



Г. Б. Крих, Г. Ф. Матіко, Б. А. Криль

Національний Університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ ЗА ПЕРЕХІДНИМИ ФУНКЦІЯМИ ЗАМКНУТОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

Проаналізовано активні методи ідентифікації в замкнутій системі автоматичного регулювання та досліджено метод ідентифікації об'єкта керування за двома перехідними функціями системи регулювання зі завадами. Першу перехідну функцію отримано в системі з пропорційно інтегральним (ПІ), другу – з пропорційно інтегрально диференціальним регуляторами (ПІД). Для пошуку моделі об'єкта керування за двома перехідними функціями сформовано критерій, застосування якого дало змогу зменшити середньоквадратичне відхилення перехідної функції знайденої моделі від заданої порівняно з моделями, знайденими за кожною з перехідних функцій замкнутої системи з різними регуляторами. Встановлено, що для ідентифікації об'єкта керування в замкнутій системі доцільно застосувати пропорційний регулятор (П). На основі перехідної функції такої системи є можливість із високою точністю оцінити передавальний коефіцієнт і відповідно сталі часу моделі об'єкта керування з самовирівнюванням. За кожною з отриманих моделей об'єкта керування розраховано оптимальні параметри налаштування ПІД регулятора. Засобами імітаційного моделювання проведено дослідження системи регулювання з отриманими моделями об'єкта керування та ПІД регулятором із різними налаштуваннями, на основі яких вироблено рекомендації щодо вибору моделі об'єкта керування, за якою необхідно налаштувати ПІД регулятор для забезпечення якісного та робастного керування.

Ключові слова: об'єкт керування; регулятор; система автоматичного регулювання; активні методи; перехідна функція; адекватність моделі.

Вступ. Ідентифікація об'єктів керування (ОК) у розімкнутих системах регулювання досить поширена, але на практиці не завжди придатна. Особливо це стосується ідентифікації астатичних об'єктів, а також технологічних об'єктів із жорсткими вимогами до відхилення вихідної величини, зумовленими умовами безпеки або економічними показниками (Mandloi & Shah, 2015). Альтернативними є методи ідентифікації об'єктів керування в замкнутих системах автоматичного регулювання (САР). Ці методи поділяють на прямі, непрямі, сумісні вхідні-вихідні методи (joint input-output methods) та двостадійні методи (Mandloi & Shah, 2015).

У прямих методах модель ОК визначають безпосередньо за сигналами на його вході та виході. Складність ідентифікації ОК в замкнутій САР прямими методами полягає у тому, що зміна регулюючої дії ОК залежить від вихідної (регульованої) величини ОК внаслідок дії зворотного зв'язку, і при цьому завади, що діють на вихід ОК, корелюють із регулюючою дією. Це може бути причиною неадекватності досліджуваної моделі ОК, як внаслідок неправильно отриманої структури і порядку моделі, так і зміщених оцінок параметрів моде-

лі. У непрямих методах ідентифікацію здійснюють за сигналами зміни заданого значення та вихідним сигналом ОК. Непрямий метод передбачає досконале знання моделі регулятора.

У сумісному вхідному-вихідному методі вихідний сигнал системи і вхідний сигнал ОК приймають за вихідні сигнали системи, спричинені зміною заданого значення і невимірюваними завадами. Ці методи дають змогу знайти модель ОК та регулятора, за умови, що структура регулятора відома. Звичайно, непрямий метод, а також сумісний вхідний-вихідний метод застосовують в системах із лінійним зворотним зв'язком, але можуть застосовуватись також і за наявності нелінійного зворотного зв'язку.

Двостадійний метод ідентифікації передбачає два етапи. На першому етапі передавальну функцію виконавчого механізму та об'єкта керування визначають у розімкнутій САР. При цьому замкнуту САР розглядають як розімкнуту САР. Необов'язково знати модель регулятора, якщо виміряні вхідний і вихідний сигнали. Особливістю цього методу є те, що ідентифікацію можна проводити і за відсутності моделі завад, але відно-

Інформація про авторів:

Крих Ганна Бориславівна, канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Email: gannakrih@gmail.com

Матіко Галина Федорівна, канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій. Email:

halynamatiko@gmail.com

Криль Богдан Андрійович, канд. техн. наук, ст. наук. співробітник, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій. Email: kril@robitnia.com

Цитування за ДСТУ: Крих Г. Б., Матіко Г. Ф., Криль Б. А. Ідентифікація об'єкта керування за перехідними функціями замкнутої системи автоматичного регулювання. Науковий вісник НЛТУ України. 2018, т. 28, № 1. С. 122–130.

Citation APA: Krykh, H. B., Matiko, H. F., & Kril, B. A. (2018). Identification of Controlled Plant by Step Response of Closed Loop Control System. *Scientific Bulletin of UNFU*, 28(1), 122–130. <https://doi.org/10.15421/40280125>

шення корисного сигналу до завод повинно бути великим. Власне тому застосування двостадійного методу ідентифікації не завжди є можливим у системах зі значним рівнем завод. На другому етапі ідентифікації ОК вхідний сигнал фільтрується за допомогою передавальної функції, яка використовується як змінний генератор входу без завод.

Для знаходження динамічної моделі технологічного об'єкта, обладнаного системою автоматичного регулювання, найбільше поширилися активні експериментальні методи ідентифікації об'єкта регулювання, в яких змінюють задане значення регульованої величини (Mandloi & Shah, 2015). Ці методи еквівалентні експериментальним методам знаходження моделей за кривими розгону, імпульсними перехідними характеристиками, частотними характеристиками об'єкта керування. Перевагами таких методів є зручність формування стрибкоподібного, імпульсного або синусоїдного детермінованих сигналів, а також можливість ідентифікації ОК під час зміни (стрибкоподібної, імпульсної) заданого значення, зумовленого вимогами технологічного регламенту.

У хімічних технологіях та в процесах інших галузей найчастіше застосовують одноконтурні САР (температури, тиску, концентрації тощо) з ПІ та ПІД регуляторами, які задовольняють вимоги щодо якості регулювання. На практиці ідентифікацію ОК здійснюють у класі лінійних моделей із зосередженими параметрами, для яких розроблено чимало методів розрахунку оптимальних параметрів налаштування регулятора (Mandloi & Shah, 2015). Тому знаходження адекватної моделі ОК у межах допустимих відхилень вхідної та вихідної величин є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідженню методів знаходження моделі об'єкта керування за перехідними процесами замкнутої САР, спричиненими зміною заданого значення приділяють багато уваги. У роботі (Kealy & O'Dwyer, 2002) наведено результати знаходження моделі ОК у вигляді послідовно з'єднаних двох аперіодичних ланок і ланки запізнення за перехідним процесом САР із ПІ регулятором, отриманим стрибкоподібною зміною заданого значення. Коефіцієнт передачі ПІ регулятора налаштовують так, щоб досягти коливного процесу. Час запізнення моделі ОК встановлюють безпосередньо за перехідним процесом. Коефіцієнт передачі ОК визначають за коефіцієнтом передачі регулятора та усталеним значенням вихідної величини. Сталі часу аперіодичних ланок визначають за чотирма показниками коливного процесу САР: перша, друга, третя амплітуди коливного процесу та тривалість першої амплітуди.

