

УДК 621.311:681.5

СИСТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИМ НАВАНТАЖЕННЯМ КОТЛА ТПП-210А З ВИКОРИСТАННЯМ РЕГУЛЯТОРА З ВНУТРІШНЬОЮ МОДЕЛЛЮ

У роботі запропоновано використання нового методу побудови високоякісної системи для автоматичного регулювання теплового навантаження пилувугільного котла ТПП-210А. Метод полягає у використанні регулятора з внутрішньою моделлю об'єкта, контуру ідентифікації та блоку врахування обмежень на керуючий сигнал

Ключові слова: регулятор з внутрішньою моделлю, обмеження керуючого сигналу, САР теплового навантаження

В работе предложено использование нового метода построения высококачественной системы автоматического регулирования тепловой нагрузки пылеугольного котла ТПП-210А. В системе используются регулятор с внутренней моделью, контур идентификации, блок учета ограничений на управляющий сигнал

Ключевые слова: регулятор с внутренней моделью, ограничение управляющего сигнала, САР тепловой нагрузки

A new method of automatic control with internal model of object and with accounting constraints of control variable is proposed. Method has great advantages in comparison with classical PID-regulators and can be applied in control systems of power plant objects

Key words: automatic control with internal model of object, anti-windup, control system of boiler heat load

Ю.М. Ковриго

Кандидат технічних наук, професор, завідувачий кафедрою*

Контактний тел.: (044) 406-80-84

E-mail: kym@atep.ntu-kpi.kiev.ua

Б.В. Фоменко

Асистент*

Контактний тел.: 067-508-79-65

E-mail: bogdana_fomenko@bigmir.net

О.В. Степанець

Аспірант*

Контактний тел. 066-375-19-82

E-mail: aard@bk.ru

*Кафедра автоматизації теплоенергетичних процесів Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» м. Київ

Постановка задачі

Особливостями об'єктів автоматичного управління теплоенергетики є квазістаціонарність параметрів, нелінійності, багатомірності, неконтрольовані збурення, що значно ускладнюють процеси управління. Як показує досвід експлуатації, штатні системи регулювання недостатньо добре функціонують при великих збурюючих впливах, у тому числі при глибоких змінах навантаження. При цьому регульовані параметри виходять за припустимі регламентом значення, що при-

водить до зниження надійності устаткування, а в деяких випадках до спрацьовування аварійних захистів парогенератора і зупинки енергоблоку.

Одним із перспективних напрямків підвищення ефективності АСУТП теплоенергетичних процесів є використання нових структур систем регулювання. Удосконалення таких схем шляхом доповнення контурами підстройки параметрів в режимі нормальної експлуатації та в перехідних режимах дозволить суттєво підвищити якість регулювання і розширити область їх використання. Синтез сучасних регуляторів,

що забезпечують ефективне регулювання в змінних режимах, і розробка алгоритмів, які дозволяють швидше і точніше адаптувати існуючі системи управління з врахуванням фізичних та технологічних обмежень, є актуальними науковими задачами.

Об'єкт керування та проблеми управління ним

Для маловитратної модернізації схеми теплового навантаження котла ТПП-210А при роботі на вугільному пилу за структуру була обрана каскадна система автоматичного керування, де коригувальним регулятором є загальний регулятор палива, а стабілізуючим - індивідуальний регулятор подачі палива [1]. На індивідуальний регулятор подачі палива надходять наступні сигнали: температура аеросуміші перед пальником, що характеризує пилопродуктивність аероживильників пилу (АЖП); зворотний зв'язок по положенню регульовального клапана АЖП; завдання від загального регулятора палива. У регуляторі теплового навантаження, що працює в цей час за триконтурною схемою, як основний сигнал використовується сумарна температура пари за стельовим екраном і швидкісні сигнали - температура за нижньою радіаційною частиною (НРЧ), верхньою радіаційною частиною (ВРЧ), сумарна витрата води по нитках. Впровадження триконтурної схеми теплового навантаження дозволило зменшити час перехідного процесу на 25-30% у порівнянні із традиційною двоконтурною. За рахунок можливості точної підтримки заданої температури за стельовим екраном можна підвищити економічність котла - динамічне відхилення по основному регульованому параметру не перевищує 5°C.

