

КАСКАДНІ АВТОМАТИЧНІ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ З ПОСЛІДОВНО-ПАРАЛЕЛЬНИМ КОРЕГУВАННЯМ

© Ковела І., Іванюк О., 2005

Proposed are new structures of cascade automatic control systems which have corrective and stabilizing controllers plugged in a series-parallel correction circuit. Compared to traditional schemas the latter provide for improved quality and high robustness.

Автоматичні системи регулювання (АСР), у тому числі й каскадні (КАСР), переважно будуються за традиційною схемою, у якій регулятор використовується як послідовний корегуючий пристрій. Недоліком такої схеми є те, що ефективність корегування зменшується за зміни параметрів послідовно з'єднаних елементів системи. Крім того, під час послідовного вмикання регулятора часто зустрічаються великі значення регулюючої змінної, які не завжди можуть бути відпрацьовані виконавчим механізмом, або ж є недопустимими за технологічними вимогами до об'єкта регулювання. Добрі можливості подолання вказаних недоліків відкриваються під час використання алгоритмів регулювання у режимі послідовно-паралельного корегування, тобто коли одні алгоритми або складові одного алгоритму здійснюють послідовне, а інші – паралельне корегування. Це дає змогу реалізувати основні переваги, властиві корегуванню за допомогою від'ємних зворотних зв'язків, які полягають у тому, що [1]:

- зменшується залежність показників якості системи від зміни параметрів її елементів, оскільки в суттєвому діапазоні частот передавальна функція ділянки схеми, охопленої зворотним зв'язком, визначається насамперед передавальною функцією корегуючого пристрою, тому вимоги до стабільності елементів системи можуть бути менш жорсткими, ніж за послідовного корегування;
- нелінійні характеристики елементів, охоплених зворотним зв'язком, лінеаризуються;
- паралельний корегуючий пристрій працює за меншого рівня завад, оскільки сигнал, що надходить до нього, проходить через усю систему, яка є добрим фільтром нижніх частот; завдяки цьому ефективність дії паралельного корегуючого пристрою під час накладання завад на сигнал помилки регулювання погіршується меншою мірою, ніж послідовного.

Застосування паралельного корегування в АСР є особливо актуальним з огляду на те, що, по-перше, точність математичного опису об'єктів регулювання є доволі низькою, а по-друге, їх динамічні властивості можуть змінюватися під впливом багатьох чинників, зокрема, навантаження. У [2–4] було показано ефективність застосування послідовно-паралельного корегування в одноконтурних системах. За реалізації систем регулювання за допомогою сучасних технічних засобів фактично ніщо не заважає розповсюдженню такого принципу і на каскадні системи з метою реалізації згаданих переваг. Враховуючи сказане, у цій роботі пропонуються нові структури каскадних систем із застосуванням додаткових від'ємних зворотних зв'язків та досліджуються їх характеристики.

Структури та характеристики КАСР з корегуючим і стабілізуючим регуляторами, увімкненими за схемами послідовно-паралельного корегування

Двоконтурні системи особливо ефективні у тих випадках, коли внутрішній контур має значно меншу інерційність, ніж зовнішній, і коли основні збурення діють на допоміжну частину об'єкта. Проте домогтися такого положення вдається далеко не завжди, оскільки наближення проміжної

точки відбору додаткового сигналу до регулювального органа (РО) з метою зменшення інерційності внутрішнього контуру зменшує кількість збурень, яку він охоплює. Водночас таке наближення підвищує ефективність подібних систем при збуреннях, що діють по регулювальному каналу, тобто з боку РО. Останні інколи називають внутрішніми, на відміну від збурень, які не охоплюються внутрішнім контуром, і тому відносяться до зовнішніх. Такими, зокрема, є зміни завдання корегуючому регулятору.

Іншою важливою проблемою, яку необхідно враховувати під час синтезу та експлуатації каскадних систем, є проблема насичення внутрішнього контуру.

Вирішити згадані проблеми можна за допомогою ускладнення структури каскадних систем з використанням принципу послідовно-паралельного корегування. Це, зокрема, стало можливим завдяки тому, що за сучасних умов реалізація систем будь-якої структури принципових труднощів не викликає, оскільки вони реалізуються програмним способом за допомогою спеціальних пакетів (наприклад, *Concept* фірми *Schneider Electric*) з використанням стандартних мов програмування.