У роботі (Mamat & Fleming, 1995) розглянуто метод знаходження параметрів моделі першого порядку із запізненням за реакцією САР із ПІ-регулятором на стрибкоподібну зміну заданого значення. Параметри налаштування пропорційної та інтегральної складових регулятора вибирають такими, щоб отримати в системі збіжний коливний процес. Цей процес апроксимують коливною ланкою другого порядку та ланкою запізнення. За отриманим перехідним процесом визначають п'ять характеристик коливного процесу: усталене значення вихідної величини, першу, третю амплітуди та їх моменти часу. За значеннями цих показників визначають параметри коливної ланки і час запізнення. Знаючи модель замкнутої системи і модель регулятора, знаходять модель ОК.

У роботі (Suganda, et al., 1998) перехідний коливний процес також апроксимують коливною ланкою та ланкою запізнення подібним способом, що і в роботі (Mamat & Fleming, 1995). За отриманою моделлю знаходять частоту ω_π , на якій фаза системи становить $-\pi$, та амплітуду на цій частоті, на основі яких розраховують чотири параметри моделі ОК другого порядку із запізненням.

Порівняння методів ідентифікації ОК у розімкнутій та замкнутій системі проведено в дослідженні (Ramachandran, et al., 2005). Проаналізований також вплив невимірюваних збурень на результати ідентифікації. Параметри вибраних моделей визначено числовими методами Нелдера-Міда, BFGS (функції Matlab *fminsearch* і *fmincon*), а також Solver в Excel. Ці три методи дали практично однакові результати. Автори зробили висновок, що ідентифікація ОК у замкнутій системі забезпечує точніші моделі для налаштування контролера.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Розв'язання задачі ідентифікації ОК за перехідною функцією замкнутої САР в умовах дії збурень є неоднозначним, і остаточний вибір моделі ОК потребує додаткових досліджень. Це зумовлене тим, що різні структури моделі можуть виявитися рівноцінними за вибраним критерієм. Тому для знаходження адекватної моделі ОК необхідно проаналізувати метод ідентифікації за двома перехідними функціями САР із різними налаштуваннями регулятора та сформулювати критерій, за яким здійснюють перевірку адекватності знайденої моделі ОК. Оскільки ідентифікація ОК необхідна для налаштування регулятора в САР, то вибір моделі ОК залежить також і від ефективності її застосування в системі. САР зі знайденими параметрами регулятора повинна забезпечувати певний запас стійкості навіть за помилково прийнятої моделі ОК або в умовах зміни властивостей об'єкта. Для встановлення моделі ОК, за якою необхідно налаштувати регулятор, необхідно провести порівняльний аналіз процесів регулювання для отримання робастної САР.

Формулювання мети дослідження. Метою роботи є дослідження непрямого методу ідентифікації об'єкта керування в замкнутій системі автоматичного регулювання та вдосконалення алгоритму ідентифікації об'єкта керування за перехідними функціями замкнутої системи. На основі аналізу перехідних процесів САР, отриманих за різних налаштувань регулятора, виробити рекомендації щодо вибору моделі ОК для розрахунку параметрів регулятора, які забезпечували б запас стійкості САР не менший від заданого.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої в роботі мети, зокрема, для побудови математичних моделей об'єкта керування, регулятора та всієї системи загалом, застосовано методи математичного моделювання. Для розроблення програм знаходження параметрів моделей ОК за перехідними функціями САР у середовищі Matlab застосовано методи алгоритмізації та програмування, а також числові методи.

Результати дослідження та їх обговорення. Серед непрямої методів ідентифікації об'єкта керування в замкнутій системі автоматичного регулювання (рис. 1) найпростішим є метод знаходження моделі $W_{OK}(s)$ за перехідним процесом САР за стрибкоподібною зміною заданого значення $x_{зад}$ регульованої величини. При цьому вважають, що відомий закон регулювання $W_{AP}(s)$ авто-

матичного регулятора і відомі значення його параметрів налаштування.

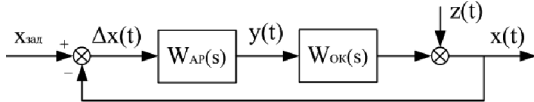


Рис. 1. Спрощена схема системи автоматичного регулювання

У САР із низьким рівнем завад $z(t)$, задача побудови моделі ОК в замкнутій САР за її перехідною функцією полягає у знаходженні структури та параметрів моделі, застосування якої забезпечує однакову реакцію досліджуваної САР та її моделі на одиничну стрибкоподібну зміну заданого значення регульованої величини. Зазвичай критерієм якості моделі вибирають середньоквадратичне відхилення (СКВ) розрахованих значень $x_p(t)$ перехідної функції САР зі знайденою моделлю ОК від експериментальних значень вихідної величини $x(t)$

$$\sigma_{CAP} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_p(t_i) - x(t_i))^2} \quad (1)$$

Під час застосування середньоквадратичного критерію ймовірність того, що за відсутності завад шукані параметри моделі будуть відповідати істинним, є максимальною.

Якщо на ОК діють завади, то параметри шуканої моделі об'єкта керування, структура і порядок якої априорно відомі, можуть бути зміщеними. Для підвищення точності побудови моделі ОК в замкнутій САР можна застосувати різні методи, один з яких полягає у визначенні моделі ОК за двома перехідними функціями, отриманими за відомих різних законів регулювання і параметрів налаштування регулятора (Semenov, et al., 2003). Порівняємо результати ідентифікації ОК за перехідними функціями САР із завадами з ПІ регулятором та з ПІД регулятором, отриманих шляхом імітаційного моделювання. Для дослідження вибрано лінійну модель четвертого порядку для інерційного ОК із самовирівнюванням

$$W_{OK}(s) = \frac{k}{(Ts+1)^4} \quad (2)$$

з передавальним коефіцієнтом $k=1,246$ і сталою часу $T=15$.

Моделі регуляторів

$$W_{PI}(s) = 0,6222 + \frac{0,0226}{s}, \quad W_{PID}(s) = 0,8510 + \frac{0,0296}{s} + 5s \quad (3)$$

вибрали з умови забезпечення заданого запасу стійкості САР.

Параметри моделі ОК визначали окремо за кожною з перехідних функцій, а також за двома разом, застосовуючи оптимізаційну функцію *fminsearch* середовища Matlab. Для окремих перехідних функцій застосували критерій оптимальності (1). Для пошуку параметрів моделі ОК за двома перехідними функціями системи запропонували середньоквадратичний критерій

$$J = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N [(x_{p1}(t_i) - x_1(t_i)) \cdot (x_{p2}(t_i) - x_2(t_i))]^2}, \quad (4)$$

де: $x_1(t_i), x_2(t_i)$ – значення перехідних функцій із завадами САР із ПІ та ПІД регуляторами відповідно; $x_{p1}(t_i), x_{p2}(t_i)$ – значення перехідних функцій САР із ПІ та ПІД регуляторами, розраховані зі знайденою моделлю ОК.

