

УДК 62-503.57

ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ З РЕГУЛЯТОРОМ НА БАЗІ ВНУТРІШНЬОЇ МОДЕЛІ З ДВОМА СТУПЕНЯМИ СВОБОДИ

Ю. М. Ковриго

Кандидат технічних наук, професор*

E-mail: yukovrygo@gmail.com

Т. Г. Баган

Старший викладач*

E-mail: diplomat4@gmail.com

А. П. Ущатовський

Інженер*

E-mail: andrew.upk@gmail.com

*Кафедра автоматизації теплоенергетичних процесів
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»
пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

Розглянуті основні проблеми керування інерційними об'єктами, показана доцільність проектування робастних систем керування та їх вдосконалення шляхом налаштування на задані показники якості. Запропонована методика синтезу робастного регулятора з двома ступенями свободи. Проведено імітаційне моделювання та приведені показники якості перехідних процесів, показані переваги запропонованих рішень

Ключові слова: керування, регулятор, робастність, якість, показник, стійкість, модель, синтез, функція, чутливість

Рассмотрены основные проблемы управления инерционными объектами, показана целесообразность проектирования робастных систем управления и их совершенствования путем настройки на заданные показатели качества. Предложена методика синтеза робастного регулятора с двумя степенями свободы. Проведено имитационное моделирование и приведены показатели качества переходных процессов, показаны преимущества предложенных решений

Ключевые слова: управление, регулятор, робастность, качество, показатель, устойчивость, модель, синтез, функция, чувствительность

1. Вступ

Більшість енергетичних процесів мають складний характер. Тобто вони поведуться нелінійно або мають високий порядок лінійної моделі. Тим не менш, досить часто дослідники намагаються описати їх моделлю низького порядку, яка своєю динамікою охоплює домінуючу частину об'єкту. Таке спрощення призводить до неточного описання процесу. Загалом, неадекватність моделі об'єкта управління (ОУ) обумовлюють такі основні невизначеності:

- неточності ідентифікаційного експерименту або самого методу ідентифікації;
- спрощення (проста структура, пониження порядку моделі ОУ, лінеаризація та ін.);
- обмеження на керуючі і керовані змінні та їх взаємозв'язок;
- нестационарності, особливо, коли ОУ повинен працювати в перехідних режимах (часті зміни навантаження, великі збурення).

Врахування цих невизначеностей з одночасним досягненням високої якості функціонування багатьох найважливіших контурів регулювання об'єктів теплоенергетики є актуальним завданням. При цьому найпоширенішим законом керування був і залишається ПІД-закон. Такий успіх пов'язано головним чином із простотою структури та роботи з ПІД-регуляторами, що дозволяє інженеру краще їх

розуміти порівняно з іншими, більш складними методами управління. Це є причиною появи багатьох досліджень, в яких намагаються знайти альтернативні підходи до синтезу та нові методики налаштування, щоб покращити якість управління в замкнених системах, де використовуються ПІД-регулятори. Більшість цих досліджень працюють із простими моделями об'єктів, параметри яких прямо впливають на параметри регулятора [1]. Основний висновок, що випливає з цих досліджень – це необхідність об'єднання розуміння проблем управління та його зв'язок із моделюванням і знанням об'єкта, що підлягає управлінню.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

На сьогодні існує велика кількість вимог до якості функціонування, причому багато з них – суперечливі. З одного боку – це добре зрозумілі інженерам, прямі показники якості (максимальне динамічне відхилення, час регулювання, характеристики затухання, час підйому та ін.). Однак, вони недостатньо конструктивні, щоб лягти в основу методів проектування. З іншого боку, непрямі показники (інтегральні IAE, ISE, ITSE або частотні M , m), кожен з яких дуже односторонній, зручний для теоретичних досліджень, широко використовуються в основі оптимізаційних чи аналітичних

методів, але їх зв'язок з реальною якістю функціонування системи досить штучний.

Шляхом об'єднання кількох засобів можна отримати метод проектування, який ефективний у порівняно широкому діапазоні невизначеностей, типових для інерційних ОУ теплоенергетики і забезпечує достатню робастність за рахунок невеликого, легко оцінюваного й допустимого зниження якості функціонування системи. При цьому важливо враховувати, щоб метод був не громіздким, інакше він не буде прийнятний практикою, а також при цьому відбувалась оцінка якості функціонування за допомогою прямого, а краще декількох прямих показників якості.

