

СИНТЕЗ ОДНОВИМІРНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ З ВРАХУВАННЯМ ШУМІВ ВИМІРЮВАННЯ

А. О. Стопакевич, О.А. Стопакевич

Державний університет інтелектуальних технологій та зв'язку,
1, Кузнечна, Одеса, 65029, stopakevich@gmail.com
Національний університет «Одеська політехніка»,
1, пр. Шевченка, Одеса, 65044, stopakevich@opu.ua

Мета роботи – розробити новий метод синтезу одновимірних систем автоматичного керування з П, ПІ та ПІД законів керування для статичних й астатичних об'єктів керування, метою якого є мінімізація впливу шуму вимірювань на динамічні властивості системи керування без ускладнення структури каналу керування. Сфера застосування методу – задачі стабілізації певних швидких процесів, які переважну частину свого часу керуються регуляторами в режимі, коли похибка керування близька до похибки вимірювання. Наприклад, це може бути стабілізація температури в теплообміннику чи регулювання витрати (тиску). Поставлена мета досягається шляхом розв'язку наступних задач: 1) розробка правил для регуляторів ПІД-типу для статичних та астатичних об'єктів керування з запізненням, які досягають гарантовану величину відношення вихідної дисперсії до вхідної (за моделлю білого шуму); 2) дослідити правила на моделі технологічного об'єкту, яка враховує особливості роботи засобів автоматизації в каналі керування.. Найбільш істотним результатом роботи є метод, який представляє набір нескладних правил, аналогічних до правил інших відомих методів настройки регуляторів ПІД-типу. Як еталонна модель об'єктів керування розглядається модель в вигляді поєднання ланки (інерційної чи інтегральної) першого порядку з запізненням, при чому метод є придатним й для важкокерованих об'єктів керування, тобто з наявним істотним чи домінуючим запізненням. На прикладі застосування розробленого методу для керування температурою в теплообміннику бражної колоні з застосуванням ПІ-регулятора показано, що метод дозволяє знизити дисперсію на чверть у порівнянні з регулятором, отриманим за допомогою програми pidtune. Аналогічні результати досягаються й для інших регуляторів ПІД-типу.

Ключові слова: система керування, одновимірний регулятор, ПІД, білий шум, дисперсія, метод настройки

Вступ

Задача синтезу одновимірних систем керування може включати багато аспектів і є істотно багатокритеріальною [1-5]. Якщо розглядати лінійні моделі об'єктів керування, наприклад в передаточних функціях, то за такими моделями звичайно ставиться задача розробки регулятора, який відповідає певним прямим показникам якості та/або показникам робастності. Найбільш полярними параметрами в межах звичайної постановки задачі синтезу одновимірних САК часто є швидкість перехідних процесів та запас стійкості. За межі звичайної задачі винесено все те, що відноситься до особливостей програмно-технічної реалізації каналу керування, а саме проблема точності цифрової реалізації каналів керування, врахування особливостей роботи виконавчих механізмів та датчиків, чутливість регуляторів до зміни параметрів тощо.

Якщо розглядати типовий випадок одновимірного регулятора – регулятор ПІД-типу, то неповнота звичайної задачі при його застосуванні частіше за все ігнорується чи компенсується певними емпіричними методами. Одним з факторів, який звичайно ігнорується – це шум вимірювання, який присутній в будь-якому каналі керування. В роботі [6] продемонстровано, що наявність шумів вимірювання

в каналі керування робить динаміку системи автоматичного керування (САК) достатньо далекою від модельної за максимальними амплітудами відхилення та інтегральними показниками якості. Це продемонстровано на прикладі ПІ-регулятора для теплообмінного апарату.

