювання за завданням за рахунок зменшення динамічного перевищення. Для досягнення цієї мети більшість з методів передбачає зміни в налаштуваннях регулятора, наявність моделі об'єкта управління, застосування додаткових фільтрів, що ускладнює реалізацію в умовах промислового виробництва. Тому авторами пропонується інший підхід для підвищення якості регулювання.

Метою статті є дослідження впливу заміни стрибкоподібної зміни уставки відповідним двосхідчастим вхідним впливом в системі із замкнутим контуром, в результаті чого передбачається підвищення динамічної точності регулювання шляхом зменшення значення динамічного перевищення регульованого параметру. Для реалізації вищевказаного слід визначити часовий інтервал між східчастими вхідними впливами, змодельовати відповідні реакції замкнутого контуру з об'єктом першого порядку із запізненням та ПІД-регулятором на обидва типи змін уставки, а також проаналізувати вплив параметрів моделі системи регулювання на результати моделювання.

Виклад основного матеріалу. Очевидно, що реакція системи керування на вхідні збурення, як за завданням, так і по навантаженню, залежить від властивостей об'єкта керування та структури й налаштування регулятора.

Пропонується замінити одноразовий стрибкоподібний вхідний вплив двома послідовними впливами меншої амплітуди, зсунутими в часі один щодо одного (рис. 1). Очевидно, що кожен такий вплив буде викликати менше динамічне перевищення і очікується, що точність регулювання підвищиться.

Для дослідження розглянемо типову класичну лінійну систему автоматичного регулювання, що складається із статичного об'єкта управління першого порядку із запізненням та ПІД-регулятора.

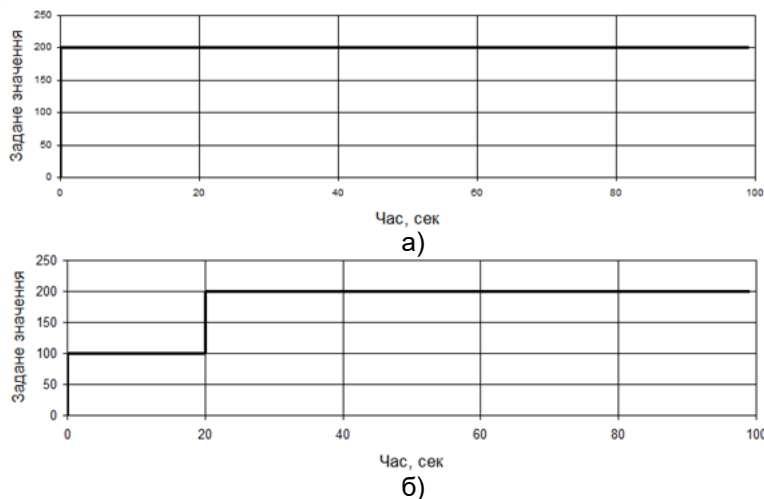


Рис. 1 – Вхідні впливи: а) односхідчастий, б) двосхідчастий

Графік перехідного процесу (рис. 2, а), який побудований за результатами моделювання при односхідчастому вхідному впливі за завданням, використовується в подальшому як вихідний варіант для порівняння з результатами наступних експериментів. Максимальне динамічне відхилення $X_1 = 326,59 - 200 = 126,59$.

Для реалізації двосхідчастої уставки попередньо визначено час між східцями $\Delta t_{\text{зад}}$ рівним чверті періоду коливаний, що відповідає моменту досягнення регульованим параметром САР першого максимуму коливаний X_1 (рис. 2, а), коли подальше зростання в результаті першого стрибка

вхідного впливу припиняється. За результатами моделювання (рис. 2, б), де максимальне динамічне відхилення зменшено більш ніж удвічі: $X_1 = 260,27 - 200 = 60,27$, можна зробити висновок про ефективність застосування двосхідчастої зміни уставки.

Для визначення моменту часу, в який подача другої частини уставки буде найбільш ефективною, була використана властивість суперпозиції досліджуваної САР. Реакція системи на складний двосхідчастий вхідний вплив розглянута як сума реакцій на два простих односхідчастих впливи.

