

УДК 681.5.015.8:519

І.М. ГОЛІНКО, А.І. КУБРАК

Національний технічний університет України «КПІ», Україна

КОМП'ЮТЕРНА ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ
ЗА ІНТЕГРАЛЬНИМИ ПОКАЗНИКАМИ ЯКОСТІ

Розглядається алгоритм оптимізації системи керування за інтегральними показниками якості. Запропонований алгоритм дозволяє проводити параметричний синтез неідеального пропорційно-інтегрально-диференційного (ПІД) регулятора за інтегральними показниками якості. Проведений аналіз впливу неідеальності ПІД регулятора на якість перехідних процесів у системі керування. Чисельно досліджено взаємозв'язок інтегральних критеріїв якості з характером перехідних процесів у системі керування. Показано залежність якості перехідних процесів від каналу впливу. Розглянуто приклади реалізації запропонованого алгоритму при моделюванні перехідних процесів у системі керування. Метод може використовуватися розробниками систем автоматичного керування для оптимізації систем керування.

Ключові слова: оптимізація, інтегральні критерії якості, ПІД регулятор, об'єкт керування, система керування.

Вступ

Останнім часом [1, 2] зріс інтерес до розробки алгоритмів оптимізації систем автоматичного керування (САК) з використанням ПІД регуляторів, зокрема, з урахуванням можливої неідеальності реалізації Д складової в законі керування. Фізично реалізувати “ідеальний” Д закон неможливо і на практиці в аналогових регуляторах він реалізується з тим чи іншим ступенем наближення. В промислових контролерах рівень неідеальності може бути різним. На сьогоднішній день прийнято вважати, що з прийнятною точністю передатна функція “реального” ПІД регулятора може бути представлена в формі [2]:

$$W_p(p) = K \left(1 + \frac{1}{T_i p} + \frac{T_d p}{\left(\frac{T_d}{K_f} p + 1 \right)^n} \right), \quad (1)$$

де K , T_i , T_d – відповідно коефіцієнт передачі, час інтегрування та диференціювання ПІД регулятора, коефіцієнти K_f та n – відображають характерні особливості конкретної реалізації промислового регулятора.

Постановка задачі

Метою роботи є розробка алгоритму та його програмної реалізації для дослідження і оптимізації настройки регулятора з передатною функцією (1) за інтегральними критеріями. В якості математичної

моделі об'єкта керування (ОК) пропонується використати його імпульсну характеристику (ІХ).

Синтез алгоритму

Розглядається САК, структурна схема якої представлена рис. 1. САК складається із ОК, суматорів та регулятора.

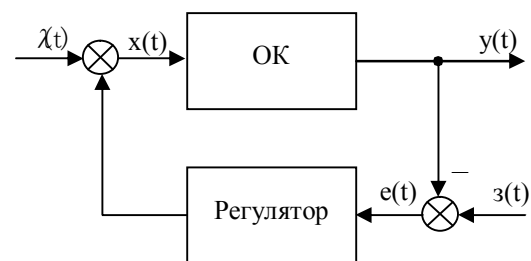


Рис. 1. Структурна схема САК:
 $z(t)$ – сигнал завдання, $e(t)$ – сигнал небалансу,
 $\lambda(t)$ – сигнал збурення, $x(t)$ – вхідний сигнал ОК,
 $y(t)$ – вихідний сигнал ОК

Реалізація алгоритму оптимізації САК передбачає вибір чисельних методів моделювання реакції ОК та ПІД регулятора на відповідні вхідні сигнали довільної форми.

Програмна реалізація реакції ОК $y(t)$ на вхідний сигнал довільної форми $x(t)$ виконувалася із використанням інтегралу згортки у вигляді:

$$y(t) = \int_0^t g(t-\tau) x(\tau) d\tau. \quad (2)$$

Фізично інтеграл (2) можна інтерпретувати як реакцію $y(t)$ ОК із IX $g(t)$ на послідовність імпульсів, на які розбивається сигнал $x(t)$, причому імпульс в момент τ має площу $x(\tau)d\tau$. При комп'ютерній реалізації залежності (2) інтеграл замінюється сумою, де t змінюється з кроком dt [3, 4].

Використання IX ОК дозволяє зменшити похибку моделювання САК за рахунок виключення етапу апроксимації та усуває фактор суб'єктивності при виборі структури апроксимуючої залежності.

Розрахунок реакції регулятора із передатною функцією (1) реалізовувалось чисельно із використанням "схеми заміщення" [5].