Якщо ж додати Д-складову до регулятора, то виникають додаткові проблеми з реалізацією та роботою диференційної складової в реальних контурах керування [7]. Теоретично при керуванні Д-складовою може збільшити швидкість перехідних процесів й зменшити коливальність, яку додає І-складовою, однак тільки якщо параметр Д-складової підібраний вірно, коливальність може й погіршитись. Тим не менш, при технічній реалізації ці переваги можуть й не спрацювати, оскільки Д-складовою буде реагувати на невраховані шуми вимірювання й мати похибку реалізації операції, що замість якісного керування буде лише зношувати виконавчий механізм. Частково проблема нейтралізується шляхом додавання фільтру нижніх частот (інерційну ланку з постійною часу біля $0.1 \dots 0.2 \cdot T_d$), що робить регулятор постійним коефіцієнтом на високих частотах й може привести до формулювання 4-х параметричної задачі [9] з визначенням бажаної постійної часу фільтру реального диференціатора. Всі поширені правила настройки регуляторів ПІД-типу не застосовують 4-й параметр, як й приладові регулятори чи програмні системи часто не дозволяють його змінювати. Серед популярних методів настройки регуляторів ПІД-типу 4-й параметр дозволяє визначити MATLAB-програма `pidtune`, але параметри шуму при цьому не задаються. Задача може бути й ускладнена до 5-ти параметрів, якщо також додати параметр порядку знаменника реального диференціатора.

Альтернативний варіант до реального диференціатора запропонований в монографії [2] в якій рекомендується фільтрувати вихід всього ПІД-регулятора інерційною ланкою другого порядку. Фільтрувати можна також й вимірювання, що потенційно може зробити регулятор менш чутливим до шумів й збільшити робастність, але, з іншого боку, це змінює та уповільнює динаміку об'єкту керування (ОК). Це також збільшує кількість необхідних параметрів настройки регулятора.

Показовою є робота [10], у якій проаналізована задача синтезу системи керування з фільтром Баттенворта для сигналу вимірювання

$$F(s) = \frac{1}{0.5 \cdot T_f^2 \cdot s^2 + T_f \cdot s + 1}$$

Розглядається проблема синтезу ПІ- та ПІД-регуляторів для ОК, представлених моделями в вигляді поєднання інерційної ланки першого порядку з запізненням та більш складними типами моделей. В роботі продемонстровано, що потужний фільтр знижує коливання керуючого впливу коштом зниження якості перехідних процесів, тому вибір постійної часу фільтру – окрема проблема. Більш того, невдалий вибір фільтру викликає додаткові проблеми з робастністю. Цікаво також, що порядок фільтру істотно впливає на динамічні показники системи керування й процедура вибору постійної часу фільтру орієнтується на відношення часу запізнення до постійної часу об'єкту. Зміна динамічних властивостей САК при застосуванням фільтру робить задачу зв'язаною, настройки регулятора треба розраховувати разом з параметрами фільтру. Ускладнення структури регулятора ускладнює також й проблеми цифрової реалізації регулятора, оскільки регулятор необхідно реалізовувати власноруч програмним чином. Крім того, введення фільтру накладає додаткові обмеження на вибір кроку дискретності САК.

У цілому, досвід промислової автоматизації показує що для складних інерційних технологічних процесів проблема врахування шумів звичайно жорстко не стоїть й часто не є першочерговою, так як їх інерційність є часто більшою за інерційність датчика. Звичайно задача керування каналами в таких об'єктах зводиться до застосування ПІ-закону керування для уникнення проблем з

диференційною складовою. Однак в технологічних схемах багатьох технологічних процесів присутні задачі стабілізації певних швидких процесів, які переважну частину свого часу керуються регуляторами в режимі, коли похибка керування близька до похибки вимірювання. Наприклад, це може бути стабілізація температури в теплообміннику чи регулювання витрати (тиску). Як правило, такі процеси описуються доволі точно моделями в вигляді поєднання ланки (інерційної чи інтегральної) першого порядку з запізненням. Для регуляторів таких процесів бажано, щоб вони виконували не тільки стабілізацію, але й були одночасно певним фільтром низьких частот. Однак розв'язувати багатопараметричні задачі для зменшення проблеми впливу шумів для таких простих контурів керування не є розповсюдженою інженерною практикою, більш практичним є спробувати нейтралізувати проблему шумів вимірювання в межах типового ПІД-закону, обравши задачу мінімізації дисперсії шумів як основний критерій синтезу САК.