На рис. 2 (криві 1) зображено змодельовані перехідні функції САР із завадами з ПІ та ПІД регуляторами. Для формування завад використали стаціонарний білий

шум. Метод Нелдера-Міда (*fminsearch* в Matlab) застосували для отримання оптимальних параметрів моделі (2). Критеріальні функції σ_{CAP} і J залежать від двох шуканих параметрів, а саме – передавального коефіцієнта k і сталої часу T . Під час ітерацій ці параметри моделі ОК змінюються так, щоб досягти найкращої апроксимації перехідних функцій, тобто досягти мінімуму σ_{CAP} або J .

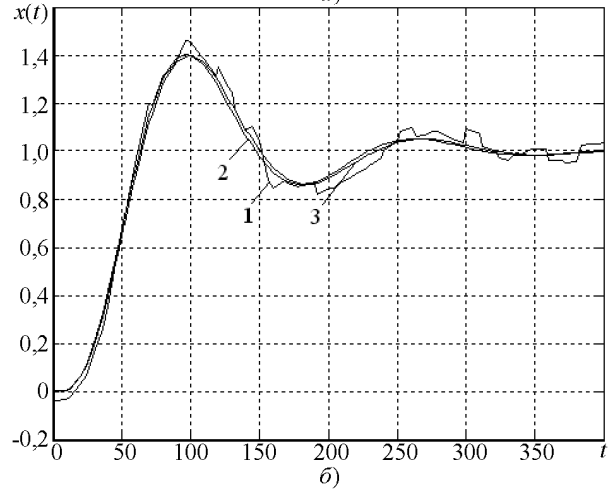
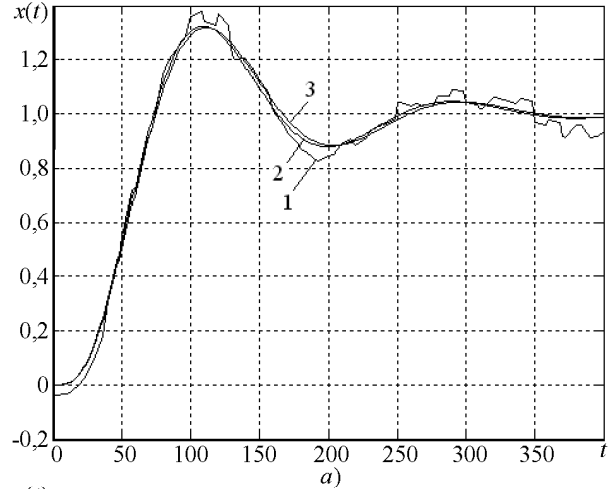


Рис. 2. Перехідні функції САР: а) з ПІ регулятором; б) з ПІД регулятором: 1 – зі завадами; 2 – розраховані за моделлю ОК, отриманою за двома перехідними функціями зі завадами; 3 – розраховані за заданими моделями ОК і регулятора

Табл. 1. Оптимальні значення параметрів моделі (2), знайдені за перехідними функціями САР із завадами

Перехідна функція САР із завадами	Параметри моделі ОК	σ_{CAP}	σ_{OK}	Зведена похибка, $ \delta_{OK \max} , \%$
3 ПІ регулятором	$k=1,3297,$ $T=15,2217$	0,0280	0,0733	6,72
3 ПІД регулятором	$k=1,3310,$ $T=16,0250$	0,0344	0,0706	6,82
3 ПІ регулятором та ПІД регулятором	$k=1,2755,$ $T=14,8399$	0,0336 0,0625	0,0282	2,53

У табл. 1 наведено результати ідентифікації ОК, а також значення середньоквадратичного відхилення σ_{OK} перехідних функцій ОК, розраховані за знайденою моделлю $x_{OK}(t)$ та заданою перехідною функцією $x_s(t)$ ОК, та значення максимальної зведеної похибки апроксимації $\delta_{OK \max}$

$$\sigma_{OK} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{OK}(t_i) - x_s(t_i))^2}$$

$$\delta_{OK \max} = \max \left| \frac{(x_{OK}(t) - x_S(t))}{k} \right| \cdot 100. \quad (5)$$

З результатів апроксимації перехідних функцій замкнутої САР видно, що найкращою є модель ОК

$$W_{OK}(s) = \frac{1,2755}{(14,8339s + 1)^4}, \quad (6)$$

знайдена за двома перехідними функціями системи з ПІ та ПД регуляторами.

Середньоквадратичне відхилення перехідної функції ОК, розраховане за моделлю (6), від перехідної функції заданої моделі

$$W_{OK}(s) = \frac{1,246}{(15s + 1)^4} \quad (7)$$

має найменше значення $\sigma_{OK} = 0,0282$. Так само найменше значення 2,53 % має і зведена похибка апроксимації для цієї моделі ОК. Звернемо увагу на такі особливості отриманих результатів ідентифікації ОК. Знайдена за двома перехідними функціями модель ОК у кожній із перехідних функцій системи дає значення СКВ, які перевищують середньоквадратичні відхилення САР із моделями ОК, знайденими за окремо взятими перехідними функціями згідно з критерієм (1). Так, для системи з ПІ регулятором $\sigma_{CAP} = 0,0336 > 0,0280$, а для системи з ПД регулятором $\sigma_{CAP} = 0,0625 > 0,0344$.

Розраховані перехідні функції САР із моделлю (6), знайденою за двома перехідними функціями САР із завадами, зображено на рис. 2, криві 2. Для порівняння, на рис. 2 показано також криві 3, що відповідають перехідним функціям заданих систем без завод.

За отриманими моделями знайдено перехідні функції ОК (рис. 3).

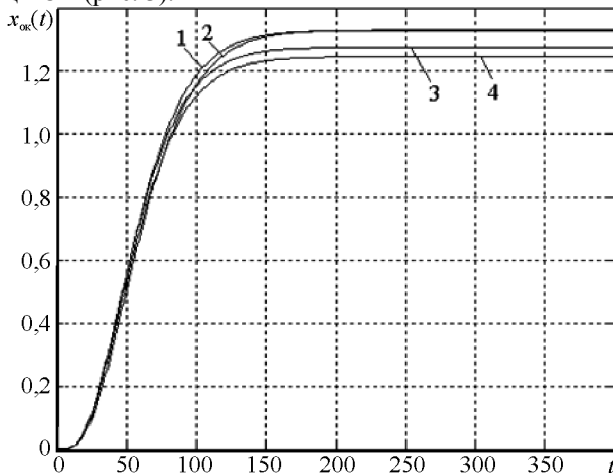


Рис. 3. Перехідні функції ОК, отримані: 1) за моделлю, знайденою з перехідної функції САР із завадами з ПІ регулятором; 2) за моделлю, знайденою з перехідної функції САР із завадами з ПД регулятором; 3) за моделлю, знайденою за двома перехідними функціями САР із завадами; 4) за заданою моделлю ОК

Властивість одноконтурних САР із ПІ та ПД регуляторами полягає у підтриманні регульованої величини на заданому значенні незалежно від діючих на об'єкт збурень. Така властивість є необхідною і корисною для процесів регулювання, проте для розв'язання поставленої задачі знаходження моделі об'єкта регулювання із самовирівнюванням за перехідною характеристикою САР саме ця властивість унеможливіє точну оцінку передавального коефіцієнта ОК. Це видно з перехідних функцій, отриманих за знайденими моделями ОК (див. рис. 3, криві 1, 2, 3), які мають завищені значення k , порівняно з зада-

ним (див. рис. 3, крива 4). Для підвищення точності побудови моделі ОК із самовирівнюванням проаналізували спосіб ідентифікації ОК у замкнутій системі з ПІ регулятором, порівнявши з ідентифікацією за перехідною функцією замкнутої САР із ПД регулятором.

