

ОСНОВНІ ПРОБЛЕМИ ПОБУДОВИ ПРОМИСЛОВИХ РЕГУЛЯТОРІВ

Вступ

Сучасне ефективне промислове виробництво базується на широкому використанні високих технологій, яскравим представником яких є програмуємі логічні контролери (ПЛК – PLC). ПЛК нового покоління з'єднують традиційний контролер, інтерфейс оператора, пристрій введення/виводу й пристрій мережної підтримки: усе у вигляді єдиного блоку, який можна програмувати за допомогою стандартизованих програмних пакетів [1]. Важлива перевага подібного пристрою: розробка й регулятора, і системи відображення інформації можуть виконуватися одночасно, в одній і тій же програмі. Це не тільки знижує час розробки, але й дозволяє перебороти проблеми взаємодії між людино-машинним інтерфейсом (ЛМІ: дисплей, кнопки) і регулятором. Метою даної статті є характеристика основних проблем саме в керуючій частині ПЛК без акцентування на завданнях ЛМІ.

Алгоритм регулювання

Вибір базового алгоритму роботи промислового контролера є нетривіальним завданням. Це обумовлено, насамперед, надлишком відомих способів вирішення завдань керування: від досить примітивних до доволі витончених. Проте, у промислових колах найбільш популярним залишається регулятор, відомий уже більше шістдесятьох років – пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД). Як відомо, для пропорційного регулятора, вихід якого визначається добутком помилки неузгодженості на коефіцієнт регулювання, характерна наявність сталої помилки. Введення інтегральної складової в закон регулювання усуває цю проблему, але додає інших (нестійкість у замкнутій системі, наприклад). Використання похідної від помилки знижує перерегулювання й «нишпорення» вихідної змінної. Ідеалізоване рівняння ПІД-регулятора має вигляд

$$u(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt} \right], \quad (1)$$

де K – коефіцієнт передачі;

$e(t)$ – помилка неузгодженості між завданням і виходом;

T_i – постійна інтегрування;

T_D – постійна диференціювання.

Практично всі нові розроблювані промислові системи регулювання є цифровими, тобто такими, у яких вхідні й вихідні змінні регулятора дискретизовані в часі, по-перше, і квантовані за рівнем, по-друге. Алгоритм

роботи такого ПІД-регулятора, щонайкраще пристосований до особливостей цифрових обчислювачів, може бути представлений у такий спосіб:

$$\begin{aligned} u(k) &= u(k-1) + \Delta u(k); \\ \Delta u(k) &= q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2); \\ q_0 &= K \left(1 + \frac{T_D}{T} \right); q_1 = -K \left(1 + 2 \frac{T_D}{T} - 2 \frac{T_D}{T_i} \right); q_2 = K \frac{T_D}{T}, \end{aligned} \quad (2)$$

де $k = 0, 1, \dots, t/T$ – номер кроку дискретизації;

T – тривалість кроку дискретизації.

В (2) заміна інтеграла кінцевою сумою виконана методом прямокутників. Застосування методу трапецій дозволяє підвищити точність апроксимації, однак ускладнює обчислення.

Відома велика кількість модифікацій базового ПІД-алгоритма, пристосованого до тих або інших практичних завдань. Диференціальна складова у випадку стрибкоподібної зміни завдання формує різкий кидок сигналу на виході контролера. Це може виявитися вкрай небажаним у тих випадках, де потрібні повільні й сталі зміни на виході контролера. Наприклад, у регуляторі кімнатної температури порції гарячого повітря після кожного перенастроювання термостата не тільки незручні для мешканців, але утруднюють і знижують надійність роботи нагрівача. У подібних випадках доцільно обчислювати похідну за інверсним значенням змінної процесу, а не прямо за помилкою. При постійному завданні контролер ідентичний базовому. Відмінності істотні тільки в момент різкої зміни завдання.

Очевидно, що результати, яких можна досягти при використанні ПІД-регулятора, залежать від процесу, до якого регулятор застосовується. Починаючи з 1980-х і дотепер ряд альтернативних ПІД методів керування починають переміщатися з дослідницьких лабораторій у промисловість для використання в більш складних замкнутих системах керування. Ці методи містять штучний інтелект, адаптивне керування, прогнозне керування з моделлю.

Однією з останніх розробок є "SuperPID" фірми Honeywell Automation & Control Solutions, що входить до складу експертної системи (Process Knowledge System – PKS) Experion фірми Honeywell (<http://www.acs.honeywell.com/>). Відомий під назвою Profit Loop предикативний (що пророкує по моделі, прогнозує) SuperPID алгоритм керування, пропонується для роботи на найнижчому рівні ієрархії, звичайно зайнятому ПІД-регуляторами.

Перспективним напрямком є також використання оптимальних регуляторів, алгоритм роботи яких побудований, виходячи із забезпечення високої якості перехідного процесу. Введення субалгоритмів ідентифікації [2] дозволяє різко розширити коло застосування контролерів, у яких закладений подібний підхід.