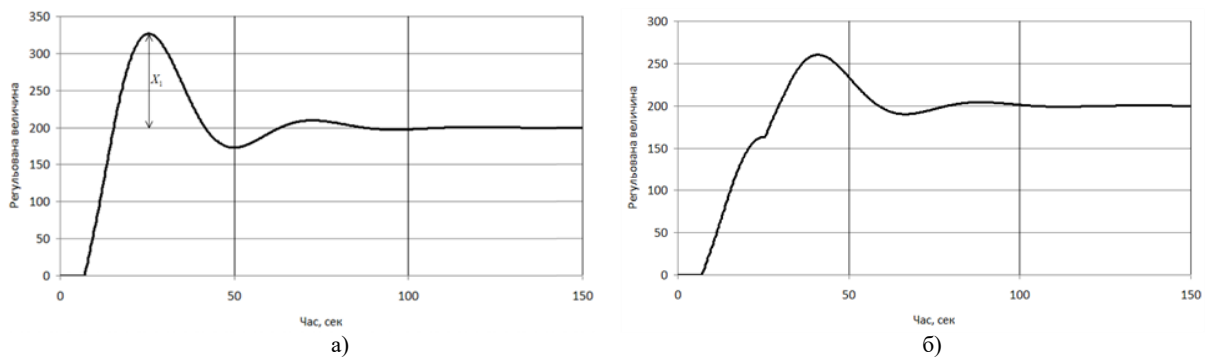


Рис. 2 – Перехідні процеси: а) типовий перехідний процес за завданням; б) при двосхідчастому вхідному впливі зі зсувом на чверть періоду коливань

Для ілюстрації застосування принципу суперпозиції на рис. 3, а наведені складові перехідного процесу, кожна з яких є реакцією системи управління на окрему частину вхідного впливу (рис. 1, б). Зсув у часі для вказаних складових відповідає схидам вхідного впливу, максимальне динамічне перевищення для кожної складає $X_1 = 163,30 - 100 = 63,30$, що дорівнює половині максимального динамічного перевищення вихідного перехідного процесу (рис. 2, а). Аналіз форми і розташування графіків (рис. 3, а) призводить до висновку, що зсув за часом між схидами уставки повинен мати таку величину, щоб перший мінімум першого перехідного процесу збігався в часі з першим максимумом другого перехідного процесу (рис 3, б). Таким чином буде досягнуто найбільш ефективної їхньої взаємної компенсації.

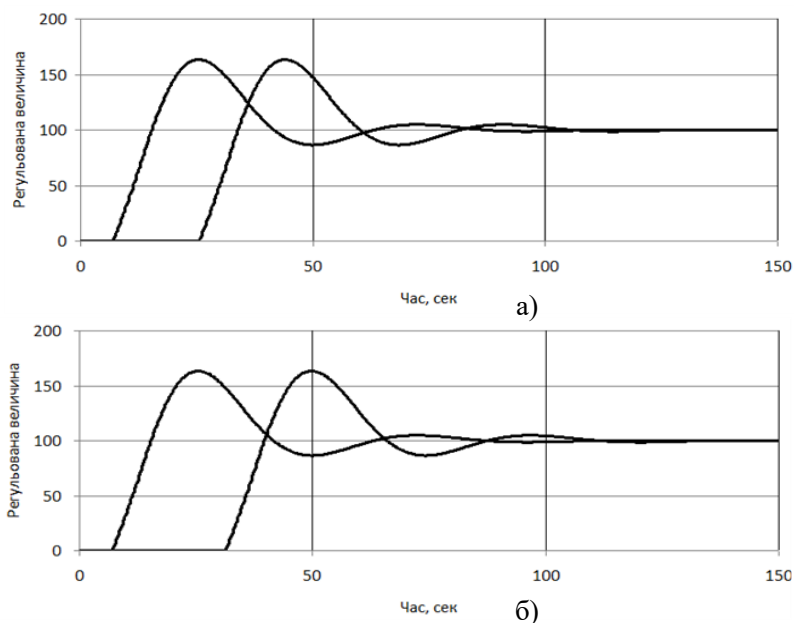


Рис. 3 – Складові перехідного процесу, що відповідають двом схидам вхідного впливу: а) зі зсувом на чверть періоду коливань, б) зі зсувом до другого екстремуму

Результат моделювання роботи САР із двосхідчастим вхідним впливом, східці якого зсунуті на запропонований час, наведено на рис. 4. Максимальне динамічне відхилення цього перехідного процесу становить $X_1 = 249,81 - 200 = 49,81$, що більш ніж у 2,5 рази менше порівняно з перехідним процесом для односхідчастого вхідного впливу (рис. 2, а). Додаткові експерименти показали, що зменшення або збільшення часу між східцями вхідного впливу призводить до збільшення динамічного відхилення перехідних процесів. Таким чином, отримано мінімальне екстремальне значення максимального динамічного відхилення.