В якості інтегральних критеріїв настройки САК програмно реалізовано:

$$I = \begin{cases} \int_0^{\infty} |f| dt, & N_k = 1, \\ \int_0^{\infty} f^2 dt, & N_k = 2, \\ \int_0^{\infty} t|f| dt, & N_k = 3, \\ \int_0^{\infty} t f^2 dt, & N_k = 4. \end{cases} \quad (3)$$

Тут, N_k – номер критерію якості, за яким оптимізується САК,

$$f = \begin{cases} e(t), & \text{якщо } e(t) > 0 \text{ за каналом } z(t) \rightarrow y(t); \\ R \cdot e(t), & \text{якщо } e(t) \leq 0 \text{ за каналом } z(t) \rightarrow y(t); \\ e(t), & \text{якщо } e(t) \leq 0 \text{ за каналом } \lambda(t) \rightarrow y(t); \\ R \cdot e(t), & \text{якщо } e(t) > 0 \text{ за каналом } \lambda(t) \rightarrow y(t). \end{cases} \quad (4)$$

Множник R у (4) призначений підсилувати ($R \geq 1$) або приглушувати (при $0 < R < 1$) вплив перерегулювання у формування показника якості I .

Вибір показника якості (3) для функціонування замкненої системи обумовлений наступними міркуваннями. Традиційно при оптимізації САК перевагу віддавали опосередкованим показникам якості (кореневим, частотним і, зокрема, інтегральним). Це пояснювалося неможливістю (надто великою трудомісткістю) розрахунку перехідної характеристики САК, за якою можна було визначити прямі показники якості (тривалість перехідного процесу, його характер, перерегулювання, тощо). Графік перехідної характеристики САК несе в собі максимум необхідної інформації для безпосередньої оцінки процесу керування.

Можливості сучасних комп'ютерів дозволяють сумістити переваги прямих показників якості (немає

проблеми розрахувати перехідну характеристику САК та сформувати її графік) із узагальненням (представленням характеристики САК у вигляді одного числа) оцінки критерію якості (3).

Тоді навіщо чотири варіанти критерію (N_k) та параметр R у (4)? Справа в тому, що для різних технологічних об'єктів значно варіюються додаткові умови в формуванні критерію (3), як-то допустимість та величина перерегулювання, темп зростання сигналу на початковому відрізку перехідного процесу САК (отже і час існування значних відхилень від заданого рівня) і таке інше.

З цих причин, користувачеві надається можливість порівняти між собою (візуально, шляхом співставлення) графіки "оптимальних" перехідних характеристик САК, які отримані при різних варіантах N_k показника якості (3) і вибрати "кращий серед кращих". Додаткові можливості варіювати показник (3) надає параметр R у (4).

Для організації пошуку оптимальної настройки регулятора (при фіксованих значеннях N_k та R) бажано спочатку отримати уявлення про характер поверхні показника I , скажімо, в просторі параметрів настройки ПІ регулятора (або ПІД регулятора при фіксованому значенні T_d).

Відповідний алгоритм реалізований у програмі. Тут передбачена можливість формування зображення поверхні показника I системою ізоліній. На рис. 2 представлені результати моделювання рельєфу поверхні для критерію (3) ($R=1$, $N_k=2$) в координатах $I = f(K, T_i) \rightarrow \min$ із ПІ-регулятором ($T_d=0$) та ОК з передатною функцією:

$$W_{OK}(p) = \frac{1}{25p^2 + 10p + 1} e^{-2p}. \quad (5)$$

Рельєфи поверхні при $N_k=1, 3, 4$ мають схожі зображення.

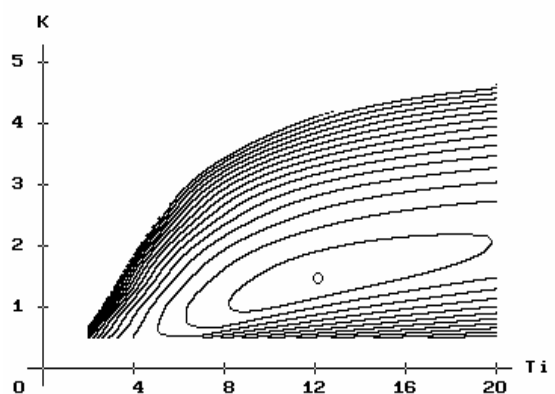


Рис. 2. Рельєф поверхні в координатах $I = f(K, T_i)$

Отже, маємо справу із однокстремальною функцією (екстремум – мінімум). Особливістю даної