Мета роботи

Мета роботи – розробити метод настройки регуляторів ПІД-типу, який мінімізує вихідну дисперсію керованої змінної в залежності від вхідної за певним законом. При чому метод не має ставити додаткових вимог: встановлення певних фільтрів, перерахунок параметрів моделі та ін. Метод має представляти набір нескладних правил, аналогічних до правил інших відомих методів настройки регуляторів ПІД-типу. Як еталонна модель ОК розглядається модель в вигляді поєднання ланки (інерційної чи інтегральної) першого порядку з запізненням, при чому метод має бути придатним й для важкокерованих ОК, тобто з наявним істотним чи домінуючим запізненням.

Задачі роботи

В роботі будуть розв'язані наступні задачі: 1) розробити правила для регуляторів ПІД-типу, які керують статичними та астатичними ОК з запізненням і досягають гарантовану величину відношення вихідної дисперсії до вхідної (за моделлю білого шуму); 2) дослідити ефективність правил на моделі технологічного об'єкту, яка враховує особливості роботи засобів автоматизації в каналі керування.

Розробка правил настройки для регуляторів ПІД-типу

Правила застосовуються для моделі в вигляді ланки першого порядку з запізненням (FOPDT). Розглядаються як статичні (з самовирівнюванням), так і астатичні (без самовирівнювання) ОК. Відправною базою для розробки правил став удосконалений метод Циглера-Ніколсона [2], який для статичних ОК визначає пропорційну настройку регулятора k_p за фактором, який включає час запізнення τ , постійну часу T та коефіцієнт передачі k моделі ОК. В запропонованому методі фактор має вигляд $\pi \cdot T / (4 \cdot \tau)$ для астатичних ОК й $(\pi \cdot T / (4 \cdot \tau) + 0.5) / k$ для статичних ОК. Також, основою методу для статичних ОК з ПІ та ПІД регуляторами є експериментально встановлена нами залежність $\omega \cdot \tau = f(T / \tau)$, показана на рис.1.

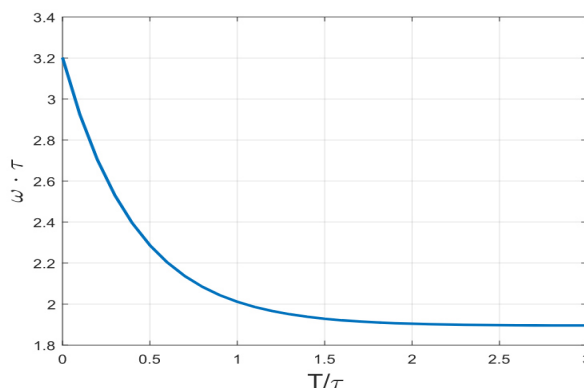


Рис. 1. Залежність $\omega \cdot \tau = f(T / \tau)$

Приведена на рис.1. залежність може бути описана формулою:

$$\omega \cdot \tau = 1.312 \cdot \exp(-2.395 \cdot T / \tau) + 1.89 \cdot \exp(0.0007932 \cdot T / \tau). \quad (1)$$

Розроблені формули настройки регуляторів ПІД-типу для FOPDT об'єктів при дії випадкових шумів вимірювань з оцінкою їх впливу на дисперсію виходу приведені в табл.1.

Таблиця 1

Розроблені формули настройки регуляторів ПІД-типу для FOPDT об'єктів при дії випадкових шумів вимірювань з оцінкою їх впливу на дисперсію виходу