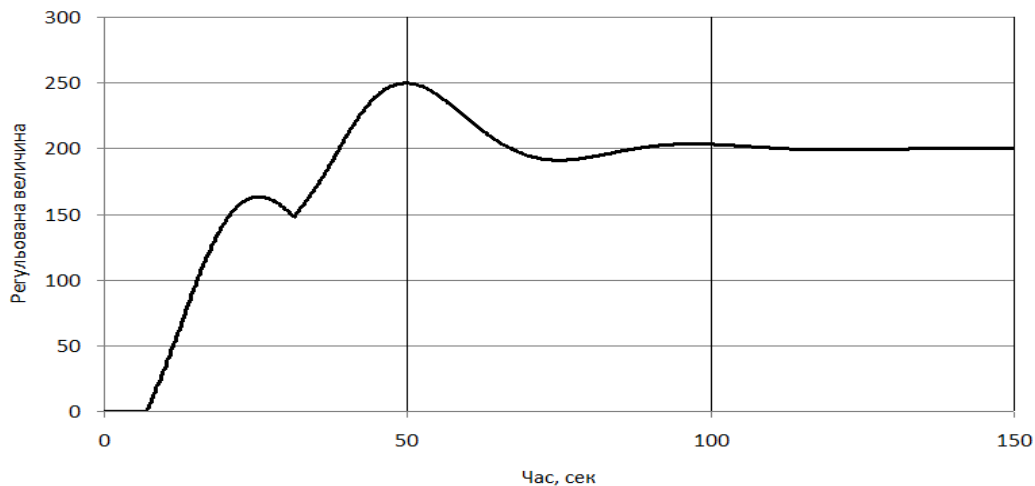


Рис. 4 – Реакція САР на двосхідчастий вхідний вплив з ефективним зсувом східців у часі

У лінійній САР форма, співвідношення амплітуд коливань і часові параметри перехідних процесів не залежать від величини вхідного впливу, а визначаються лише внутрішніми властивостями об'єкта керування та регулятора. Це дозволяє визначити інтервал часу, на який повинні бути зсунуті східці вхідного впливу та використовувати його для будь-яких процесів регулювання за завданням в конкретній САР. Для цього необхідно експериментально отримати реакцію САР на будь-який односхідчастий вхідний вплив (рис. 5), визначити моменти часу першого максимуму τ_1 і першого мінімуму τ_2 , обчислити ефективний інтервал часу для зсуву східців вхідного впливу в часі за формулою:

$$\Delta\tau_{\text{зад}} = \tau_2 - \tau_1. \tag{1}$$

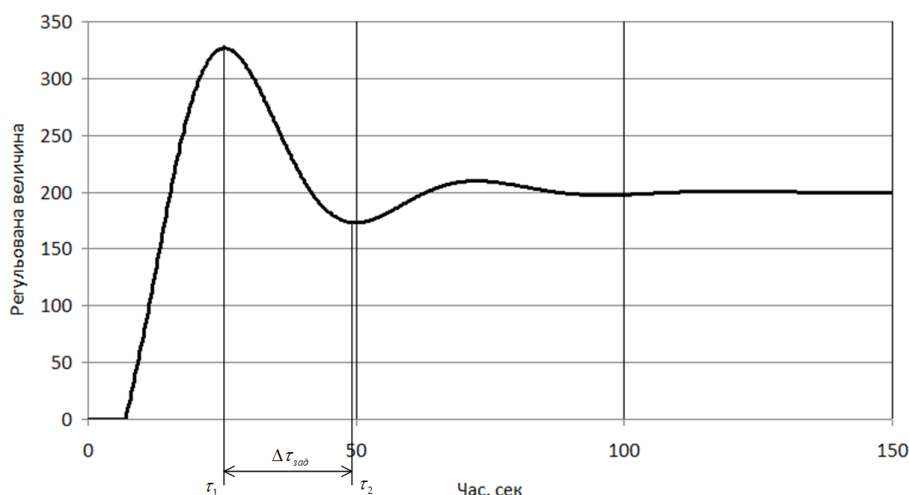


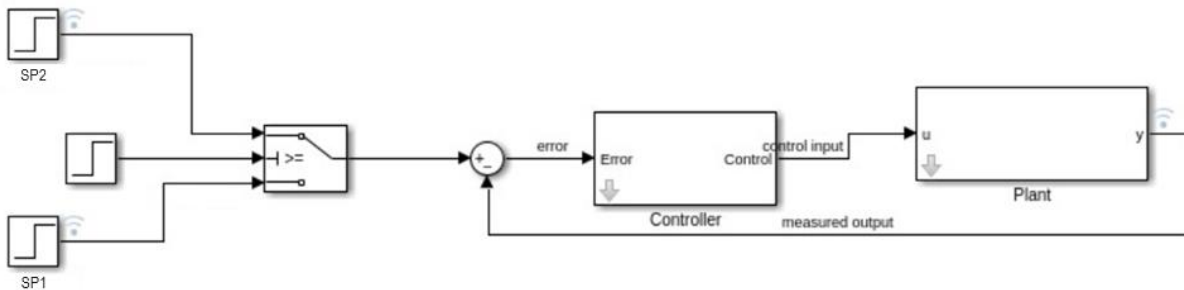
Рис. 5 – Визначення часу зсуву між ступенями входної дії