функції є те, що вона приймає скінченні значення лише в області, де САК є стійкою. Для нестійкої САК показники (3) стають рівними нескінченності, отже, втрачають сенс. Ефект нестійкої САК фіксується в процесі чисельного моделювання за ознакою $|y(t)| > 2$. В подібній ситуації процес розрахунку припиняється. Перехідна характеристика САК з такими настройками не може претендувати на статус "оптимальної". Це зайвий раз нагадує про необхідність пошуку оптимуму з початкової точки, де САК, принаймні, стійка (уявлення про допустиму область дає система ізоліній).

Автоматичний пошук оптимуму (оптимальних значень K , T_i , T_d при заданих K_f , n , N_k , R та IX ОК) програмно реалізовано, відповідно до методу Хука-Дживса [6].

Далі, наведемо приклади дослідження САК із використанням програми розробленої авторами. У подальших дослідженнях використано математичну модель ОК у вигляді IX , яка відповідає (5).

Почнемо з дослідження впливу неідеальності реалізації D складової в ПД регуляторі на значення оптимальних настройок та на результат оптимізації. Наприклад, при $N_k=2$ ($R=1$) на рис. 3 представлені перехідні процеси у САК за каналом $z(t) \rightarrow y(t)$.

Крива 1 (рис. 3) – оптимальна перехідна характеристика САК, знайдена при використанні ідеального ПД регулятора. При цьому передаточна функція регулятора приймає вигляд

$$W_p(p) = 4,16 \left(1 + \frac{1}{18,88p} + 2,97p \right).$$

Якщо врахувати неідеальність ПД регулятора, а саме прийняти, що $K_f = 5$, $n=1$, то при даних настройках регулятора матимемо перехідну характеристику, показану кривою 2 рис. 3. Різниця між кривими 1 та 2 суттєва. Неідеальність регулятора погіршує функціонування системи керування.

Повторимо пошук оптимальної настройки із урахуванням неідеальності регулятора (при тих же $K_f = 5$, $n=1$). Отримаємо оптимальний регулятор

$$W_p(p) = 2,47 \left(1 + \frac{1}{9,88p} + \frac{2,97p}{2,97/5p+1} \right) \quad (6)$$

та криву 3 в якості оптимальної перехідної характеристики САК. Крива 3 відрізняється від кривої 1 але значно менше ніж крива 2. Отже, очевидно, що при пошуку оптимальної настройки треба враховувати неідеальність регулятора. Крива 4 показує оптимальну перехідну характеристику для САК із оптимальним регулятором

$$W_p(p) = 2,47 \left(1 + \frac{1}{12,12p} + \frac{2,13p}{(2,13/5p+1)^2} \right)$$

($K_f = 5$, $n=2$). Крива 4 гірша від 3, тобто чим більш чітко виражена неідеальність D складової, тим гірше отримуваний оптимум.

Програма дозволяє варіювати K_f та n оцінюючи їх вплив на результат оптимізації. Але те, що такий вплив може бути суттєвим – не підлягає сумніву.

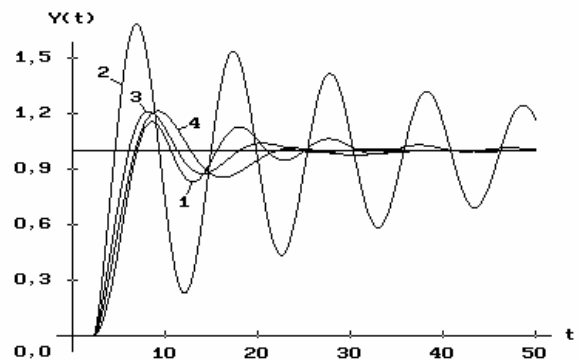


Рис. 3. Перехідні процеси у САК за каналом $z(t) \rightarrow y(t)$

Також представляє інтерес дослідження впливу вибору інтегрального критерію (N_k) на якість розв'язків. На рис. 4. показані оптимальні перехідні характеристики САК, знайдені при $N_k=1..4$, ($R=1$) (відповідні криві перераховані тими ж цифрами).

Як видно, при $N_k=2$ (середньоквадратичний показник якості) САК має чітко виражену схильність до коливань. Решта ($N_k=1,3,4$) дають близькі результати. Зрозуміло, що робити глобальні висновки із одиничного дослідження не варто, але програма дає можливість оцінити вплив N_k та R на результат оптимізації у кожному конкретному випадку (для різних об'єктів та при різних ступенях неідеальності регулятора).