При побудові системи автоматичного регулювання (САР) теплового навантаження слід зауважити, що на процес згоряння палива впливають наступні фактори: вид палива (агрегатний стан палива, вологість, зольність, спікливість, вихід летких); спосіб спалювання; аеродинамічні особливості процесу; характер підведення кисню до палива; вид топки; концентрація кисню в повітрі; тиск при якому відбувається горіння і т.п. Для ефективного і якісного спалювання палива в котлових агрегатах повинно бути точно збалансоване співвідношення «паливо - повітря». Недостача повітря при горінні викликає неповне згоряння і, як наслідок, перевитрату палива. Надлишок повітря також приводить до перевитрати палива на нагрівання зайвого повітря в складі газів, що відходять. В обох випадках спалювання палива супроводжується підвищенням викидом в атмосферу високотоксичних газів [2]. У процесі тривалої експлуатації можуть змінюватися характеристики твердого палива і, відповідно, режим роботи котла. При підвищеній зольності палива знижується його теплота згоряння, обсяги продуктів згоряння і повітря, що витрачається на горіння палива. При одночасній зміні ряду умов роботи проти номінальних режим котла піддається різним впливам, які можуть складатися або взаємно компенсуватися.

Відомо, що система пилоподачі котла в умовах експлуатації підлягає дії багатьох керуючих і збурюючих впливів, до яких можна віднести зміни подачі палива і первинного повітря, якість палива, режим ро-

боти системи пилоприготування, характер витікання пилу з бункера та ін. Ці збурення, які мають випадковий характер, впливають на рівномірність розподілу палива по пальниках і стабілізацію пилоподачі в часі, що приводить до зміни експлуатаційних показників котла, тобто впливає на надійності та економічності його роботи. Сигнал по температурі аеросуміші пилу з первинним повітрям може бути використаний в САР стабілізації подачі палива на пальники котла як регульована величина, що побічно характеризує витрату палива в пилопроводі. Дослідження динамічних властивостей сигналу по температурі аеросуміші в характерній точці виміру термопарою з захисним чохлам, проведені при різних по величині й знаку збуреннях витратою палива, показали, що запізнення сигналу по температурі $\tau_{ЗАП}=2$ с., а стала часу $ТОВ=22$ с. Оскільки переміщення регулюючого органа не є стрибкоподібним і займає близько 10 с, то запізнення сигналу, що з'являється, впливає на динамічні властивості об'єкта керування і якість автоматичного регулювання подачі палива.

При нанесенні збурення витратою палива були отримані динамічні характеристики аеросуміші експериментальним шляхом. З отриманих в результаті досліджень [3] перехідних характеристик можна прослідкувати вплив навантаження енергоблоку на параметри об'єкта. Коефіцієнт передачі КОБ змінюється в діапазоні 0,75-1,5°C/(т/г); постійна часу $ТОВ=17+118с$; час запізнення сигналу по температурі $\tau_{ЗАП}=2+26$ с.

Але навіть добре спроектована автоматична система може бути непрацездатною або мати низькі показники якості у зв'язку зі зміною динамічних властивостей об'єкта управління (ОУ), неповнотою апріорної інформації про умови роботи системи. З цієї точки зору вважається досить ефективним шлях побудови управляючих систем, які не вимагають повної апріорної інформації про об'єкт й умови його функціонування, тобто можуть оптимізувати свою роботу з мінімальним втручанням обслуговуючого персоналу.

Запропонована система автоматичного керування

У роботі запропонований варіант побудови системи автоматичного керування з використанням стратегії ІМС (Internal model control) [4, 5] та врахуванням обмежень на керуючу змінну [6].