Для підтвердження отриманих результатів авторами було проведено дослідження із визначення максимального динамічного відхилення перехідних процесів для різних варіантів формування уставки з використанням вибірки з дослідження [15]. Для кожної з 55 кривих розгону було обрано параметри об'єкта керування ($K_{об}$, $T_{об}$, $\tau_{об}$), які відповідають мінімальному значенню відносного залишкового відхилення, максимальному значенню коефіцієнта детермінації та забезпечують досягнення вихідною величиною сталого значення за період $5 \cdot T_{об}$.

Алгоритм дослідження для кожної кривої розгону передбачав наступні кроки:

Крок 1. Визначено налаштування ПІД-регулятора, що забезпечують перехідний процес із 40% перерегулюванням, та змодельовано реакцію САР на односхідчасту зміну уставки. Визначено максимальне динамічне перевищення, що дорівнює 0.342.

Крок 2. Розраховано час зсуву східців входного впливу за формулою (1) та змодельовано перехідний процес в САР, параметри якої не змінюються, з реалізацією двосхідчастого входного впливу за схемою (рис. 6). Визначено максимальне динамічне перевищення (0,307).



SP1 – односхідчаста уставка, SP2 – двоосхідчаста уставка

Рис. 6 – Схема моделі САР з реалізацією двосхідчастого входного впливу

Крок 3. Експериментально підібрано кут нахилу рампи (швидкість зміни заданого значення до досягнення сталого) таким чином, щоб забезпечити невелику відмінність часу регулювання відповідної реакції САР в порівнянні з перехідним процесом, спричиненим двосхідчастою зміною уставки. Змодельовано перехідний процес в САР, параметри якої не змінюються, з реалізацією програмного входного впливу за схемою (рис. 7). Визначено максимальне динамічне перевищення, що дорівнює 0,311.

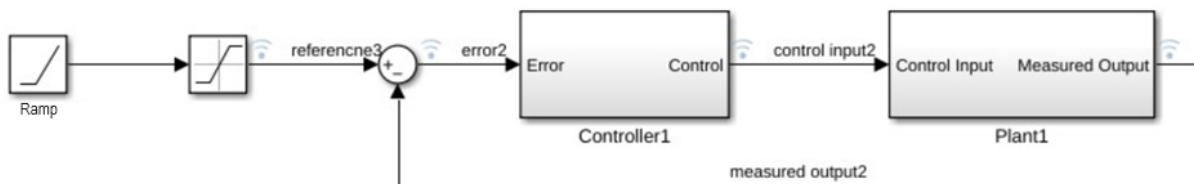
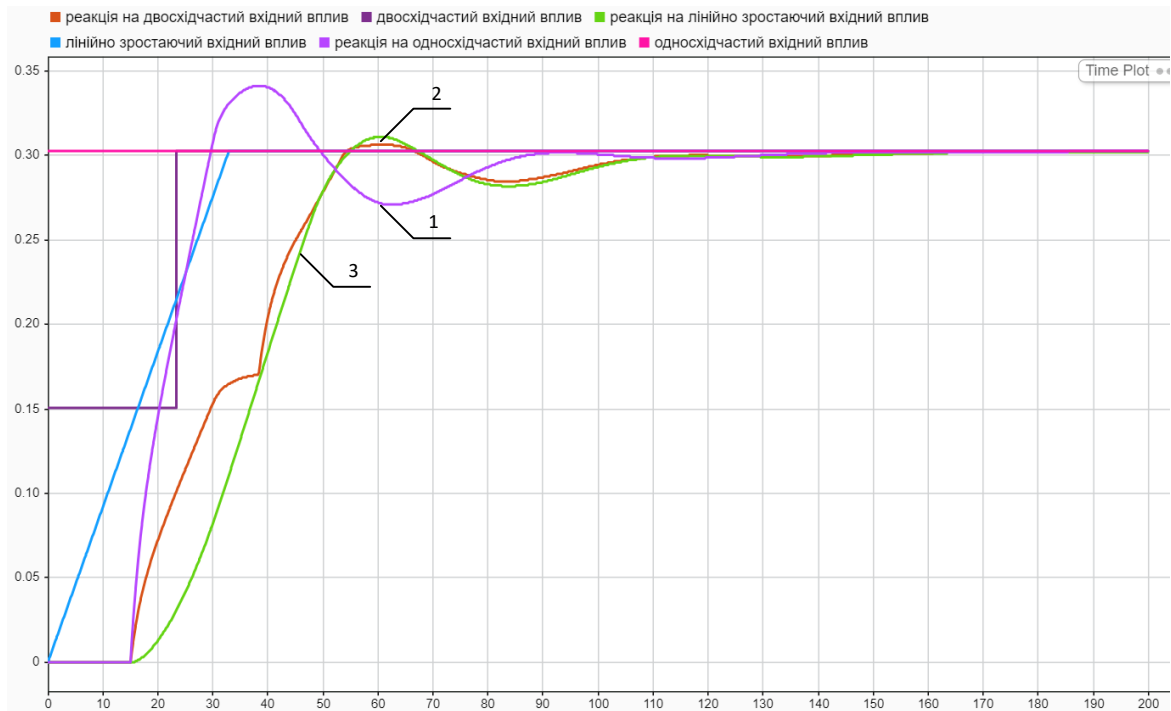