В рамках такого підходу можуть бути реалізовані структури каскадних систем, в яких у загальному випадку за схемою послідовно-паралельного корегування увімкнені і стабілізуючий (СП) і корегуючий (КР) регулятори (рис. 1). Залежно від особливостей реалізації, передавальні функції КР - $W_{pk1}(s)$, $W_{pk2}(s)$ і СП - $W_{pc1}(s)$, $W_{pc2}(s)$ відображають або окремі самостійні алгоритми, або складові ПД-алгоритму з паралельною структурою. Особливості цієї схеми полягають у тому, що в ній місцевими від'ємними зворотними зв'язками охоплюється не тільки допоміжна частина об'єкта, як у звичайній каскадній системі, але й внутрішній контур та об'єкт в цілому. Це дає змогу найповніше реалізувати переваги, властиві корегуванню за допомогою від'ємного зворотного зв'язку.

На рис. 1: $W_{oq}(s)$, $W_{oy}(s)$, $W_q(s)$ – передавальні функції малоінерційної та головної частин об'єкта і вимірювального перетворювача (ВП) допоміжної регульованої величини Q ; $F(s)$ – збурення, що діє на об'єкт по регулювальному каналу; ефект дії усіх інших збурень в цій схемі враховується двома еквівалентними збуреннями $V_1(s)$ і $V(s)$, що накладаються безпосередньо на основну $Y(s)$ та допоміжну $Q(s)$ регульовані величини; припускається, що динаміка ВП основної регульованої величини враховується в $W_{oy}(s)$. Передавальна функція об'єкта загалом визначається як $W_o(s) = W_{oq}(s)W_{oy}(s)$.

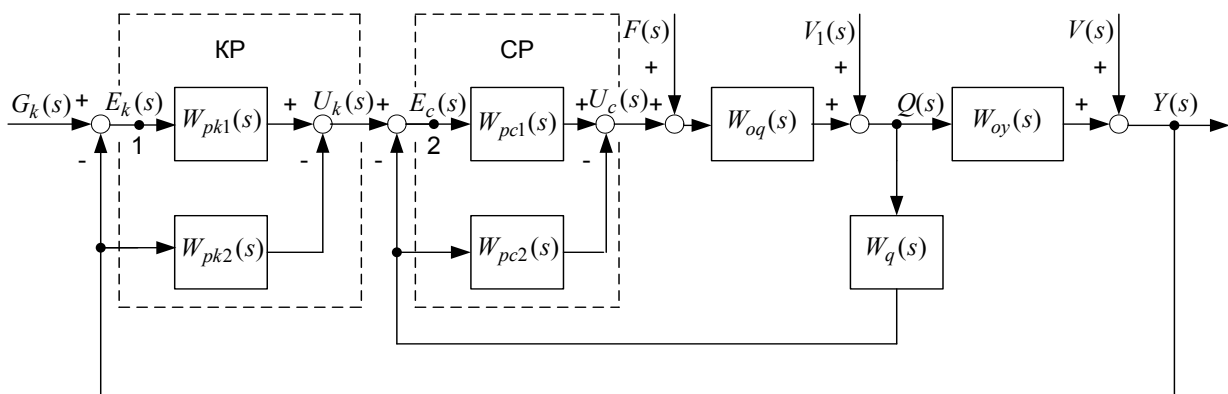


Рис. 1. Структура каскадної АСП з послідовно-паралельним корегуванням у внутрішньому та зовнішньому контурах

Під час розмикання цієї системи у точках 1 і 2 (рис. 1) можна побачити, що для послідовно увімкнених корегуючого $W_{pk1}(s)$ та стабілізуючого $W_{pc1}(s)$ регуляторів еквівалентні об'єкти (відповідно з'єднані усі інші ланки системи, крім цього регулятора) описуються виразами

$$W_{iek}(s) = \frac{W_{\delta c1}(s)W_{oq}(s)W_{oy}(s)}{1 + [W_{\delta c1}(s) + W_{pc2}(s)] W_{oq}(s)W_q(s) + W_{pc1}(s)W_{pk2}(s)W_{oq}(s)W_{oy}(s)}}, \quad (1)$$

$$W_{iec}(s) = \frac{W_{oq}(s) \{ W_{oy}(s) [W_{pk1}(s) + W_{pk2}(s)] + W_q(s) \}}{1 + W_{pn2}(s)W_{oq}(s)W_q(s)}. \quad (2)$$

Отже, двоконтурній системі відповідають дві різні розімкнені системи з передавальними функціями

$$W_k(s) = W_{pk1}(s)W_{iek}(s), \quad W_c(s) = W_{pc1}(s)W_{iec}(s). \quad (3)$$

Проте обом цим розімкненим системам відповідає одне й те саме характеристичне рівняння замкненої системи

$$\Delta(s) = 1 + [W_{pc1}(s) + W_{pc2}(s)] W_{oq}(s)W_q(s) + [W_{pk1}(s) + W_{pk2}(s)] W_{pc1}(s)W_o(s). \quad (4)$$

Розімкнені системи (3) повинні братися до уваги під час дослідження стійкості контурів КАСР. Характеристичне рівняння (4) може бути використане для параметричного синтезу двоконтурної системи у просторі параметрів настроювання регуляторів на основі багатокритеріального підходу, в тому числі й при сумірній динаміці малоінерційної та головної частин об'єкта.