Настроювання регулятора

Традиційний ПІД-регулятор успішно виконує свою основну функцію

усунення помилки в тому випадку, коли він правильно настроєний під конкретний додаток. K , T_i , T_D – це змінні ПД-регулятора, які необхідно настроювати. Найбільш популярним методом настроювання є метод Циглера-Николса, розроблений на початку 40-х років ХХ століття.

Розімкнений метод настроювання, що базується на формулах Кохена-Куна, забезпечує обчислення коефіцієнтів ПД на підставі виміру декількох параметрів перехідного процесу. Однією із проблем при *цифровому* регулюванні є необхідність додаткових підстроювань у діапазоні припустимих вихідних значень і контрольних інтервалів. Замкнений метод Циглера-Николса базується на вимірі параметрів коливального процесу в системі. Однак створення й підтримка коливань дуже часто неприпустимі для виробничого процесу. Тому розроблені й інші методи настроювання ПД-регуляторів. Їх поєднує одна загальна риса, джерелом якої є власне закон керування. Ця риса – недооблік особливостей об'єкта керування, споконвічно довільний (суб'єктивний, невизначений) вибір значень коефіцієнтів регулювання. Звідси – складність алгоритмізації процесу їхнього автоматичного визначення.

SuperPID фірми Honeywell забезпечує прогнозне керування по моделі повного порядку тільки з однією кнопкою, яка необхідна для завдання швидкості відгуку контуру. Розроблювачі вважають, що SuperPID перевершить традиційні ПД-контролери також за швидкодією завдяки зниженню тремтінь, які викликані шумами вимірів змінної процесу. Експертна система Experion PKS буде містити й ПД, і SuperPID для того, щоб забезпечити можливість інтерактивної міграції до нової технології. Фірма виконала розробку таким чином, щоб користувачі, що не мають досвіду роботи із прогнозним керуванням по моделі, змогли її використати. Установлення, інтерфейс і робота будуть дуже подібні ПД.

Квазіоптимальний регулятор, який спочатку побудований не на емпіричних міркуваннях, а на основі аналітичного підходу, дозволяє сформулювати чіткий алгоритм настроювання, що включає формування безпечного тестового впливу, ідентифікацію об'єкта регулювання й одержання близького до оптимального перехідного процесу [3].

Вимірювання ефективності керування процесом

Без сумніву, "гарне керування" важливими змінними процесу - ключова вимога безпечного й економічного виробництва. Але актуальним залишається питання виміру ефективності керування, особливо – у контексті побудови просунутих систем керування.

Насамперед, варто дати відповідь на питання: що є "гарним керуванням", а також (більш точно), що значить "краще/удосконалене керування"? "Гарне керування" можна інтерпретувати, як необхідне або очікуване поведіння змінної. Сама вимога змінюється від процесу до процесу: Іноді, наприклад, необхідно підтримувати температуру всього лише в діапазоні $\pm 2^\circ\text{C}$; в іншому випадку вимога може скласти й $\pm 0,2^\circ\text{C}$.

Таким чином, поки змінна перебуває, або зрідка виходить за межі

деякого діапазону, користувач системи керування вдоволеній, і керування можна називати "гарним". "Краще керування" може означати дві речі: насамперед, скорочення діапазону зміни регульованої змінної, а по-друге – згладжування впливу на процес.

Це, однак, не дає інформації про **кількісні** параметри ефективності керування й потенційні переваги поліпшеного керування. За умови, що оптимальне цільове значення якоїсь змінної для даного процесу відомо, мабуть, що будь-яке відхилення від цієї мети (або завдання) означає неоптимальну роботу. Наслідками можуть бути економічні втрати, або погроза безпеці, навколишньому середовищу.

Щоб визначити величину втрат, необхідно *в будь-який момент* знати, наскільки близько змінна підтримується біля мети, а також, як швидко вона може відслідковувати зміни завдання. Тобто потрібно **вимірювати** фактичне поводження, його ефективність.

Для виміру ефективності існують наступні методи:

1) Зміна завдання. Бажано, щоб процес відслідковував зміну завдання з найбільшою можливою швидкістю, або, інакше кажучи, менше відхилення від завдання краще. Два відомих методи (ISE й IAE) просто підсумовують (у дискретному просторі з вибірками) квадрат відхилення (помилки) від завдання або його абсолютне значення, відповідно, через якийсь час після зміни завдання. Два інших методи (ITSE й ITAE) роблять теж саме, плюс до того ж помножують помилку на час, що пройшов з моменту зміни завдання. Таким чином, вони особливо штрафують повільні відгуки. У всіх випадках менше число дає кращу ефективність. Ці методи добре підходять для з'ясування ефективності контролера стосовно змін завдання, оскільки реалізуються в процесі настроювання.