Рис. 7 – Схема моделі САР з реалізацією програмного входного впливу (Ramp)

На рис. 8 наведено графічне порівняння для різних реалізацій формування заданого значення.



1 – реакція на односхідчастий вхідний вплив, 2 – реакція на двосхідчастий вхідний вплив, 3 – реакція на програмний вхідний вплив (ramp)

Рис. 8 – Графічне порівняння перехідних процесів при різному способі формуванні заданого значення:

На рис. 9 та в табл. 1 наведено отримані результати для кожної кривої розгону вибірки [15]. Для деяких кривих розгону проведено масштабування абсолютних значень (x100) для зручності відображення результатів.

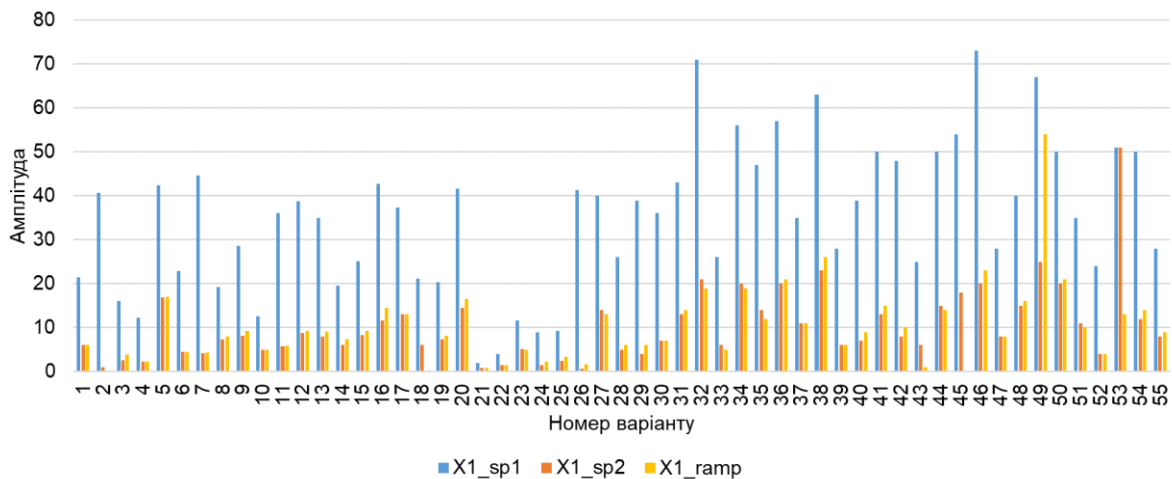


Рис. 9 – Результати дослідження: амплітуди максимального динамічного відхилення при застосуванні уставки: односхідчастої (X1_sp1), двосхідчастої (X1_sp2), програмної (X1_ramp)