Регулятор	Об'єкт	Настройка	Дисперсія виходу
k_p	$k \cdot e^{-\tau \cdot s} / (T \cdot s)$	$k_p = \pi \cdot T / (4 \cdot \tau)$	$\sigma_y = \sigma_u / k_p$
k_p	$k \cdot e^{-\tau \cdot s} / (T \cdot s + 1)$	$k_p = (\pi \cdot T / (4 \cdot \tau) + 0.5) / k$	$\sigma_y = \frac{\sigma_u \cdot k}{1 + k \cdot k_p}$
$k_p + \frac{k_i}{s}$	$k \cdot e^{-\tau \cdot s} / (T \cdot s + 1)$	$k_p = 0.9 \cdot (\pi \cdot T / (4 \cdot \tau) + 0.5) / k$ $k_i = 0.2 \cdot k_p \cdot \omega$	$\sigma_y = \frac{\sigma_u \cdot k}{1 + k \cdot k_i \cdot T}$
$k_p + \frac{k_i}{s} + k_d \cdot s$	$k \cdot e^{-\tau \cdot s} / (T \cdot s + 1)$	$k_p = 1.2 \cdot (\pi \cdot T / (4 \cdot \tau) + 0.5) / k$ $k_i = 0.32 \cdot k_p \cdot \omega$ $k_d = 0.75 \cdot k_p / \omega$	$\sigma_y = \frac{\sigma_u \cdot k}{1 + k \cdot k_p \cdot T}$
$k_p + \frac{k_i}{s}$	$k \cdot e^{-\tau \cdot s} / (T \cdot s)$	$k_p = 0.9 \cdot \pi \cdot T / (4 \cdot \tau)$, $k_i = 0.2 \cdot T / \tau^2$	Залежність не встановлена, застосування не рекомендується
$k_p + \frac{k_i}{s} + k_d \cdot s$	$k \cdot e^{-\tau \cdot s} / (T \cdot s)$	$k_p = 0.3 \cdot \pi \cdot T / \tau$, $k_i = 0.45 \cdot T / \tau^2$, $k_d = 0.45 \cdot T$	

Дослідження правил настройки на моделі технологічного процесу

Розглянемо приклад застосування розробленого методу для керування температурою в теплообміннику бражної колони з застосуванням ПІ-регулятора.

Модель каналу «Витрата холодної води (% ходу виконавчого механізму) - температура води, що відходить (°C) має вигляд:

$$P_{\Delta G \rightarrow \Delta T_{\text{outer}}} = \frac{-0.285}{268 \cdot s + 1} \cdot e^{-74 \cdot s}$$

Прийmemo номінал керованої змінної: 50°C, керуючого впливу: 70%.

Для вимірювання температури виберемо датчик ТСП-012-011 з показником теплової інерції, що дорівнює 15 с.

Виберемо крок дискретності системи керування рівним $\Delta t = 1$ с.

Тип регулятора: ПІ-регулятор виду з методом дискретизації Backward Euler.

Модель САК з датчиком показана на рис. 2.

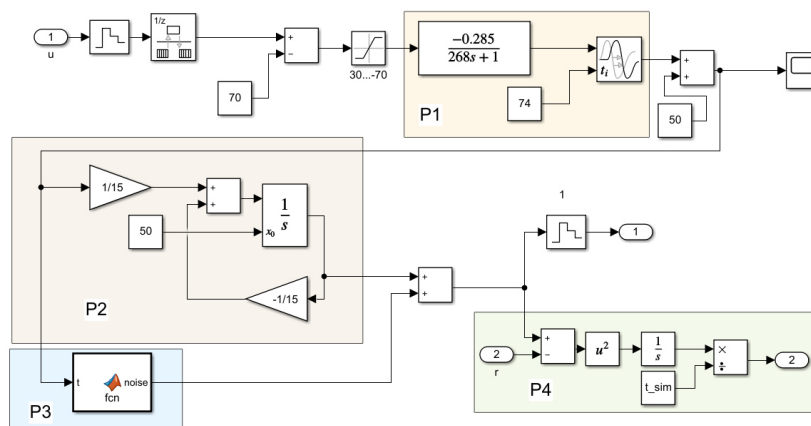


Рис. 2. Структурна схема моделі САК (підсистема Матлаб), яка вміщує модель каналу, датчика та розрахунок дисперсії керованої змінної

Модель об’єкту реалізуємо як підсистему. Входами підсистеми є керуючий вплив з регулятора u й завдання r . Частина P1 моделює динаміку каналу керування в відносних координатах. Частина P2 моделює інерційність давача. Частина P3 моделює похибку давача. Частина P4 розраховує дисперсію керованої змінної. Змінна t_sim визначає час моделювання.

Методика моделювання давача та код моделювання приведено в роботі [6].