Методика знаходження моделі ОК за цим способом ідентифікації полягає у такому: 1) під час ідентифікації ОК вимикають І- та Д-складову регулятора; 2) знімають перехідну характеристику САР із ПІ регулятором, змінюючи задане значення регульованої величини; 3) статичний передавальний коефіцієнт ОК визначають за формулою

$$k = \frac{1 - \Delta_{ст}}{k_p \Delta_{ст}}, \quad (8)$$

де: k_p – параметр налаштування пропорційної складової регулятора; $\Delta_{ст}$ – статична похибка регулювання; 4) на основі апріорної інформації вибирають структуру та порядок моделі ОК; 5) визначають параметри моделі, що характеризують динамічні властивості ОК; 6) адекватно вважають модель, що забезпечить найменше значення вибраного критерію якості.

Запропоновану методику застосували для ідентифікації об'єкта керування за значеннями перехідних функцій САР із завадами, отриманими шляхом структурного моделювання системи з передавальною функцією об'єкта керування (7) за одиничної стрибкоподібної зміни заданого значення. Першу перехідну функцію отримали в САР із ПІ регулятором ($k_p = 0,8510$), другу – з ПД регулятором (3). Оскільки кінцевою метою ідентифікації ОК є не тільки мінімізація вибраного критерію, а й забезпечення заданої якості регулювання, то аналізували моделі різних структур. Зокрема, досліджували моделі ОК у вигляді двох, трьох, чотирьох послідовно з'єднаних аперіодичних ланок, а також модель у вигляді аперіодичної ланки другого порядку з ланкою запізнення.

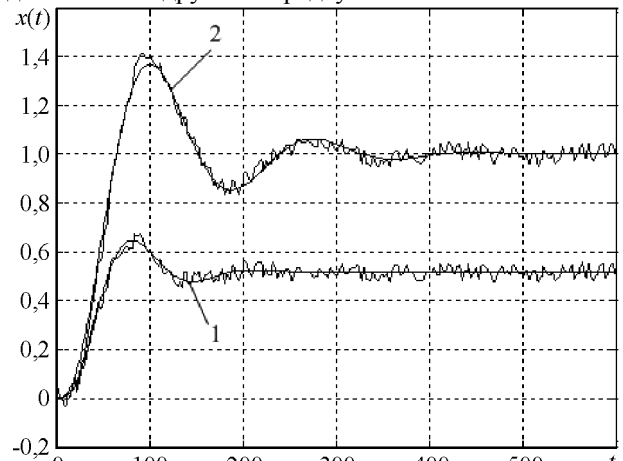


Рис. 4. Перехідні функції з завадами САР із ПІ (крива 1) та ПД (крива 2) регуляторами

Згідно з першим пунктом методики з перехідної функції САР із ПІ регулятором спочатку за формулою (8) розраховують передавальний коефіцієнт k моделі ОК. Параметри досліджуваних моделей, що характеризують динаміку (сталі часу T , час запізнення τ), визначають за результатами розв'язання оптимізаційної задачі з критерієм оптимальності (1) за допомогою розроблених програм в середовищі Matlab. Для порівняння розв'язували також задачу пошуку оптимальних параметрів моделей ОК різних структур за перехідною функцією САР із завадами з передавальною функцією ПД

регулятора. Перехідні функції із завадами САР із П та ПД регуляторами зображено на рис. 4. Статичну похибку регулювання в САР із П регулятором визначали як математичне сподівання значень перехідної функції у хвостовій частині, що становила $\Delta_{cm}=(1-$

$0,51465)=0,48535$, з якої за формулою (8) визначено передавальний коефіцієнт ОК $k=1,246$.

Результати ідентифікації з вибраними моделями зведено у табл. 2, в якій подано значення знайдених параметрів моделей, значення σ_{CAP} та σ_{OK} .

Табл. 2. Результати ідентифікації ОК

№	Досліджувана модель ОК	Перехідна функція САР із завадами	Параметри моделі ОК	σ_{CAP}	σ_{OK}
1	$W_{OP}(p) = \frac{k}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}$	з П регулятором	$k=1,2460, T=31,794$	0,0385	0,0498
		з ПД регулятором	$k=1,8764, T_1=38,759, T_2=38,759$	0,0709	0,4955
2	$W_{OP}(p) = \frac{k}{(Tp + 1)^3}$	з П регулятором	$k=1,2460, T=20,337$	0,0274	0,0193
		з ПД регулятором	$k=1,4611, T=22,112$	0,0407	0,1753
3	$W_{OP}(p) = \frac{k}{(Tp + 1)^4}$	з П регулятором	$k=1,2460, T=14,877$	0,0203	0,0029
		з ПД регулятором	$k=1,2592, T=15,58$	0,0250	0,0144
4	$W_{OP}(p) = \frac{ke^{-p\tau}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}$	з П регулятором	$k=1,2460, T=23,916, \tau=15,524$	0,0211	0,0169
		з ПД регулятором	$k=1,1950, T=22,097, \tau=19,704$	0,0221	0,0564
5	$W_{OP}(p) = \frac{1,246}{(15p + 1)^4}$	з П регулятором	$k=1,2460, T=15$	0,0204	0
		з ПД регулятором	$k=1,2460, T=15$	0,032	0