Таблиця 1

Результати дослідження

Номер експе-римен-нту	Вхідний вплив			Порівняння				
	X_{1_sp1}	X_{1_sp2}	X_{1_ramp}	$\frac{X_{1_sp1}}{X_{1_sp2}}$	$\frac{X_{1_sp2}}{X_{1_sp1}}$	$\frac{X_{1_sp1}}{X_{1_ramp}}$	$\frac{X_{1_ramp}}{X_{1_sp1}}$	$X_{1_sp2} < X_{1_ramp}$
1	21,4	6	6,10	3,57	0,28	3,51	0,29	1
2	40,7	1	0,00	40,70	0,02	-	0,00	0
3	16	2,6	3,80	6,15	0,16	4,21	0,24	1
4	12,2	2,3	2,30	5,30	0,19	5,30	0,19	1
5	42,4	16,9	17,00	2,51	0,40	2,49	0,40	1
6	22,82	4,5	4,50	5,07	0,20	5,07	0,20	1
7	44,7	4,1	4,40	10,90	0,09	10,16	0,10	1
8	19,2	7,4	7,90	2,59	0,39	2,43	0,41	1
9	28,6	8,1	9,20	3,53	0,28	3,11	0,32	1
10	12,6	4,9	4,90	2,57	0,39	2,57	0,39	1
11	36,1	5,8	5,90	6,22	0,16	6,12	0,16	1
12	38,8	8,7	9,30	4,46	0,22	4,17	0,24	1
13	34,9	7,9	9,10	4,42	0,23	3,84	0,26	1
14	19,5	6,1	7,40	3,20	0,31	2,64	0,38	1
15	25,1	8,3	9,30	3,02	0,33	2,70	0,37	1
16	42,8	11,7	14,50	3,66	0,27	2,95	0,34	1
17	37,4	13,1	13,10	2,85	0,35	2,85	0,35	1
18	21,2	6	0,00	3,53	0,28	-	0,00	0
19	20,4	7,4	8,20	2,76	0,36	2,49	0,40	1
20	41,7	14,5	16,50	2,88	0,35	2,53	0,40	1
21	1,929	0,9	0,80	2,14	0,47	2,41	0,41	0
22	4	1,5	1,50	2,67	0,38	2,67	0,38	1
23	11,7	5,1	4,90	2,29	0,44	2,39	0,42	0
24	9	1,5	2,20	6,00	0,17	4,09	0,24	1
25	9,2	2,4	3,40	3,83	0,26	2,71	0,37	1
26	41,3	0,7	1,60	59,00	0,02	25,81	0,04	1
27	40	14	13,00	2,86	0,35	3,08	0,33	0
28	26	5	6,00	5,20	0,19	4,33	0,23	1
29	39	4	6,00	9,75	0,10	6,50	0,15	1
30	36	7	7,00	5,14	0,19	5,14	0,19	1
31	43	13	14,00	3,31	0,30	3,07	0,33	1
32	71	21	19,00	3,38	0,30	3,74	0,27	0
33	26	6	5,00	4,33	0,23	5,20	0,19	0
34	56	20	19,00	2,80	0,36	2,95	0,34	0
35	47	14	12,00	3,36	0,30	3,92	0,26	0
36	57	20	21,00	2,85	0,35	2,71	0,37	1
37	35	11	11,00	3,18	0,31	3,18	0,31	1
38	63	23	26,00	2,74	0,37	2,42	0,41	1
39	28	6	6,00	4,67	0,21	4,67	0,21	1
40	39	7	9,00	5,57	0,18	4,33	0,23	1
41	50	13	15,00	3,85	0,26	3,33	0,30	1
42	48	8	10,00	6,00	0,17	4,80	0,21	1
43	25	6	1,00	4,17	0,24	25,00	0,04	0
44	50	15	14,00	3,33	0,30	3,57	0,28	0

Продовження таблиці 1

Номер експерименту	Вхідний вплив			Порівняння				
	X_{1_sp1}	X_{1_sp2}	X_{1_ramp}	$\frac{X_{1_sp1}}{X_{1_sp2}}$	$\frac{X_{1_sp2}}{X_{1_sp1}}$	$\frac{X_{1_sp1}}{X_{1_ramp}}$	$\frac{X_{1_ramp}}{X_{1_sp1}}$	$X_{1_sp2} < X_{1_ramp}$
45	54	18	0,00	3,00	0,33	-	0,00	0
46	73	20	23,00	3,65	0,27	3,17	0,32	1
47	28	8	8,00	3,50	0,29	3,50	0,29	1
48	40	15	16,00	2,67	0,38	2,50	0,40	1
49	67	25	54,00	2,68	0,37	1,24	0,81	1
50	50	20	21,00	2,50	0,40	2,38	0,42	1
51	35	11	10,00	3,18	0,31	3,50	0,29	0
52	24	4	4,00	6,00	0,17	6,00	0,17	1
53	51	51	13,00	1,00	1,00	3,92	0,25	0
54	50	12	14,00	4,17	0,24	3,57	0,28	1
55	28	8	9,00	3,50	0,29	3,11	0,32	1

На підставі отриманих результатів можна зробити наступні висновки:

1. При застосуванні двохсхідчастого вхідного впливу для підвищення точності регулювання в одному випадку з вибірки не відбулося зменшення максимального динамічного перевищення. В декількох випадках спостерігається зменшення вказаного параметра на декілька порядків та в середньому в 3,8 рази в порівнянні з односхідчастим вхідним впливом.

2. При використанні програмної уставки в декількох випадках максимальне динамічне перевищення відсутнє, але в середньому його значення зменшується в 3,5 рази в порівнянні з односхідчастим вхідним впливом

3. В 41 випадку з 55 використання двохсхідчастого вхідного впливу зумовило виникнення максимального динамічного перевищення меншої амплітуди в порівнянні з використанням програмної уставки.