Для вирішення поставленої задачі розглядається можливість застосування регулятора оснований на внутрішній моделі управління з двома ступенями свободи на базі H_∞ -норми з використанням прямих показників якості.

Робастність – це аспект, який не може бути включений як інтегральна частина до розгляду при синтезі системи управління не лише для випадку ПІД регулювання, але і в більш широкій перспективі. Після того, як Зеймс для роботи з невизначеностями використав H_∞ -норму [2], робастне управління повністю увійшло до теорії управління і на даний час розроблено підхід під назвою H_∞ управління. Цей підхід висвітлено в багатьох роботах, які повністю розглядають предмет та різні його варіації [3–5].

Ідеї, які розглядаються в робастній теорії управління, врешті-решт були застосовані й для ПІД регулювання. Таке проникнення призвело до появи методів, які називаються робастне ПІД регулювання. У цьому випадку, розрізняють отримання робастного ПІД регулятора, який є результатом розв'язку задачі робастного управління, що застосовується для обмеженої структури регулятора, від запропонованих простих методів налаштування, які включаються до розгляду принципів робастності.

Тут, наприклад, існують методи, які розробляються на основі ІМС (*Internal Model Control* – внутрішня модель управління) [6], де результуючі методи налаштування залежать від параметра, який прямо впливає на робастність системи. Але така робастність не прямо пов'язана із робастною метрикою або кількісними показниками робастності. З іншого боку, існують методи, вперше описані в [7], які присвячені отриманню заданих запасів стійкості по підсиленню та фазі, і дали поштовх розвитку багатьом варіантам та доповненням. У цьому випадку, параметр налаштування прямо впливає на бажану робастність замкненої системи. Ідея, яка зараз широко застосовується, полягає у використанні максимуму функції чутливості (M_S), що є обґрунтованим показником робастності. Тут також можливо розрізнити підходи, де намагаються отримати задане значення M_S , та більш гнучкі підходи, що дають методи налаштування, які залежать від необхідного значення M_S [8].

3. Мета і задачі досліджень

Метою роботи є проектування робастного регулятора, базованого на внутрішній моделі управління з використанням H -норми, який можна налаштувати на

задані показники якості. Такий регулятор дозволить отримати робастну систему автоматичного керування складними інерційними об'єктами в умовах зміни режимів роботи устаткування або іншими невизначеностями.

Задачами дослідження є:

- доведення ефективності застосування регулятора, базованого на внутрішній моделі управління;
- вдосконалення системи управління шляхом розробки регулятора з двома ступенями свободи.

4. H_∞ -ІМС регулятор з одним ступенем свободи

На рис. 1 показана базова структура системи автоматичного керування з регулятором з внутрішньою моделлю.

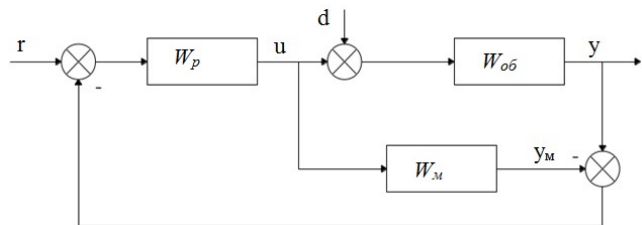


Рис. 1. Базова структура САУ із ІМС: $W_{об}$ – об'єкт керування, параметри якого можуть змінюватися; W_m – модель об'єкта керування, яка залишається сталою; W_p – стійкий регулятор; r – сигнал завдання; d – збурення з боку регульовального органу; y – вихідний сигнал системи автоматичного керування; y_m – вихідний сигнал моделі об'єкта

Як видно з рис. 1, така САУ має два вхідні сигнали: сигнал завдання та збурення з боку регульовального органу і один вихідний сигнал.

Зв'язок між вихідним та вхідним сигналами описується таким виразом:

$$y = \frac{W_{об} W_p}{1 + W_p (W_{об} - W_m)} r + \frac{1 - W_m W_p}{1 + W_p (W_{об} - W_m)} d. \quad (1)$$

Якщо модель точна ($W_{об} = W_m$) і відсутні збурення ($d=0$), тоді вихід з моделі та об'єкта рівні і сигнал зі зворотного зв'язку дорівнює 0. Це означає, що система є розімкнутою, коли немає невизначеностей – тобто відсутні невизначеності моделі та невідомі входи d . Це демонструє, що зворотній зв'язок необхідний лише у випадку наявності невизначеностей. Якщо об'єкт та всі його входи точно відомі, то немає необхідності у керуванні зі зворотнім зв'язком. Сигнал зі зворотного зв'язку виражає невизначеності в об'єкті.