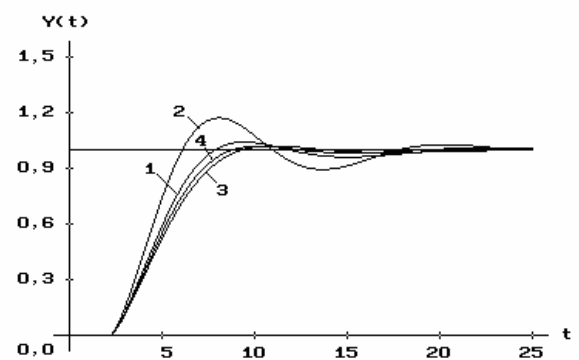


Рис. 4. Оптимальні перехідні процеси у САК за каналом $z(t) \rightarrow y(t)$

Наступна серія кривих демонструє дослідження впливу параметра R на якість розв'язків. На рис. 5. показані оптимальні перехідні характеристики САК за середньоквадратичним показником якості ($Nk=2$). Крива 1 отримана при $R=1$ із настройками регулятора (6). Крива 2 забезпечується оптимальним регулятором

$$W_p(p) = 2,19 \left(1 + \frac{1}{11p} + \frac{2,97p}{(2,97/5p+1)^2} \right)$$

при $R=2$. Крива 3 отримана із настройками регулятора

$$W_p(p) = 2,75 \left(1 + \frac{1}{7,63p} + \frac{2,97p}{(2,97/5p+1)^2} \right)$$

при $R=0,5$.

Як видно, множник R підсилює (при $0 < R < 1$) або приглушує ($R \geq 1$) перерегулювання у перехідній характеристиці САК.

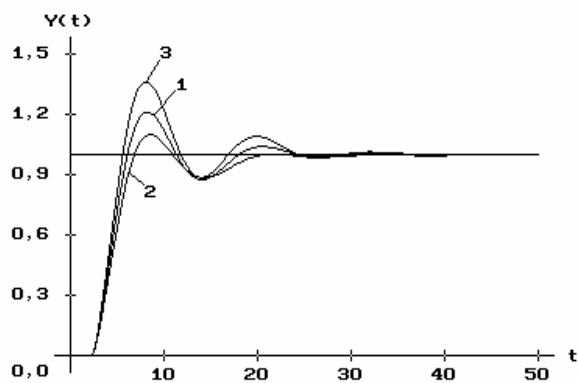


Рис. 5. Оптимальні перехідні процеси у САК за середньоквадратичним показником якості

І, нарешті, для квадратичного критерію якості (3) ($Nk=2$, $R=1$) на рис. 6 показано перехідну характеристику САК (крива 1) за каналом $\lambda(t) \rightarrow y(t)$ із регулятором (6).

Звернемо увагу, що даний регулятор оптимізований за каналом $z(t) \rightarrow y(t)$. Якщо САК оптимізувати за каналом $\lambda(t) \rightarrow y(t)$, то в якості оптимальної отримаємо характеристику (крива 2), яка явно краща від кривої 1.

Для САК із кривою 2 має місце передаточна функція регулятора

$$W_p(p) = 3,59 \left(1 + \frac{1}{5,94p} + \frac{2,69p}{2,69/5p+1} \right).$$

Отже, коли мова йде про оптимізацію САК, то потрібно чітко усвідомлювати оптимізація для якого каналу розглядається і за яким критерієм. Інакше результати можуть сильно відрізнятись.

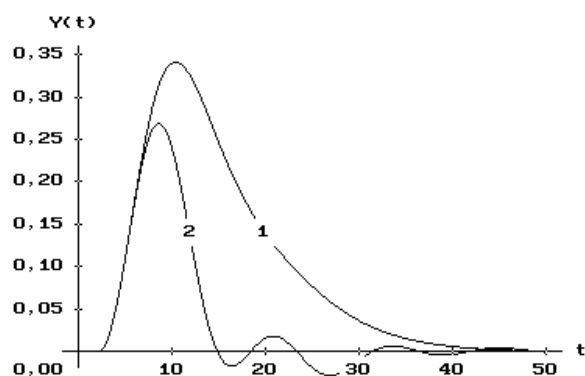


Рис. 6. Оптимальні перехідні процеси у САК за каналом $\lambda(t) \rightarrow y(t)$

Висновки

Проведений аналіз налагодження САК підтверджує необхідність врахування неідеальності регулятора. При цьому, важливу роль відіграє коректний вибір каналу впливу, що визначається вимогами до технологічного процесу. Слід зазначити, що САК, де застосовується квадратичний критерій якості ($Nk=2$) має підвищену схильність до коливальності.