Висновки

Аналіз результатів проведених досліджень підтверджує гіпотезу про зменшення максимального динамічного перевищення більш ніж в 2,5 рази при застосуванні двохсхідчастої зміни заданого значення, та, як наслідок, підвищення динамічної точності регулювання. Визначено інтервал часу між східцями вхідного впливу, що забезпечує найбільш ефективну взаємну компенсацію реакцій на зміни уставки, а також запропоновано метод визначення вказаного інтервалу.

Встановлено, що застосування програмної (лінійно зростаючої) зміни уставки забезпечує кращі результати щодо зменшення максимального динамічного перевищення в порівнянні з односхідчастим вхідним впливом. Зважаючи на те, що вказаний тип уставки має програмну реалізацію у більшості сучасних контролерів, проте для забезпечення потрібної якості регулювання вимагає ретельного підбору значень швидкості зміни заданого значення.

Перелік використаних джерел:

1. Повышение динамической точности и быстродействия систем традиционной фазовой автоподстройки и систем фазовой автоподстройки частоты : монографія / В. Кривуца та ін. Київ : Ін-т електродинаміки НАН України, 2013. 227 с. URL: <https://www.nas.gov.ua/UA/Book/Pages/Default.aspx?BookID=0000007183>.
2. Repnikova N., Berdnyk Y., Hnyr V. Improving control accuracy in multi-connected digital systems. *Scientific Horizons*. 2022. Vol. 25. No. 7. Pp. 55-64. DOI: [https://doi.org/10.48077/sci-hor.25\(7\).2022.55-64](https://doi.org/10.48077/sci-hor.25(7).2022.55-64).
3. Babu P. S., Xavier N., Bandyopadhyay B. Robust output regulation for state feedback descriptor systems with nonovershooting behavior. *European Journal of Control*. 2020. Vol. 52. Pp. 19-25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejcon.2019.08.008>.
4. Schmid R., Ntogramatzidis L. Nonovershooting and nonundershooting exact output regulation. *Systems & Control Letters*. 2014. Vol. 70. Pp. 30-37. DOI:

- <https://doi.org/10.1016/j.sysconle.2014.05.003>.
5. Lu Y.-S., Li Y.-T., Liu S.-H. Initial-value compensation of a proportional–integral–derivative controller for non-overshooting motion. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*. 2017. Vol. 231. Iss. 8. Pp. 626-637. DOI: <https://doi.org/10.1177/0959651817717854>.
 6. Freiheit C., Anand D. M., Ossareh H. R. Overshoot Mitigation Using the Reference Governor Framework. *IEEE Control Systems Letters*. 2020. Vol. 4. Iss. 2. Pp. 518-523. DOI: <https://doi.org/10.1109/lcsys.2020.2966575>.
 7. Shamsuzzoha M., Skogestad S. The setpoint overshoot method: A simple and fast closed-loop approach for PID tuning. *Journal of Process Control*. 2010. Vol. 20. Iss. 10. Pp. 1220-1234. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2010.08.003>.
 8. Vijayan V., Panda R. C. Design of a simple setpoint filter for minimizing overshoot for low order processes. *ISA Transactions*. 2012. Vol. 51. Iss. 2. Pp. 271-276. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2011.10.006>.
 9. Kumar E. G., Gowthaman E. Cascade PID-lead compensator controller for non-overshoot time responses of unstable system. *Energy Procedia*. 2017. Vol. 117. Pp. 708-715. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.185>.
 10. Begum G., Radhakrishnan T. K. Performance assessment of control loops involving unstable systems for set point tracking and disturbance rejection. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2018. Vol. 85. Pp. 1-17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2018.01.024>.
 11. Abdelaty B. G., Ahmed A. H., Ouda A. N. Fixed set point weighting 2DOF PID controller for control processes. *Journal of engineering mathematics*. 2018. Vol. 2. Iss. 1. Pp. 21-27. DOI: <https://doi.org/10.11648/j.engmath.20180201.13>.
 12. Luyben W. L. Temperature setpoint-ramp control structure for batch reactors. *Chemical Engineering Science*. 2019. Vol. 208. 115124. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.07.042>.
 13. Ali A., Majhi S. PI/PID controller design based on IMC and percentage overshoot specification to controller setpoint change. *ISA Transactions*. 2009. Vol. 48. Iss. 1. Pp. 10-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2008.09.002>.
 14. Understanding Setpoint Ramping and Ramp/Soak Temperature Control. URL: <https://www.westcs.com/news/understanding-setpoint-ramping-and-rampsoak-temperature-control/> (дата звернення: 08.12.2023).
 15. Койфман О. О., Мірошніченко В. І., Сімкін О. І. Аналітичне дослідження методів ідентифікації об'єкта керування. *MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education* : Scientific monograph. Riga, Latvia : Baltija Publishing, 2023. Pp. 113-147. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-382-8-7>.