Частковими випадками системи, зображеної на рис. 1, є:

а) $W_{pk1}(s) = W_{pk}(s); W_{pk2}(s) = 0; W_{pc1}(s) = W_{pc}(s); W_{pc2}(s) = 0$; при цьому отримаємо звичайну каскадну АСР (рис. 2).

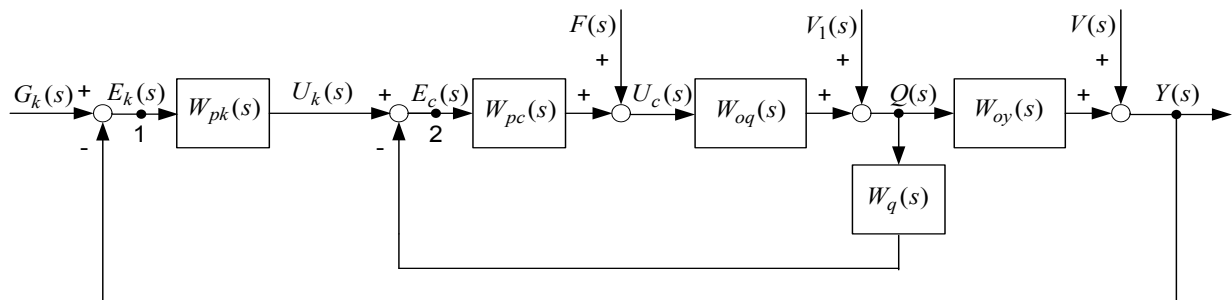


Рис. 2. Структура звичайної каскадної АСР з корегуючим і стабілізуючим регуляторами

Еквівалентними об'єктами для корегуючого та послідовно увімкненого стабілізуючого регуляторів є:

$$W_{iek}(s) = \frac{W_{\delta c}(s)W_{oq}(s)W_{oy}(s)}{1 + W_{pc}(s)W_{oq}(s)W_q(s)}; \quad (5)$$

$$W_{iec}(s) = W_{oq}(s) [W_q(s) + W_{pk}(s)W_{oy}(s)]. \quad (6)$$

Відповідні розімкнені системи описуються виразами

$$W_k(s) = W_{pk}(s)W_{iek}(s); \quad W_c(s) = W_{pc}(s)W_{iec}(s). \quad (7)$$

Обом цим розімкненим системам відповідає характеристичне рівняння замкненої системи

$$\Delta(s) = 1 + W_{pc}(s)W_{oq}(s)W_q(s) + W_{pc}(s)W_{pk}(s)W_o(s); \quad (8)$$

б) $W_{pk1}(s) = W_{pk}(s); \quad W_{pk2}(s) = 0$; у цьому випадку двоконтурна система набирає вигляду, показаного на рис. 3.

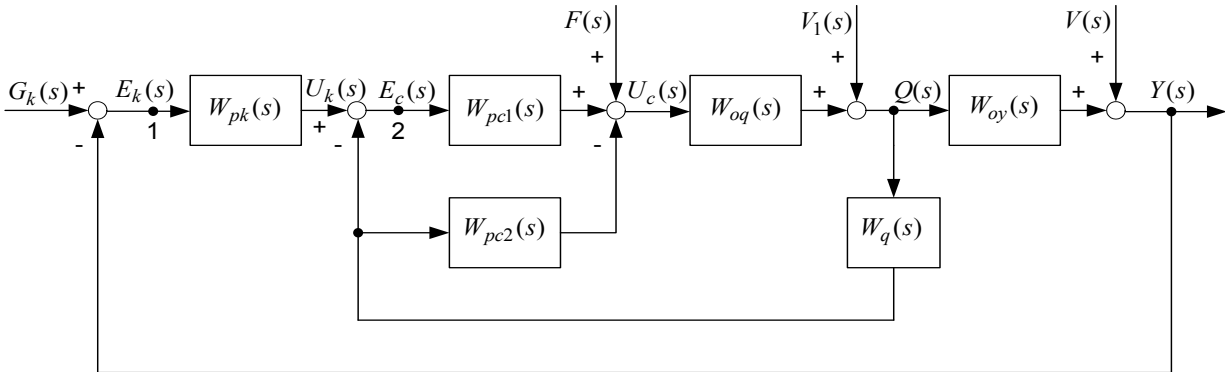


Рис. 3. Структура каскадної АСР з послідовно-паралельним корегуванням у контурі стабілізації