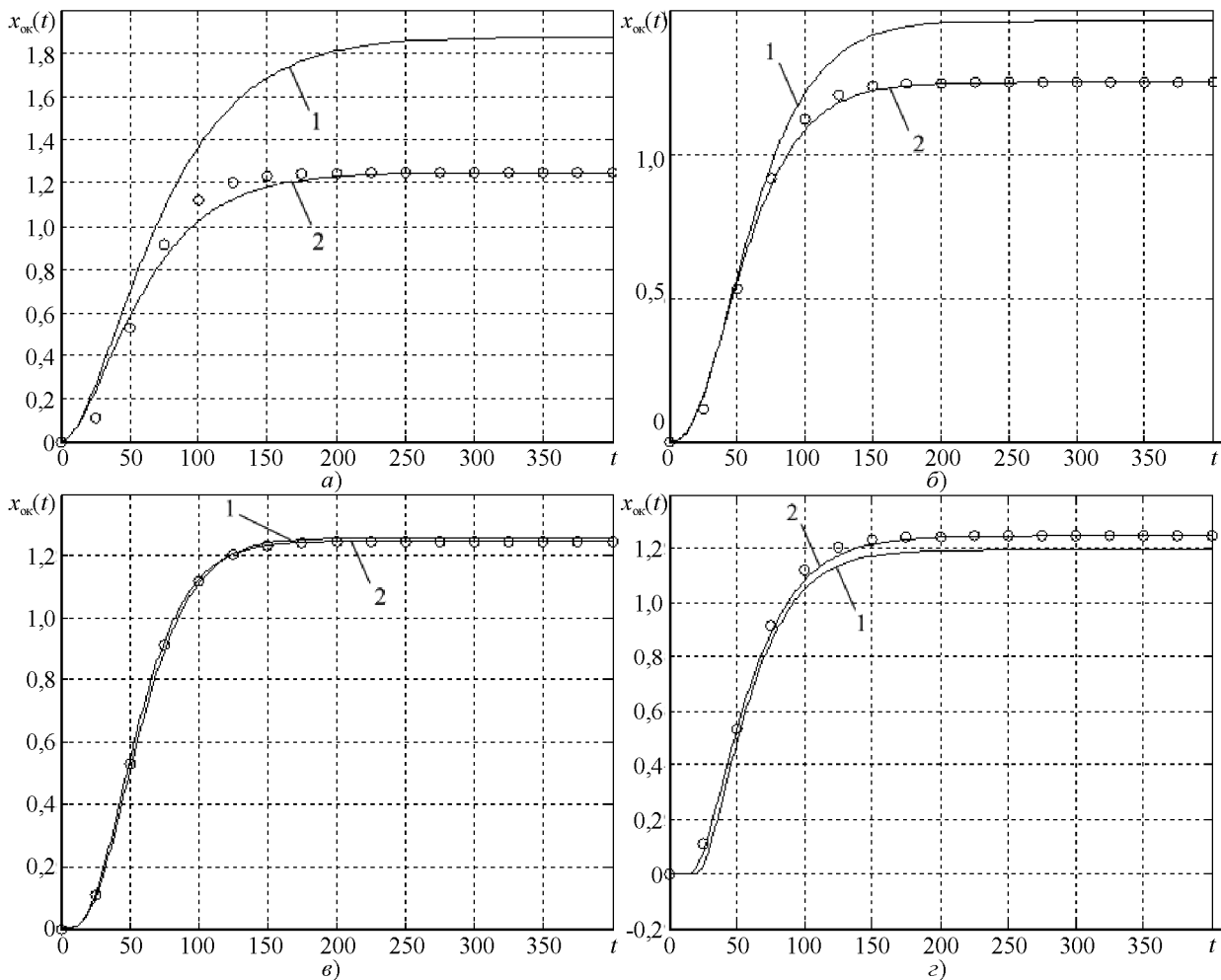


Рис. 5. Перехідні функції ОК заданої моделі ('o') та отримані з перехідних функцій: 1 – САР із ПД регулятором; 2 – САР із П регулятором для: а – моделі № 1; б – моделі № 2; в – моделі № 3; г – моделі № 4

Очікуваним результатом є те, що для всіх структур моделей ОК (№ 1, 2, 3 і 4 табл. 2) середньоквадратичне відхилення σ_{CAP} мають менші значення для замкнутої САР із П регулятором порівняно з ідентифікацією ОК у системі з ПД регулятором. Це пояснюють тим, що за перехідними процесами САР із П регулятором безпосередньо визначають передавальний коефіцієнт ОК. Отож, модель четвертого порядку для САР із П регуля-

тором є найкращою, в тому сенсі, що її застосування дає найменше значення $\sigma_{CAP}=0,0203$, відповідно і $\sigma_{OK}=0,0029$ також набуває найменшого значення. Якщо порівнювати результати ідентифікації ОК за перехідним процесом системи з ПД регулятором, то найкращими моделями з найменшими значеннями вибраного критерію (1) є модель другого порядку зі запізненням ($\sigma_{CAP}=0,0221$) і модель четвертого порядку ($\sigma_{CAP}=0,0250$).

Важливо відзначити, що порівнюючи σ_{OK} цих двох моделей, найменше значення середньоквадратичного відхилення від заданої перехідної функції має все ж таки модель четвертого порядку. В останньому рядку таблиці показано значення середньоквадратичного відхилення σ_{CAP} системи з різними регуляторами під час застосування заданої моделі, які зумовлені дією завад у САР.

Отримані результати ідентифікації зображено на рис. 5, з якого чітко видно, що перехідні функції ОК, побудовані за знайденими моделями в системі з П регулятором, краще збігаються зі заданою перехідною функцією.

Зауважимо, що за даними ідентифікації, наведеними у табл. 1 і 2, середньоквадратичне відхилення $\sigma_{OK}=0,0029$ для моделі ОК четвертого порядку, отриманої за перехідною функцією САР із П-регулятором на порядок менші, ніж для моделі, отриманої з перехідних процесів САР із ПД регулятором ($\sigma_{OK}=0,0706$), а також для моделі, отриманої за двома перехідними функціями САР ($\sigma_{OK}=0,0282$). Тому надалі проаналізуємо моделі, які отримані саме з перехідної функції САР із П-регулятором.

За результатами ідентифікації моделі за перехідною функцією замкнутої САР із П регулятором значення середньоквадратичного відхилення σ_{CAP} виявилися майже однаковими для двох моделей – четвертого порядку і другого порядку зі запізненням. Перша з отриманих моделей за умовами дослідження не викликає сумнівів, друга – потребує дослідження в замкнутій САР. Кінцевий вибір моделі ОК залежатиме від робастності та спроможності САР забезпечити якість регулювання.

Табл. 3. Параметри ПД регулятора, розраховані за досліджуваними моделями, та показники якості перехідних функцій САР з ОК четвертого порядку та другого порядку зі запізненням

№	Модель ОК, за якою розраховані параметри регулятора	Параметри регулятора	Досліджувана модель	J_2	x_{max}	t_r	t_s	m
1	$W_{OP}(p) = \frac{k}{(T_1p+1)(T_2p+1)}$	$k_p=6,1979$ $k_i=0,2001$ $k_d=47,9$	четвертого порядку	–	–	–	–	–
			другого порядку зі запізненням	–	–	–	–	–
2	$W_{OP}(p) = \frac{k}{(Tp+1)^3}$	$k_p=2,47$ $k_i=0,0465$ $k_d=32,8$	четвертого порядку	20,313	0,3170	33	191	0,227
			другого порядку зі запізненням	25,915	0,4677	30	190	0,206
3	$W_{OP}(p) = \frac{k}{(Tp+1)^4}$	$k_p=1,0399$ $k_i=0,0245$ $k_d=11,0$	четвертого порядку	28,394	0,0985	64	123	0,578
			другого порядку зі запізненням	29,621	0,0750	66	137	1,012
4	$W_{OP}(p) = \frac{ke^{-p\tau}}{(T_1p+1)(T_2p+1)}$	$k_p=1,5249$ $k_i=0,0295$ $k_d=19,6$	четвертого порядку	22,387	0,1127	48	138	0,418
			другого порядку зі запізненням	24,280	0,0900	48	111	0,773
5	$W_{OP}(p) = \frac{1,246}{(15p+1)^4}$	$k_p=1,0406$ $k_i=0,0243$ $k_d=11,1$	четвертого порядку	28,325	0,0943	65	122	0,584
			другого порядку зі запізненням	29,554	0,0708	67	136	1,044