5. H_∞ -ІМС регулятор з двома ступенями свободи

На рис. 2 показана базова структура системи автоматичного керування із регулятором з внутрішньою моделлю з двома ступенями свободи.

Регулятор W_d налаштовується на компенсацію збурень, а W_r – на необхідний перехідний процес за каналом завдання-вихід.

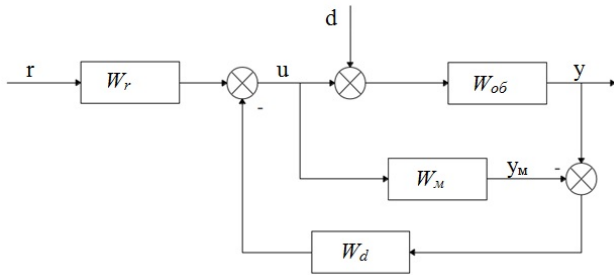


Рис. 2. Базова структура САУ із ІМС 2DoF: $W_{об}$ – об’єкт керування, параметри якого можуть змінюватися; W_m – модель об’єкта керування, яка залишається сталою; W_r – стійкий регулятор для відпрацювання завдання; W_d – стійкий регулятор для компенсації збурень; r – сигнал завдання; d – збурення з боку регульованого органу; y – вихідний сигнал системи автоматичного керування; y_m – вихідний сигнал моделі об’єкта

Зв’язок між вихідним та вхідним сигналами описується таким виразом:

$$y = \frac{W_r}{W_d} T(s)r + S(s)d, \tag{2}$$

де

$$S(s) = \frac{1 - W_m W_d}{1 + W_d(W_m - W)}, \tag{3}$$

$$T(s) = 1 - S(s) = \frac{W_{об} W_d}{1 + W_d(W_m - W)}. \tag{4}$$

Регулятори W_p , W_r та W_d повинні мінімізувати H_∞ -норму (тобто основну функцію чутливості) системи керування. При цьому застосовується принцип максимального модулю.

Нехай $F(s)$ – це функція, яка не має полюсів в Ω . Якщо $F(s)$ не є константою, то $|F(s)|$ не досягає свого максимального значення всередині Ω .

Подальше виведення регуляторів відбувається за такою методикою:

Модель об’єкта першого порядку:

$$W_o = \frac{K_o}{T_o s + 1} e^{-\tau s}. \tag{5}$$

За допомогою апроксимації Паде першого порядку вона може бути записана як

$$W_o \approx K_o \frac{1 - \frac{\tau}{2}s}{(T_o s + 1) \left(1 + \frac{\tau}{2}s\right)}. \tag{6}$$

Оскільки Sw означає передавальну функцію від зовнішнього збурення до виходу системи, то вона не повинна мати полюсів у відкритій правій на півплощині. При чому вагову функцію W приймаємо як $\frac{1}{s}$. Отже,

$$\|Sw\|_\infty = \left\| w \left[1 - W_o W_p \right] \right\|_\infty = \sup_{Re s > 0} \left| w \left[1 - W_o W_p \right] \right|.$$

Оскільки (6) має нуль при $s = \frac{2}{\tau}$, що є внутрішньою точкою відкритої правої напівплощини, то

$$\sup_{Re s > 0} \left| w \left[1 - W_o W_p \right] \right| \geq \left| w \left[1 - W_o W_p \right] \right|_{s = \frac{2}{\tau}} = \frac{\tau}{2}. \tag{7}$$

Щоб отримати регулятор, який надає замкнутій системі бажаних властивостей, необхідно ослабити вимоги щодо правильності визначення та знайти деяке оптимальне W_p^{opt} . Правильно визначений регулятор буде отримано із W_p^{opt} шляхом фільтрації високих частот. Рівняння (7) дає таке оптимальне рішення

$$W_p^{opt} = \frac{w - \frac{\tau}{2}}{w W_o} = \frac{T_o s + 1}{K_o} \left(1 + \frac{\tau}{2} s \right). \tag{8}$$