Перевагами системи з ІМС-регулятором у порівнянні зі звичним ПІД-регулятором є використання потужного методу керування на основі моделі об'єкту, можливість впливати на грубість системи окремим параметром налаштувань, підвищена швидкодія при майже повній відсутності перерегулювання, полегшена процедура налаштування. Така система пропонується для використання в об'єктах, де висувуються жорсткі вимоги до мінімізації перерегулювання та швидкості відпрацювання збурень і завдань.

Складовими частинами такої системи (рис. 1) є модель об'єкта керування та ІМС-регулятор. ІМС-регулятор містить у собі частину моделі об'єкта керування, яка може бути обернена, та фільтр. Фільтр призначений для зменшення впливу похибок при визначенні моделі та підвищення грубості системи.

Для опису принципу дії ІМС-системи вважатимемо, що зовнішні збурення відсутні, а модель об'єкту $W_M(s)$ повністю відповідає об'єкту $W_{OB}(s)$, тобто

$$W_M(s) = W_{OB}(s) \quad (1)$$

Згідно схеми, вихідну величину $Y(s)$ можна представити у вигляді

$$Y(s) = W_P(s)W_{OB}(s)E(s) \quad (2)$$

де $E(s)$ – величина розбалансу між заданим значенням та зворотним зв'язком.

Так як

$$E(s) = Y_3(s) - Y_{33}(s) \quad (3)$$

де $Y_3(s)$ – сигнал завдання для САР; $Y_{33}(s)$ – сигнал зворотного зв'язку;

$$Y_{33}(s) = [W_{OB}(s) - W_M(s)]U(s) = 0 \quad (4)$$

то

$$Y(s) = W_P(s)W_{OB}(s)Y_3(s) \quad (5)$$

Записавши регулятор у вигляді оберненої моделі об'єкту $W_M^{-1}(s)$, одержимо

$$Y(s) = W_M^{-1}(s)W_{OB}(s)Y_3(s) = Y_3(s) \quad (6)$$

Отже, модель об'єкта, введена в регулятор, сприяє високоякісній реакції на зміну завдання, при цьому не маючи статичної похибки.

У загальному випадку, передавальна функція системи з ІМС-регулятором по каналу «завдання – регульована величина» матиме вигляд:

$$Y(s) = \frac{W_P(s)W_{OB}(s)Y_3(s)}{1 + W_P(s)[W_{OB}(s) - W_M(s)]} \quad (7)$$

Як видно з наведеної формули (7), чим точніше визначена модель об'єкта, тим вищою буде якість керування. При цьому система за рахунок своєї структури має великий потенціал у відпрацюванні збурень, що діють на об'єкт керування.

Синтез системи з внутрішньою моделлю починається з визначення структури моделі та представлення її у вигляді двох частин: таких, що можуть бути оберненими та таких, що не можуть (транспортні запізнення та елементи, які мають додатні нулі).

Тобто,

$$W_M(s) = W_{M+}(s)W_{M-}(s) \quad (8)$$

де $W_{M+}(s)$ – частина моделі, яка може бути обернена; $W_{M-}(s)$ – частина моделі, яка не може бути

обернена. Далі $W_{M+}(s)$ включається до складу регулятора.

Для зменшення впливу похибок при визначенні моделі та підвищення грубості системи до складу $W_P(s)$ вводить фільтр

$$W_\Phi(s) = \frac{1}{(\lambda s + 1)^n} \quad (9)$$

де λ – настроюваний параметр, обирається шляхом компромісу між швидкодією системи та робастністю (грубістю); n – порядок фільтра.

Під поняттям «грубість» у роботі розуміється здатність зберігати високі показники якості керування в умовах параметричних збурень об'єкта керування.

Отже, передавальна функція регулятора з моделлю об'єкта у загальному випадку матиме вигляд

$$W_P(s) = \frac{1}{(\lambda s + 1)^n} W_{M+}^{-1}(s) \quad (10)$$

Додатковими елементами системи автоматичного керування є контур ідентифікації та алгоритмічний блок врахування обмежень керуючої змінної.