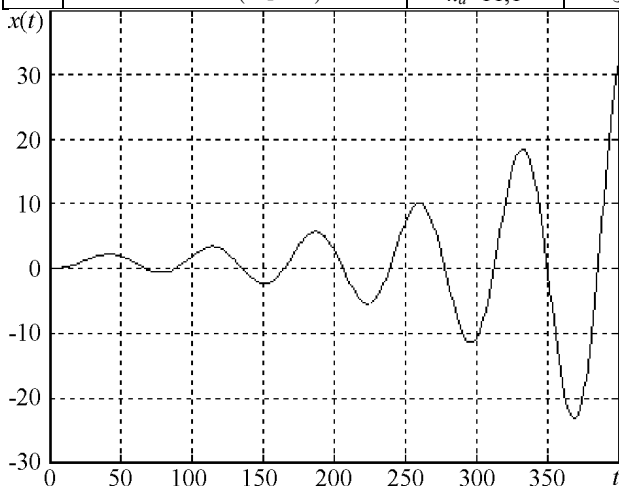


Рис. 6. Перехідна функція САР з об'єктом четвертого порядку та параметрами ПД регулятора, знайденими за моделлю другого порядку

Саме тому розрахуємо параметри настроювання ПД регулятора для всіх моделей ОК, отриманих у замкнутій САР із П регулятором.

Параметри ПД регулятора визначено з умови мінімізації значення другої інтегральної оцінки під час забезпечення однакового запасу стійкості (ступінь коливальності $m=0,6$) та однакового співвідношення між часом диференціювання T_d диференціальної та часом ізодому T_{iz} інтегровальної складових регулятора ($T_d/T_{iz}=0,25$). Далі змодельуємо перехідні функції САР із конкуруючими моделями ОК (четвертого та другого порядку зі запізненням) та ПД регулятором із різними налаштуваннями, що розраховані для всіх досліджуваних моделей ОК. За отриманими перехідними процесами визначимо такі показники якості: другу інтегральну оцінку J_2 , час t_r , за який регульована величина вперше досягає заданого значення, максимальне динамічне відхилення x_{max} , ступінь коливальності m та час регулювання t_s .

Результати розрахунку параметрів ПД регулятора за моделями, отриманими в замкнутій САР із П регулятором, а також показники якості САР з об'єктом четвертого порядку та об'єктом другого порядку зі запізненням відображено у табл. 3.

Графіки перехідних процесів САР з ОК четвертого порядку та другого порядку із запізненням та ПД регулятором із параметрами настроювання з табл. 3, отриманих шляхом імітаційного моделювання, зображено на рис. 6 і 7.

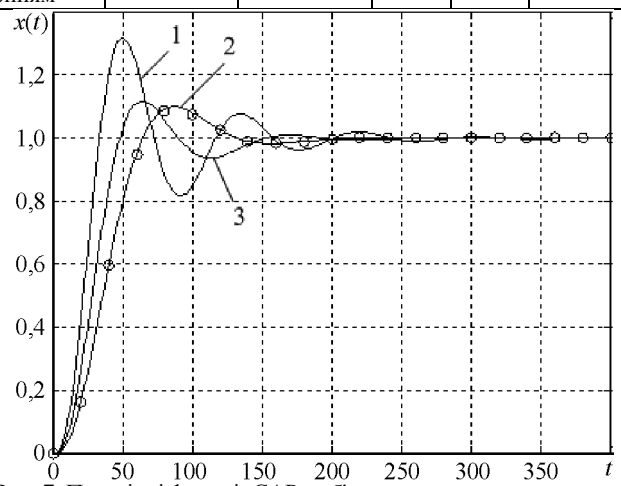


Рис. 7. Перехідні функції САР з об'єктом четвертого порядку з параметрами ПД регулятора, розрахованими за моделями: 1) третього порядку; 2) четвертого порядку; 3) другого порядку зі запізненням; 'o' – заданим об'єктом

Передусім зазначимо, що САР із ПІД-регулятором, розрахованим за моделлю ОК другого порядку, є нестійкою (див. рис. 6). Інші три САР із параметрами ПІД регулятора, розрахованими за моделями третього, четвертого, а також другого порядку з запізненням є стійкими, але мають різні показники якості (див. рис. 7). Зокрема, перехідні процеси САР 1 і 3 з об'єктом четвертого порядку на рис. 7 мають найменші значення другої інтегральної оцінки J_2 (відповідно 20,313 і 22,631), а також часу t_r – це 33 і 48 с. Натомість їх максимальне динамічне відхилення x_{max} і час регулювання (за 2% похибки) є більшими, ніж у перехідному процесі 2, отриманому з ПІД регулятором, розрахованому за моделлю ОК четвертого порядку. Так для перехідного процесу $2x_{max}=0,0985$ (проти 0,3170 і 0,1170 для кривих 1 і 3), а час регулювання $t_s=123$ с, що значно менше, ніж у процесах 1 і 3 – 191 с і 140 с відповідно. Це означає, що САР із перехідним процесом 2 має істотно більший запас стійкості, що підтверджено і високим значенням ступеня коливальності ($m=0,578$). І отже, параметри ПІД регулятора, розраховані за моделлю ОК четвертого порядку, забезпечують найменший час регулювання і найбільший запас стійкості, достатній для отримання якісних показників навіть після зміни властивостей ОК.

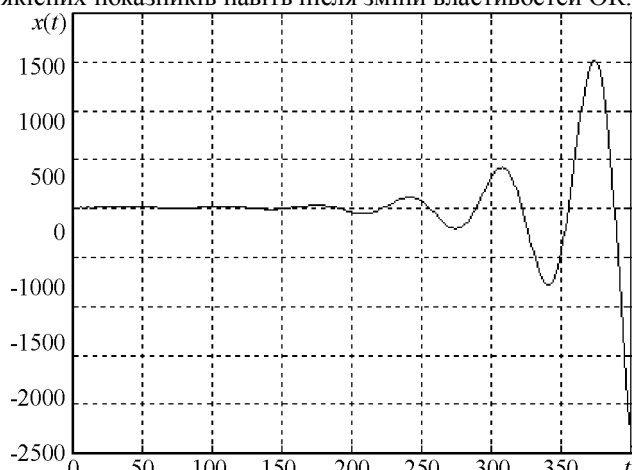


Рис. 8. Перехідна функція САР з об'єктом другого порядку зі запізненням і параметрами ПІД регулятора, знайденими за моделлю другого порядку

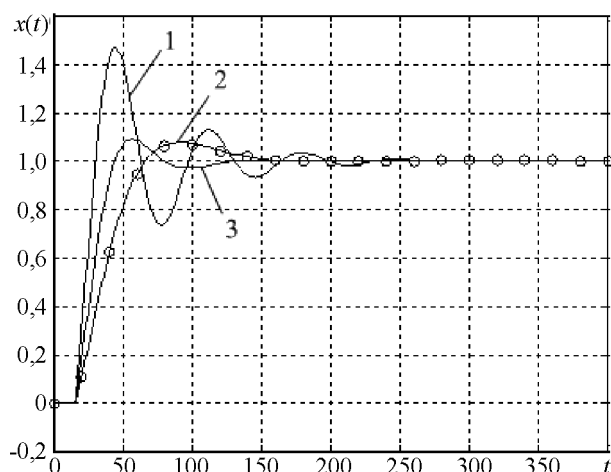


Рис. 9. Перехідні функції САР з об'єктом другого порядку зі запізненням та параметрами ПІД регулятора, розрахованими за моделями: 1) третього порядку; 2) четвертого порядку; 3) другого порядку зі запізненням; 'o') заданим об'єктом

Далі проаналізуємо перехідні функції САР з ОК, що описується моделлю другого порядку зі запізненням, та

ПІД регулятором, налаштованими за різними моделями ОК. Результати моделювання наведено у табл. 3, перехідні функції – на рис. 8 і 9.