W_p^{opt} є неправильно визначеним, тому вводимо

фільтр високих частот – $F = \frac{1}{(\lambda s + 1)^2}$. Фільтр не повинен порушувати умови асимптотичної стійкості –

$\lim_{s \rightarrow 0} \left[1 - W_o W_p^{opt} F \right] = 0$. Отже, правильно визначений і, відповідно, фізично реалізований регулятор є таким

$$W_p = W_p^{opt} F = \frac{(T_o s + 1) \left(1 + \frac{\tau}{2} s \right)}{K_o (\lambda s + 1)^2}. \tag{9}$$

6. Отримання ПІД-регулятора

За допомогою еквівалентних перетворень структури на рис. 1, 2 можуть бути приведені до класичної структури зі зворотним зв’язком. Такі перетворення показані на рис. 3, 4.

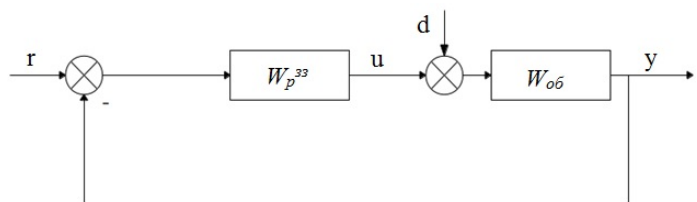


Рис. 3. Структура класичної АСР зі зворотним зв’язком

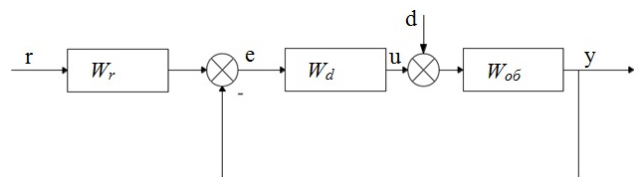


Рис. 4. Класична структура АСР зі зворотним зв’язком з двома ступенями свободи

При цьому регулятор W_p^{33} на рис. 3, використовуючи (9) матиме такий вигляд:

$$W_p^{33} = \frac{W_p}{1 - W_m W_p} = \frac{1}{K_o} \frac{(T_o s + 1) \left(1 + \frac{\tau}{2} s\right)}{\lambda^2 s^2 + \left(2\lambda + \frac{\tau}{2}\right) s}, \quad (10)$$

який можна привести до ПІД регулятора виду

$$W^{ПІД} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d\right) \frac{1}{T_\phi i + 1}, \quad (11)$$

де параметри регулятора визначаються як

$$K_p = \frac{T_o + \frac{\tau}{2}}{K_o \left(2\lambda + \frac{\tau}{2}\right)}, \quad T_i = T_o + \frac{\tau}{2}, \quad T_d = \frac{T_o \tau}{2 \left(T_o + \frac{\tau}{2}\right)}, \quad (12)$$

$$T_\phi = \frac{\lambda^2}{2\lambda + \frac{\tau}{2}}.$$

Регулятори W_r та W_d на рис. 4 згідно з (9) мають вигляд:

$$W_r = \frac{(\lambda_d s + 1)^2}{(\lambda_r s + 1)^2}, \quad (13)$$

$$W_d = \frac{W_p}{1 - W_m W_p} = \frac{1}{K_o} \frac{(T_o s + 1) \left(1 + \frac{\tau}{2} s\right)}{\lambda_d^2 s^2 + \left(2\lambda_d + \frac{\tau}{2}\right) s}. \quad (14)$$

Регулятор компенсації збурень (14) можна привести до вигляду (11), параметри якого будуть визначатися за такими формулами:

$$K_p = \frac{T_o + \frac{\tau}{2}}{K_o \left(2\lambda_d + \frac{\tau}{2}\right)}, \quad T_i = T_o + \frac{\tau}{2}, \quad (15)$$

$$T_d = \frac{T_o \tau}{2 \left(T_o + \frac{\tau}{2}\right)}, \quad T_\phi = \frac{\lambda_d^2}{2\lambda_d + \frac{\tau}{2}}.$$

7. Результати дослідження

Під час дослідження регулятора із внутрішньою моделлю були виявлені однозначні залежності між приведеними прямими показниками якості перехідних процесів та налаштуваннями регулятора [9].

Однозначні залежності існують також для запасів стійкості від налаштувань регулятора.