Розглянутий алгоритм синтезу САК за інтегральними критеріями (3) може базуватися на будь-якому чисельному методі оптимізації. Враховуючи однокстремальність задачі та значну потужність сучасних ПЕОМ час пошуку суттєво не зміниться. Основою даного алгоритму є використання закону регулювання (1) та математичної моделі ОК, що базується на (2).

Використання непрямих показників якості (3) дає змогу оцінити роботу САК та обрати той критерій для налагодження системи керування, що буде задовольняти вимогам технологічного процесу.

Література

1. Денисенко, В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием [Текст] / В.В. Денисенко. – М.: Горячая линия-Телеком, 2009. – 608 с.
2. Алгоритм оптимальной настройки реальных ПИД регуляторов на заданный запас устойчивости [Текст] / А.И. Репин, В.Р. Сабанин и др. // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2010. – № 4. – С. 7–12.
3. Голінко, І.М. Аналіз гібридної системи керування за імпульсною характеристикою об'єкта [Текст] / І.М. Голінко, Ю.М. Ковриго // Наукові вісті Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". – 2010. – № 2. – С. 30 – 33.
4. Кубрак, А.І. Комп'ютерний аналіз АСР за імпульсною характеристикою об'єкта [Текст] / А.І. Кубрак, І.М. Голінко, Ю.М. Ковриго // Нові рі-

шення в сучасних технологіях: зб. наук. пр. НТУ "ХПІ". – Вип. 57. – X., 2010. – С. 128 – 132.

5. Жученко, А.И. Компьютерные алгоритмы интегрирования дифференциальных уравнений и их систем [Текст] / А.И. Жученко, А.И. Кубрак. – К.:

Издательство ЧП ЭКМО, 2006. – 270 с.

6. Ладієва, Л.Р. Оптимізація технологічних процесів [Текст] / Л.Р. Ладієва. – К.: ІВЦ видавництва "Політехніка", 2004. – 192 с.

Поступила у редакцію 18.05.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедри автоматизації та енергоменеджменту В.М. Казак, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

КОМПЬЮТЕРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПО ИНТЕГРАЛЬНЫМ ПОКАЗАТЕЛЯМИ КАЧЕСТВА

И.М. Голинко, А.И. Кубрак

Рассматривается алгоритм оптимизации системы управления по интегральным показателям качества. Предложенный алгоритм позволяет проводить параметрический синтез неидеального пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора по интегральным показателям качества. Проведенный анализ влияния неидеальности ПИД регулятора на качество переходных процессов в системе управления. Численно исследована взаимосвязь интегральных критериев качества с характером переходных процессов в системе управления. Показана зависимость качества переходных процессов от канала влияния. Рассмотрены примеры реализации предложенного алгоритма при моделировании переходных процессов в системе управления. Метод может использоваться разработчиками систем автоматического управления для оптимизации систем управления.

Ключевые слова: оптимизация, интегральные критерии качества, ПИД регулятор, объект управления, система управления.

THE COMPUTER OPTIMIZATION OF CONTROL SYSTEM ON INTEGRATED QUALITY CRITERIA

I.M. Golinko, A.I. Kubrak

The optimization algorithm of a control system on integrated quality criteria is considered. The offered algorithm allows to build parametrical synthesis of a nonideal proportional-integral-derivative (PID) control on integrated quality criteria. The carried out analysis of influence the imperfect PID control on quality of transients in a control system. The integrated quality criteria of interrelation with character of transients in a control system is numerically investigated. Dependence of quality transients on the influence channel is shown. The examples realization offered algorithm are considered at modeling of transients in a control system. The method can be used by developers of automatic control systems for optimization of control systems.

Key words: optimisation, integrated criteria of quality, PID control, control object, control system.

Голинко Ігор Михайлович – канд. техн. наук, доц., доц. кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів Національного технічного університету України «КПІ», Київ, Україна, e-mail: igor.golinko@conislab.net.

Кубрак Анатолій Іванович – канд. техн. наук, проф., проф. кафедри автоматизації хімічних виробництв Національного технічного університету України «КПІ», Київ, Україна.