Так само, як і для ОК із моделлю четвертого порядку, за параметрів настроювання ПІД регулятора, розрахованих за моделлю другого порядку, САР втрачає стійкість (див. рис. 8). За параметрів настроювання, розрахованих за моделлю третього порядку, запас стійкості САР менший від допустимого. За швидкодією найкращим є перехідний процес 3 з параметрами ПІД регулятора, розрахованими за моделлю другого порядку із запізненням. Найбільший запас стійкості матиме САР із параметрами ПІД регулятора, розрахованими за моделлю ОК четвертого порядку.

Метод імітаційного моделювання дає змогу, порівняно з експериментальним методом, дослідити САР із параметрами настроювання з різними об'єктами, що описуються моделями другого-четвертого порядку. Для аналізу результатів дослідження порівнювали перехідні функції САР із параметрами ПІД регулятора, розрахованими за моделлю ОК четвертого порядку, і ОК, що описується моделями другого, третього та другого порядку із запізненням (рис. 10). Для тих самих ОК на рис. 11 показано перехідні процеси САР із регулятором, налаштованим за моделлю другого порядку зі запізненням.

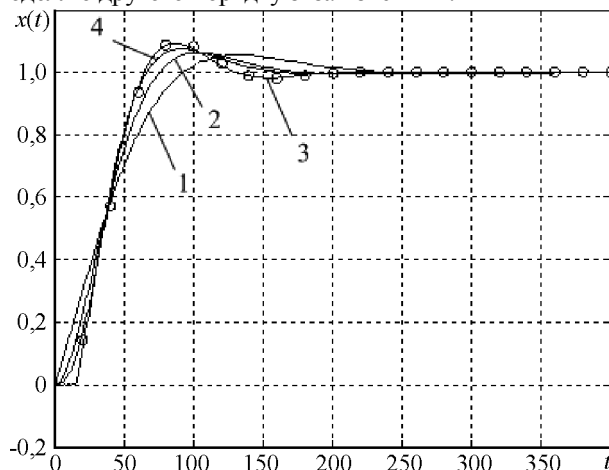


Рис. 10. Перехідні функції САР із параметрами настроювання ПІД регулятора, розрахованими за моделлю четвертого порядку: 1) ОК другого порядку; 2) ОК третього порядку; 3) ОК четвертого порядку; 4) ОК другого порядку зі запізненням; 'o') заданий ОК

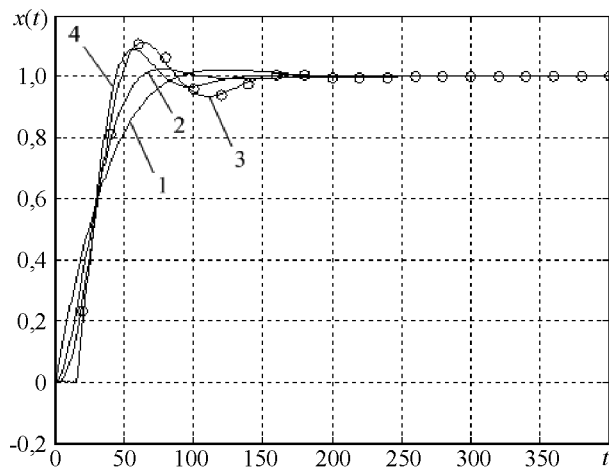


Рис. 11. Перехідні функції САР із параметрами настроювання ПІД регулятора, розрахованими за моделлю другого порядку із запізненням: 1) ОК другого порядку; 2) ОК третього порядку; 3) ОК четвертого порядку; 4) ОК другого порядку зі запізненням; 'o') заданий ОК

На рис. 12 і 13 для порівняння зображено також перехідні процеси САР із налаштуваннями регулятора, виконаними за моделями третього і другого порядку відповідно для всіх досліджуваних моделей. З рис. 10–13 також чітко видно, що найкращими моделями для налаштування регулятора є моделі ОК четвертого і другого порядку зі запізненням.

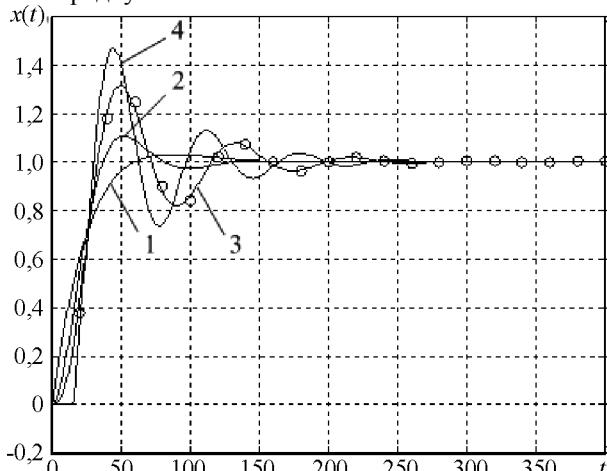


Рис. 12. Перехідні функції САР із параметрами настроювання ПІД регулятора, розрахованими за моделлю третього порядку: 1) ОК другого порядку; 2) ОК третього порядку; 3) ОК четвертого порядку; 4) ОК другого порядку із запізненням; 'o') заданий ОК

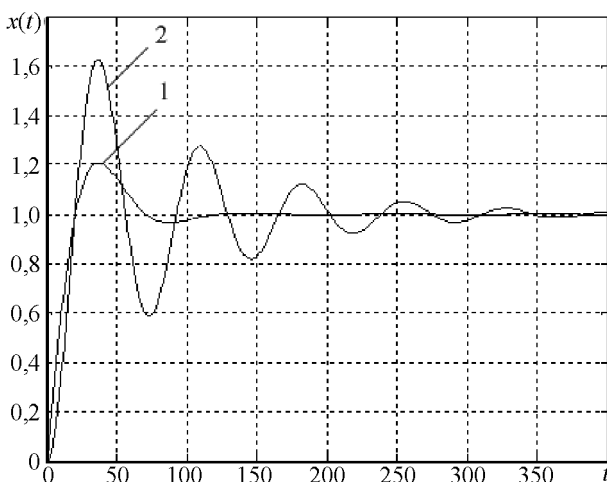


Рис. 13. Перехідні функції САР із параметрами настроювання ПІД регулятора, розрахованими за моделлю другого порядку: 1) ОК другого порядку; 2) ОК третього порядку

Аналіз результатів імітаційного моделювання показав, що вибір моделі ОК є компромісним між моделлю, застосування якої забезпечить заданий час регулювання за допустимого запасу стійкості, та моделлю, що забезпечує запас стійкості не менше заданого за допустимого часу регулювання. Підсумок виконаних досліджень є такий: модель ОК четвертого порядку є найкращою для налаштування САР. У системі з параметрами ПІД регулятора, розрахованими за цією моделлю, час регулювання є меншим, а запас стійкості відповідає заданому. Якщо властивості ОК зміняться так, що найкращою з умови мінімізації $\sigma_{САР}$ виявиться модель другого порядку зі запізненням, то САР із налаштуваннями за моделлю четвертого порядку забезпечить перехідний процес зі ще більшим запасом стійкості ($m=1,012$), хоча з дещо більшим часом регулювання (від 120 до 137 с). Якщо ж прийняти адекватною модель другого порядку із запізненням і налаштування ПІД регулятора здійснити за

цією моделлю, то САР буде мати найменший час регулювання і запас стійкості не менший від заданого. У САР із цими налаштуваннями та ОК із моделлю четвертого порядку запас стійкості зменшиться, хоча ще буде достатнім ($m=0,414$), а час регулювання збільшиться до 140 с зі 111 с.