Порівняємо метод синтезу, реалізований в функції `pidtune` (в блоці Simulink PID), та запропонований метод мінімізації дисперсії. Щоб зрівняти шанси регуляторів, зведемо модель об’єкту до FOPDT, оскільки з моделлю давача вона стала моделлю другого порядку. Використавши варіант методу Сімою для отримання FOPDT моделі, отримаємо редуковану модель виду

$$W_r = \frac{-0.285}{239.8006 \cdot s + 1} \cdot e^{-117.1632 \cdot s}$$

Далі, для спрощення не будемо брати знак мінус в коефіцієнті при синтезі, а врахуємо його в зворотному зв’язку. Функція `pidtune` для нас дає такі коефіцієнти: $k_p = 4.03$, $k_i = 0.016$. Запропонований метод мінімізації дисперсії дає такі налаштування: $k_p = 6.66$, $k_i = 0.0216$.

Промодельуємо дві САК з ПІ-регуляторами й однаковими об’єктами по завданню. Зверху регулятор, що синтезовано `pidtune`, нижче – методом мінімізації дисперсії. Як бачимо на рис.3, дисперсія в другому випадку на 1/4 менша.

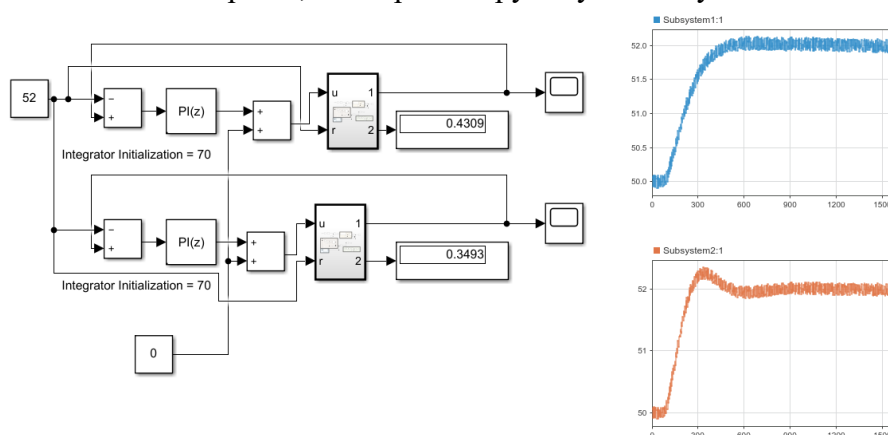


Рис. 3. Модель та результати моделювання двох САК за завданням. Якщо промодельувати за завданням й збуренням одночасно, то тенденція зберігається.

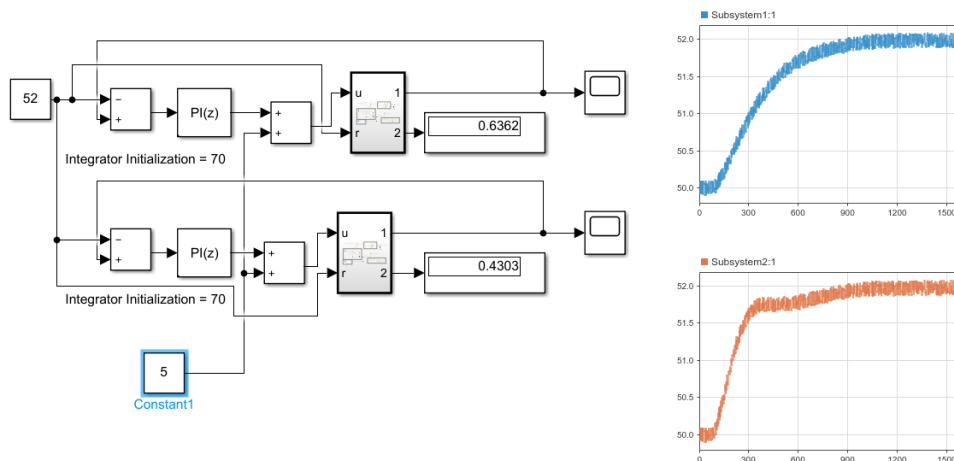


Рис. 4. Модель та результати моделювання двох САК за заданням та збуренням одночасно

Аналогічні до приведених результати досягаються й при використанні інших запропонованих правил.