Однією з проблем у керуванні є те, що всі реальні виконавчі механізми, які використовуються в системах керування, обмежені за своїми можливостями. Це означає, що вони обмежені по амплітуді та/або швидкості наростання сигналу. Нехтування цією особливістю може призвести до серйозних погіршень у випадках, коли вхідний сигнал досягає цих обмежень. Контур регулювання в системі, що знаходиться в насиченні (тобто коли регулюючий орган повністю відкритий або повністю закритий) виявляється розімкненим, оскільки при зміні на вході сигналу ланки з обмеженням його вихідний параметр залишається без змін. Найбільш типовим виявленням режиму обмеження є інтегральне насичення, яке виникає в системах з використанням ПІ- та ПІД-регуляторів.

Якщо похибка керування тривалий проміжок часу зберігає знак, величина інтегральної складової регулятора стає дуже великою.

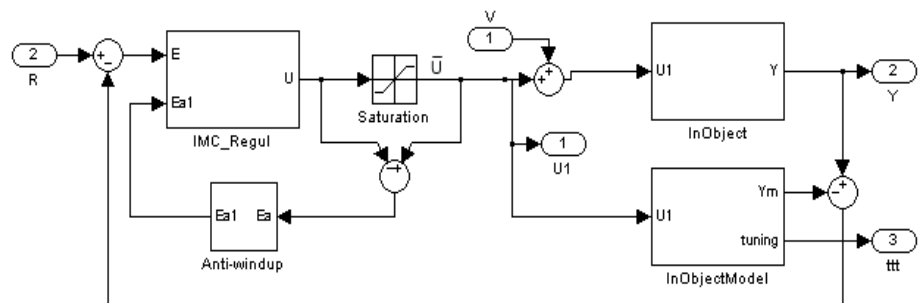


Рис. 1. Система регулювання з ІМС регулятором з врахуванням обмежень на керуючий сигнал

Інтегральне насичення може привести до великого перерегулювання та збільшення часу регулювання у випадку, коли керуючий сигнал обмежений настільки, що розрахований вихід регулятора відрізняється від реального виходу виконавчого механізму. До методів врахування обмежень на керуючий сигнал відносяться алгоритми умовного інтегрування та компенсації

інтегрального насичення. Ці алгоритми добре відомі для ПІД-регуляторів [6], а для системи регулювання з ІМС регулятором досі немає якісного рішення такої задачі.

Вимогами до застосування системи керування є попереднє встановлення виду моделі об'єкта керування та проведення процесу ідентифікації після досягнення стаціонарного режиму. Так, якщо модель об'єкта описана у вигляді послідовного з'єднання передавальних функцій аперіодичної ланки першого порядку та ланки транспортного запізнення, то процедуру ідентифікації можна провести за допомогою алгоритму [7].

Результуючий закон керування, який дав найкращі результати, для такої системи визначається як:

$$U(s) = \frac{T_{\text{обн}}s + 1}{K_{\text{обн}}(\lambda s + 1)} E(s) + E_a(s); \quad (11)$$

Де: $E(s)$ – похибка регулювання, $E_a(s) = \bar{U}(s) - U(s)$, $\bar{U}(s)$ – обмежений сигнал керування, λ – постійна фільтра ІМС-регулятора, $T_{\text{обн}}$, $K_{\text{обн}}$ – параметри моделі об'єкта. Для порівняння результатів був розахований ПІД-регулятор за мінімумом інтегрального критерію:

$I = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt$. Моделювання проводилось для системи регулювання теплового навантаження, а саме для стабілізуючого контуру по температурі аеросуміші, з використанням стандартних ПІД- та ІМС-регуляторів та запропонованого алгоритму регулювання під дією параметричних та координатних збурень для дослідження поведінки системи між процедурами ідентифікації (рис. 2).