Висновки та перспективи подальшого дослідження. Дослідження, виконані шляхом моделювання, показали, що метод ідентифікації об'єкта керування за перехідними функціями в замкнутій САР, отриманими за різних законів регулювання або за різних параметрів настроювання регулятора, дає змогу отримати адекватну модель, навіть за наявності завад. Істотно підвищує якість ідентифікації ОК із самовирівнюванням застосування в САР П-регулятора, за перехідним процесом якого можна визначити статичний передавальний коефіцієнт ОК. Результати моделювання доводять, що ідентифікація ОК в замкнутій системі з П регулятором дає менше середньоквадратичне відхилення, ніж під час застосування ПІД регулятора.

Якщо під час ідентифікації ОК за перехідною функцією замкнутої САР виявиться, що дві моделі мають майже однакові значення критерію якості, а саме середньоквадратичного відхилення розрахованої перехідної функції від заданої, то, як показали дослідження, для налаштування регулятора краще вибирати модель вищого порядку, яка забезпечить у разі зміни властивостей об'єкта збільшення запасу стійкості, хоча і під час більшого часу регулювання. Таким чином, ідентифікація ОК в замкнутій САР є корисною для налаштування автоматичного регулювання та аналізу перехідних процесів САР.

У реальних динамічних системах похибки ідентифікації ОК залежатимуть також від невідомих характеристик завад, які діють на об'єкт, від можливих неконтрольованих збурень, від реальних характеристик автоматичного регулятора та його параметрів настроювання, від невизначеності роботи інших елементів САР. Усі ці невизначеності впливатимуть на похибку ідентифікації ОК. Тому надалі отримані результати ідентифікації ОК в замкнутій САР необхідно перевірити експериментально і за потреби для створення ефективної системи керування удосконалити алгоритм ідентифікації, зокрема, завдяки формуванню критерію ідентифікації.

Перелік використаних джерел

- Kealy, T., & O'Dwyer, A. (2002). Comparison of open- and closed-loop process identification techniques in the time domain. *Proceedings of the 3rd Wismarer Automatisierungssymposium, Wismar, Germany*, Paper 1, 3–4.
- Mamat, R., & Fleming, P. J. (1995). Method for on-line identification of a first order plus dead-time process model. *Electronic Letters*, 31(15), 1297–1298. <https://doi.org/10.1049/el:19950865>
- Mandloi, R., & Shah, P. (2015). Methods for Closed Loop System Identification in Industry. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 7(1), 892–896.
- Ramachandran, R., Lakshminarayanan, S., & Rangaiah, G. P. (2005). Process identification using open-loop and closed-loop step responses. *Journal of The Institution of Engineers*, 45(6), 1–13.
- Semenov, A., Artamonov, D., & Briukhachev, A. (2003). Идентификация объектов управления. [Controlled plant identification]. Penza. [In Russian].
- Suganda, P., Krishnaswamy, P. R., & Rangaiah, G. P. (1998). On-line process identification from closed loop tests under PI control. *Chemical Engineering Research and Design*, 76(A4), 451–457.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ ПО ПЕРЕХОДНЫМ ФУНКЦИЯМ ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Проанализированы активные методы идентификации в замкнутой системе автоматического регулирования, а также исследован метод идентификации объекта управления по двум переходным функциям системы регулирования с помехами. Первая переходная функция получена в системе с пропорционально интегральным (ПИ), вторая – с пропорционально интегрально дифференциальным регуляторами (ПИД). Для поиска модели объекта управления по двум переходным функциям сформирован критерий, применение которого позволило уменьшить среднеквадратичное отклонение переходной функции найденной модели от заданной по сравнению с моделями, полученными по каждой из переходных функций замкнутой системы с различными регуляторами. Установлено, что для идентификации объекта управления в замкнутой системе целесообразно применить пропорциональный регулятор. На основе переходной функции такой системы становится возможным с высокой точностью оценить коэффициент передачи и соответственно постоянные времени модели объекта управления с самовывравниванием. Для каждой из найденных моделей объекта управления рассчитаны оптимальные параметры настройки ПИД регулятора. Средствами имитационного моделирования проведены исследования системы регулирования с полученными моделями объекта управления и ПИД регулятором с различными настройками, на основе которых выработаны рекомендации для выбора модели объекта управления, по которой необходимо настраивать ПИД регулятор для обеспечения качественного и робастного управления.

Ключевые слова: объект управления; регулятор; система автоматического регулирования; активные методы; переходная функция; адекватность модели.

H. B. Krykh, H. F. Matiko, B. A. Kril

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

IDENTIFICATION OF CONTROLLED PLANT BY STEP RESPONSE OF CLOSED LOOP CONTROL SYSTEM

The authors have analyzed active identification methods at closed loop control system in their research. We have investigated the method of identification of controlled plant using two step responses of control system with noise. The first step response is obtained from a system with a proportional integral (PI) controller, and the second – with proportional integral differential (PID) controller. A criterion was proposed to build a model of controlled plant by two step responses. It allowed reducing the mean square deviation of step response of the found model from the set model compared to the models found by each step response of a closed system with different controllers. The proportional controller is recommended to be used for the plant identification at closed loop control system. It is possible to determine the transfer coefficient with high accuracy and the time constants of the model of stable controlled plant using step response of such a system. The optimal setting parameters of PID controller are calculated for each of the models of the controlled plant. The control system with found models of controlled plant and PID controller with different settings are investigated by means of simulation. The recommendations to choose the best model of the controlled plant are worked out based on the simulation results. This model is proposed to be used for tuning the controller to ensure high-quality and robust control. In real dynamic systems the results of controlled plant identification will also depend on the unknown characteristics of the noise that act on the object, on possible uncontrolled disturbances, on the real characteristics of controller and its settings, on the uncertainty of the other elements of the control system. All these uncertainties will cause the error of controlled plant identification. Therefore the results of plant identification at closed loop control system should be verified experimentally. Then the identification algorithm should be improved on the base of experimental results if it is necessary or the identification criterion should be corrected in order to create an effective control system.

Keywords: controlled plant; controller; automatic control system; active methods; step response; adequacy of the model.