Висновки

Розроблено метод синтезу одновимірних систем керування з типовими регуляторами ПІД-типу та об'єктів, динаміка яких описуються статичною чи астатичною FOPDT моделлю, який відрізняється тим, що дозволяє врахувати вплив дисперсії вимірювань на дисперсію керованої змінної. Формули метода базуються на врахуванні традиційного для настроювання регуляторів ПІД-типу відношення τ / T . Рекомендована сфера застосування методу – об'єкти з малими збуреннями, похибка керування в яких значної мірою залежить від шуму датчика, який можна оцінити по його нормованій похибці.

Список літератури

1. O'Dwyer A. Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules. London : Imperial College Press, 2006.
2. Åström K., Hägglund T. Advanced PID control. Research Triangle Park, NC: ISA, 2006.
3. Стопакевич А.О. Синтез регулятора в дискретному часі з заданим часом встановлення перехідного процесу. *Інформатика та математичні методи в моделюванні*. 2020. Т.10, №3-4. С. 208-221. <https://doi.org/10.15276/imms.v10.no3-4.208>
4. Stopakevych A., Stopakevych O., Tigariev A., Tigarieva T. A simple method for a precise solution of the digital optimal controllers design problem for SISO objects with delay. *Proceedings of O.S.Popov Odesa National Academy of Telecommunications*. 2019. No.2. P. 104-114.
5. Стопакевич А.А. Проектирование робастных регуляторов объектами с большим запаздыванием. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2016. Т. 1, №2 (79). С. 48-56. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.59107>
6. Стопакевич А. О. Моделирование погрешности датчика температуры при разработке высокоточных ИУС. *Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості*. 2015. №. 2. С. 85-88.
7. Vilanova R., Visioli A. (eds.). PID Control in the Third Millennium, Advances in Industrial Control. London: Springer-Verlag, 2012.
8. Денисенко В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации. *СТА*. 2007. №4. С.86-97

9. Isaksson A.J., Graebe S.F. Derivative filter is an integral part of PID design. *IEE Proceedings - Control Theory and Applications*, 2002. Vol. 149, № 1. P. 41-45. <https://doi.org/10.1049/ip-cta:20020111>
10. Segovia V. R., Hägglund T., Åström K. Measurement noise filtering for PID controllers. *Journal of Process Control*. 2014. Vol. 24, № 4. P. 299–313. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2014.01.017>

DESIGN OF SISO CONTROL SYSTEMS ACCOUNTING MEASUREMENT NOISES

Andrii Stopakevych, Oleksii Stopakevych

National University of Intellectual Technologies and Communications,
1, Kuznechna street, Odesa, 65029, Ukraine, stopakevich@gmail.com
National Odesa Polytechnic University,
1, Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine, stopakevich@op.edu.ua

The paper aims to develop a new method of designing one-dimensional automatic control systems with P, PI, and PID control laws. The method scope is static and astatic plants, and it aims to minimize the influence of measurement noise on the dynamic properties of the control system. Achievement of this aim should be without complicating the structure of the control channel. The scope of the method is the problems of stabilization of relatively fast processes, which most of the time are controlled by regulators in the mode when the control error is close to the measurement error. Examples of such problems are: temperature stabilization in a heat exchanger or flow (pressure) control. The goal is achieved by solving the following tasks: 1) to develop rules for PID-type controllers for static and astatic control plants with a dead tune, which achieve a guaranteed value of the ratio of the output dispersion to the input (according to the white noise model); 2) to investigate the rules on the model of the technological plant, which takes into account the peculiarities of the automation in the control channel. The most significant result of the work is a method that represents a set of simple rules similar to the rules of other known methods of tuning PID-type controllers. A plant's reference dynamic mode is supposed in the form of a combination of a first-order aperiodic or integrating link with a dead time link. The method is also suitable for hard-controlled plants with a significant or dominant dead time. An example of the application of the developed method for controlling the temperature in the heat exchanger of a beer distillation column using a PI controller is demonstrated. It is shown that the method allows a reduction of the dispersion by a quarter compared to the controller obtained using the pidtune program. Similar results are achieved for other PID-type controllers. **Keywords.** Control system, SISO controller, PID, white noise, dispersion, tuning method.