Варто зауважити, що для регулятора з двома ступенями свободи, показники стійкості залежать лише від налаштування регулятора збурень.

Для прикладу візьмемо передавальну функцію температури пари за верхньою радіаційною частиною прямооточного котла типу ПК-41 (ЗІО), який працює в

блоці з турбіною типу К-300-240 (ХТГЗ), при збуренні живильною водою [10]:

$$N = 75 \% \quad W^{75}(s) = \frac{2,1}{310s + 1} e^{-110s},$$

$$N = 100 \% \quad W^{100}(s) = \frac{1,8}{270s + 1} e^{-85s}.$$

Перехід енергоблоків відповідно до диспетчерського графіка на понижене навантаження збільшує інерційність об'єктів, що погіршує якість перехідних процесів. Згідно з методикою налаштування ІМС регуляторів налаштовувати регулятор необхідно на найгірший випадок, тому передаточною функцією моделі об'єкта буде передаточна функція об'єкта при навантаженні 75 %.

У даному прикладі налаштуємо регулятори на забезпечення максимуму функції чутливості 1,4 (таке значення вважається оптимальним). Згідно з визначеною залежністю [9] цій вимозі відповідає значення $\lambda = 0,85$. Таким чином, використовуючи (14) маємо налаштування ПІД-регулятора, який дає наступні перехідні процеси в замкнутій системі з ІМС-регулятором з одним ступенем свободи.

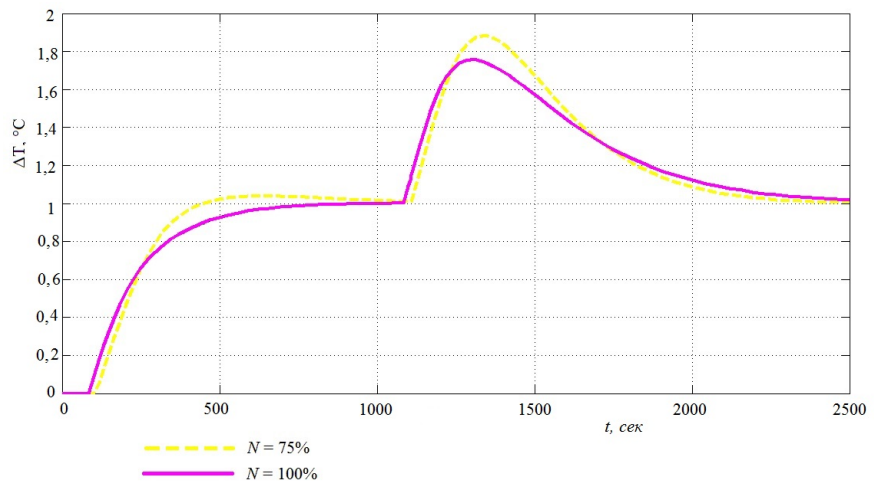


Рис. 5. Перехідні процеси у системі з регулятором із одним ступенем свободи

Для регулятора з двома ступенями свободи необхідно вибрати сталу часу регулятора завдання. У цьому випадку до перехідного процесу висувається вимога найбільшої швидкодії при відсутності перерегулювання. Згідно з [9] цій вимозі відповідає значення $\lambda = 0,5$.

Обчислимо прямі показники якості перехідних процесів, показаних на рис. 5, 6. Результати обчислення показані у табл. 1.

Таблиця 1

Прямі показники якості перехідних процесів

Ступені свободи	1 ступінь свободи		2 ступеня свободи		збурення-вихід	
	завдання-вихід					
Канал управління	75 %	100 %	75 %	100 %	75 %	100 %
Режим роботи	75 %	100 %	75 %	100 %	75 %	100 %
Динамічна похибка, °C	0,04	0	0,08	0	0,88	0,75
Час регулювання, с	386	550	530	419	2105	2243