References:

1. V.H. Kryvutsa, H.F. Zaitsev, V.L. Bulhach, A.V. Samkov, A.P. Poponevych, and N.V. Hradoboeva, *Povishenye dynamicheskoi tochnosti y bistrodeistviya system tradytsyonnoi fazovoi avtopodstroiky y system fazovoi avtopodstroiky chastoti : monohrafiia* [Improving the dynamic accuracy and performance of traditional phase-locked loop systems and phase-locked loop systems: monograph]. Kyiv, Ukraine: In-t elektrodynamiky NAN Ukrainy, 2013. (Rus.)
2. N. Repnikova, Y. Berdnyk, and V. Hnyp, «Improving control accuracy in multi-connected digital systems», *Scientific Horizons*, vol. 25, no. 7, pp. 55-64, 2022. doi: **10.48077/scihor.25(7).2022.55-64**.
3. P.S. Babu, N. Xavier, and B. Bandyopadhyay, «Robust output regulation for state feedback descriptor systems with nonovershooting behavior», *European Journal of Control*, vol. 52, pp. 19-25, 2020. doi: **10.1016/j.ejcon.2019.08.008**.
4. R. Schmid, and L. Ntogramatzidis, «Nonovershooting and nonundershooting exact output regulation», *Systems & Control Letters*, vol. 70, pp. 30-37, 2014. doi: **10.1016/j.sysconle.2014.05.003**.
5. Y.-S. Lu, Y.-T. Li, S.-H. Liu, «Initial-value compensation of a proportional–integral–derivative controller for non-overshooting motion», *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, vol. 231, iss. 8, pp. 626-637, 2017. doi: **10.1177/0959651817717854**.

6. C. Freiheit, D.M. Anand, and H.R. Ossareh, «Overshoot mitigation using the reference governor framework», *IEEE Control Systems Letters*, vol. 4, iss. 2, pp. 518-523, 2020. doi: **10.1109/lcsys.2020.2966575**.
7. M. Shamsuzzoha, and S. Skogestad, «The setpoint overshoot method: A simple and fast closed-loop approach for PID tuning», *Journal of Process Control*, vol. 20, iss. 10, pp. 1220-1234, 2020. doi: **10.1016/j.jprocont.2010.08.003**.
8. V. Vijayan, and R.C. Panda, «Design of a simple setpoint filter for minimizing overshoot for low order processes». *ISA Transactions*, vol. 51, iss. 2, pp. 271-276, 2012. doi: **10.1016/j.isatra.2011.10.006**.
9. E.G. Kumar, and E. Gowthaman, «Cascade PID-lead compensator controller for non-overshoot time responses of unstable system», *Energy Procedia*, vol. 117. pp. 708-715, 2017. doi: **10.1016/j.egypro.2017.05.185**.
10. G. Begum, and T.K. Radhakrishnan, «Performance assessment of control loops involving unstable systems for set point tracking and disturbance rejection», *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, vol. 85, pp. 1-17, 2018. doi: **10.1016/j.jtice.2018.01.024**.
11. B.G. Abdelaty, A.H. Ahmed, and A.N. Ouda, «Fixed set point weighting 2DOF PID controller for control processes», *Journal of engineering mathematics*, vol. 2, iss. 1, pp. 21-27, 2018. doi: **10.11648/j.engmath.20180201.13**.
12. W.L. Luyben, «Temperature setpoint-ramp control structure for batch reactors», *Chemical Engineering Science*, vol. 208, art. no. 115124, 2019. doi: **10.1016/j.ces.2019.07.042**.
13. A. Ali, and S. Majhi, «PI/PID controller design based on IMC and percentage overshoot specification to controller setpoint change», *ISA Transactions*, vol. 48, iss. 1, pp. 10-15, 2009. doi: **10.1016/j.isatra.2008.09.002**.
14. Understanding Setpoint Ramping and Ramp/Soak Temperature Control. [Online]. Available: <https://www.west-cs.com/news/understanding-setpoint-ramping-and-rampsoak-temperature-control/>. Accessed on: December 08, 2023.
15. O.O. Koyfman, V.I. Miroshnychenko, and O.I. Simkin, «Analitichne doslidzhennia metodiv identyfikatsii obiekta keruvannia» [«Analytical study of control object identification methods»] in *MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education : Scientific monograph*. Riga, Latvia : Baltija Publishing, 2023, pp. 113-147. doi: **10.30525/978-9934-26-382-8-7**. (Ukr.)

Стаття надійшла 14.04.2024

Стаття прийнята 13.05.2024