2) Для інтерактивного поточного контролю ефективності, а також для судження про якість відпрацьовування збурювання вищенаведені методи не підходять. У цьому випадку набагато більш ефективні обчислення й моніторинг дисперсії (або середньоквадратичного відхилення), середнього відхилення й середньої величини змінної.

Потрібно також контролювати використання ресурсів. Поліпшене керування часто припускає не тільки скорочення зміни регульованої змінної, але також і зменшення споживання ресурсу. Приклад: жорстке регулювання температури в печі можна забезпечити й релейним (двопозиційним), і простим ПІД-контролером. Просунуте керування або робота з еталонною моделлю, хоча й не настільки істотно зменшують коливання температури, однак можуть значно скоротити витрати пального завдяки більш згладженому керуючому впливу. У цьому конкретному випадку ефект можна виразити в тисячах грн./МВт за рік.

Крім того, дуже важлива оцінка справності (робочого стану) контролерів / системи, тобто – їх "експлуатаційний коефіцієнт" (ЕК). Фактично повний ЕК є гарним індикатором якості дій – і, зрозуміло, керування виробничим процесом. Насамперед, варто визначити відсоток контролерів, які замінені на ручне керування, відсоток каскадів, які завжди розімкнуті. Ко-

жен контролер коштує грошей і був установлений, щоб робити гроші, які просто загублені, якщо не можна використати функціональні можливості.

Стискання діапазонів ключових змінних за допомогою кращого, тобто більш точного керування – це базова з переваг замкнутого, а особливо – просунутого керування.

Зменшення девіації, наприклад, температури печі, що попередньо нагріта, дозволить наблизитися до максимально припустимого значення (температури металу труби) і, таким чином, – до більш високої середньої температури. Отже, вдасться підвищити, наприклад, границю кипіння фракцій і полегшити фракціонування в перегінній колоні або перетворення в реакторі. Це, в остаточному підсумку, дозволить збільшити вихід виробів.

Як згадувалося вище, потрібно також контролювати використання ресурсу (керована змінна). При зменшенні дисперсії ресурсу, наприклад, ступеня відкриття вентиля, можна допустити підвищення середнього значення й, таким чином, збільшити продуктивність. Приклад: контролер, у якому для підтримки заданого потоку вихідне значення змінюється між 80 й 100% (що в середньому становить приблизно 90%), забезпечує меншу продуктивність, ніж той, у якому зміна потрібна в межах тільки $\pm 5\%$ (середнє відкриття – 95%).

Підтримка потоків з мінімальним розкидом щодо номіналу – досить просте завдання. А от щільне регулювання температури, наприклад, висуває вже набагато більше питань і може зажадати використання більш просунутих методів. Точне якісне керування зазвичай ґрунтується на регуляторі з опорною моделлю.

Поступово обов'язковим стає інтерактивний вимір і контроль ефективності ключових змінних процесу – навіть, якщо вони не охоплені контуром керування. На початку це можна використати для розробки замкненого контуру керування. Потім, на основі очікуваного підвищення ефективності, можна оцінити потенційні переваги. На закінчення досягнуті поліпшення можна буде легко зрівняти з базовим процесом.

Кілька слів, що стосуються суміжних дисциплін – це статистичне керування процесом (СУП-SPC)/статистична гарантія якості (СГК-SQA). Застосування СУП/СГК продукує інформацію про ефективність контрольованої змінної, але в більшості випадків (внаслідок використання усереднених даних) на регулятор надходять тільки перекручені значення: піки зрізуються й, до того ж, зрушуються в часі. Крім того, використання тільки лише таких методів самих по собі не досить, тому що неможливо виконати пряму автоматичну компенсацію будь-якого відхилення. Це – завдання й перевага замкненого керування процесом.

Висновки

1. Розглянуто тенденції розвитку й зазначені основні проблеми, що стоять перед проектувальником промислових регуляторів.

2. Показано, що найбільш масово використовуваним у промисловому виробництві законом регулювання залишається ПІД.

3. Сформульовано основні проблеми, пов'язані з настроюванням промислових регуляторів.

4. Докладно проаналізовано завдання виміру ефективності керування процесом.

ЛІТЕРАТУРА

1. The 'all-in-one' controller// Control Engineering Europe, 2005. – Vol. 6, №4. – 50 p.
2. *Войтенко В.П.* Автоматическая параметрическая идентификация в квазиоптимальных промышленных регуляторах// Технічна електродинаміка, тем. випуск «Силова електроніка та енергоефективність». – Київ-2004, ч. 3. – С. 85 – 90.
3. *Войтенко В.П.* Экспериментальное исследование алгоритмов функционирования квазиоптимального промышленного регулятора// Технічна електродинаміка, тем. випуск «Силова електроніка та енергоефективність». – Київ-2005, ч. 3. – С. 71 – 74.