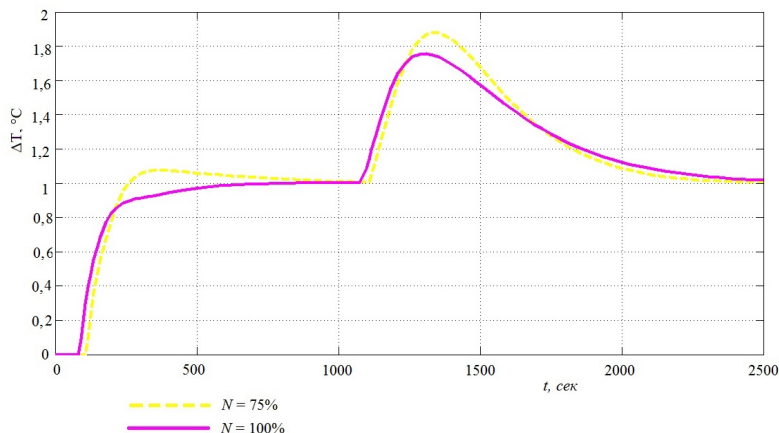


Рис. 6. Перехідні процеси у системі з регулятором із двома ступенями свободи

Як бачимо з табл. 1, система автоматичного регулювання з налаштованим регулятором з внутрішньою моделлю управління є робастною, так як зміна основних показників якості функціонування системи не перевищує задані технологічні межі при зміні режимів роботи обладнання.

Введення другого ступеню свободи для регулятора дає додаткову можливість контролювати і налаштовувати перехідний процес по завданню в бік оптимальних показників якості ближче до потрібного режиму роботи.

8. Висновки

В даній статті запропоновано підхід для отримання ПІД регулятора на основі ІМС регулятора з одним та двома ступенями свободи.

У теплоенергетичній галузі, зважаючи на нестационарність характеристик об'єктів керування, важливо налаштувати регулятори із деяким запасом стійкості. Запропонований регулятор, який спроектований як ІМС з мінімумом H_∞ -норми забезпечує заданий запас стійкості лише одним параметром налаштування. Тобто система з таким регулятором є робастною в робочому діапазоні змін параметрів об'єкта управління.

Для регуляторів такого типу існують однозначні залежності між його налаштуваннями та прямими показниками якості перехідних процесів. За допомогою цих залежностей, висуваючи вимоги до якості функціонування системи, можна просто вибрати необхідні налаштування регуляторів.

Використання регулятора з двома ступенями свободи дає можливість отримувати задані показники якості окремо для різних каналів регулювання: по зовнішньому збуренню і по завданню. Таким чином, в порівнянні з ІМС-регулятором з одним ступенем свободи, є можливість більш якісного налаштування каналів управління з незалежністю впливу одного на інший.

Література

1. Åström, K. J. Advanced PID Control [Text] / K. J. Åström, T. Hägglund. – Instrument Society of America. – Research Triangle Park, 2006. – 460 p.
2. Zames, G. Feedback, minmax sensitivity and optimal robustness [Text] / G. Zames, B. A. Francis // IEEE Trans. Autom. Control. – 1983. – Vol. 28. – P.585–601. doi:10.1109/TAC.1983.1103275
3. Morari, M. Robust Process Control [Text] / M. Morari, E. Zafiriou. – New Jersey: Prentice Hall-Englewood Cliffs, 1989. – 479 p.
4. Vilanova, R. PID control in the third millennium [Text] / R. Vilanova, A. Vissoli. – Springer-Verlag London Limited, 2012. – 599 p. doi:10.1007/978-1-4471-2425-2
5. Поляк, Б. Т. Робастная устойчивость и управление [Текст] / Б. Т. Поляк, П. С. Щербаков – М.: Наука, 2002. – 303 с.
6. Rivera, D. E. Internal model control [Text] / D. E. Rivera, M. Morari, S. Skogestad. – Ind. Eng. Chem. Res. 25, 1986. – 265 p.
7. Astrom, K. J. PID controllers: Theory, design, and tuning [Text] / K. J. Astrom, T. Hägglund. – NC: Instrument Society of America – Research Triangle Park, 1995. – 461 p.
8. Skogestad, S. Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning [Text] / S. Skogestad // Journal of Process Control. – 2003. – Vol. 13, Issue 4. – P. 291–309. doi:10.1016/S0959-1524(02)00062-8
9. Ковриго, Ю. М. Методика налаштування H_∞ -ПІД регулятора для об'єктів із запізнюванням [Текст] / Ю. М. Ковриго, Т. Г. Баган // Наукові вісті НТУУ «КПІ», Київ. – 2013. – № 1. – С. 12–17.
10. Коновалов, М. А. Проблемы автоматизации инерционных теплоэнергетических объектов [Текст] / М. А. Коновалов. – К.: Феникс, 2009. – 312 с.