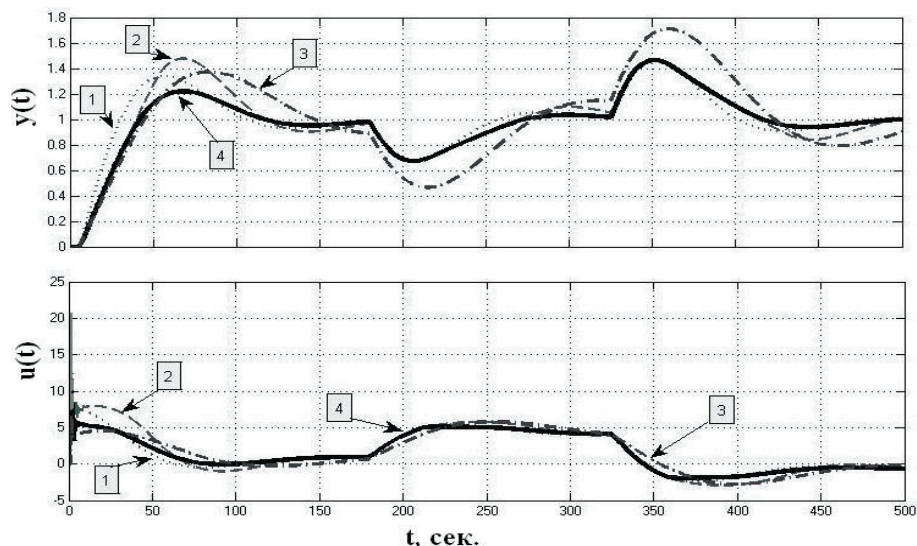


Рис. 2. Перехідні процеси в САР температури аеросуміші
1 – ІМС-регулятор, 2 – ІМС-регулятор з обмеженим керуючим сигналом,
3 – ПІД-регулятор, 4 – ІМС-регулятор з алгоритмом врахування обмеження керуючого сигналу

Висновки

Запропоновано новий метод побудови системи автоматичного керування на основі регулятора з внутрішньою моделлю об'єкта (з її ідентифікацією) та використання алгоритму врахування обмежень на керуючу змінну, який значно покращує якість регулювання у періодах між проведенням процедур ідентифікації та оптимізації. Алгоритмічний блок врахування обмежень запобігає втраті стійкості системи внаслідок насичення керуючої змінної. Метод має суттєву перевагу перед відомими рішеннями з ПІД-регуляторами по показникам якості перехідних процесів у системі та способам налаштування регулятора.

Метод рекомендується для використання в САР об'єктами зі змінними режимами роботи, де висувуються жорсткі вимоги до швидкодії та мінімізації перегулювання.

Література

1. Свириденко В.П. Опыт модернизации схемы регулятора тепловой нагрузки котла ТПП-210А при работе на угольной пыли / В.П. Свириденко, А.Б. Попутников // Энергетика и Электрификация – 2001.
2. Волков Э.П. Контроль загазованности атмосферы выбросами ТЭС / Э.П. Волков – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.
3. Солодовников В.В. Расчет и проектирование аналитических самонастраивающихся систем с эталонными моделями / В.В. Солодовников, Л.С. Мрамко - М.: «Машиностроение», 1972.-270с.
4. Степанец О.В. Адаптивна система керування з внутрішньою моделлю / О.В. Степанец, А.П. Мовчан // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - 2009. - №6/3(42). – С.9-14.
5. Daniel E. Rivera. Internal Model Control: A Comprehensive View / Daniel E. Rivera – Department of Chemical, Bio and Materials Engineering College of Engineering and Applied Sciences Arizona State University, Tempe, Arizona, 1999. – 20 pp.
6. Ковриго Ю.М. Математическое моделирование систем автоматического регулирования с учетом ограничений на управление в пакете Matlab/ Ковриго Ю.М., Фоменко Б.В., Полищук И.А.// Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. - 2007. - №2. -С.21-28.
7. Мовчан А.П. Идентификация объектов управления в адаптивных системах управления / Мовчан А.П., Мысак В.Ф., Степанец А.В. // - Сучасні наукові дослідження – 2006: матеріали II міжнародної науково-практичної конференції. - Д.: Наука і освіта, 2006. – с. 60-63.