Еквівалентними об'єктами для корегуючого та послідовно увімкненого стабілізуючого регуляторів є:

$$W_{iek}(s) = \frac{W_{\delta c1}(s)W_{oq}(s)W_{oy}(s)}{1 + [W_{\delta c1}(s) + W_{pc2}(s)]W_{oq}(s)W_q(s)}; \quad (9)$$

$$W_{iec}(s) = \frac{W_{oq}(s) [W_{oy}(s)W_{pk}(s) + W_q(s)]}{1 + W_{pc2}(s)W_{oq}(s)W_q(s)}. \quad (10)$$

Відповідні розімкнені системи описуються виразами

$$W_k(s) = W_{pk}(s)W_{iek}(s), \quad W_c(s) = W_{pc1}(s)W_{iec}(s). \quad (11)$$

Обом цим розімкненим системам відповідає характеристичне рівняння замкненої системи

$$\Delta(s) = 1 + [W_{pc1}(s) + W_{pc2}(s)]W_{oq}(s)W_q(s) + W_{pc1}(s)W_{pk}(s)W_o(s); \quad (12)$$

в) $W_{pc1}(s) = W_{pc}(s); \quad W_{pc2}(s) = 0$; тоді отримаємо систему, як на рис. 4.

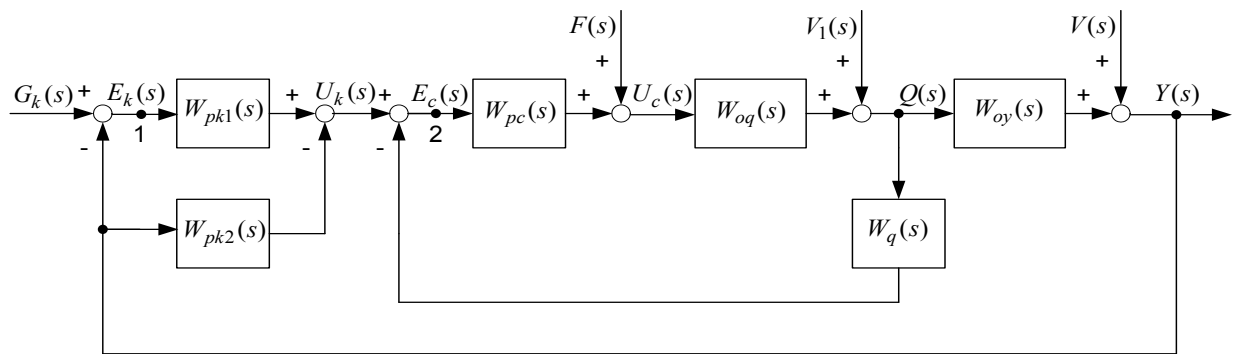


Рис. 4. Структура каскадної АСР з послідовно-паралельним корегуванням у контурі корегування

Розмикання цієї системи у точках 1 і 2 дає змогу отримати такі співвідношення, де усі позначення відповідають прийнятим раніше:

$$W_{iek}(s) = \frac{W_{\delta c}(s)W_{oq}(s)W_{oy}(s)}{1 + W_{pc}(s)W_{oq}(s)W_q(s) + W_{pc}(s)W_{pk2}(s)W_{oq}(s)W_{oy}(s)}; \quad (13)$$

$$W_{iec}(s) = W_{oq}(s) \{ W_{oy}(s)[W_{pk1}(s) + W_{pk2}(s)] + W_q(s) \}; \quad (14)$$

$$W_k(s) = W_{pk1}(s)W_{iek}(s), \quad W_c(s) = W_{pc}(s)W_{iec}(s); \quad (15)$$

$$\Delta(s) = 1 + W_{pc}(s)W_{oq}(s)W_q(s) + [W_{pk1}(s) + W_{pk2}(s)]W_{pc}(s)W_{oq}(s). \quad (16)$$

Зіставляючи, наприклад, характеристичні рівняння (8) і (12), можна дійти висновку, що розрахунок системи типу (ПІ-ПД)с-ПІк в обчислювальному відношенні навіть простіший, ніж звичайної КАСР типу ПІДс-ПІк.

За цифрової реалізації систем необхідно користуватися поняттями еквівалентного неперервного регулятора (ЕНР) [5, 6]:

$$W_{\dot{a}i\delta}^*(s) \cong \frac{1}{T_0} W_{\delta\delta}(z) W_e(z, s) \Big|_{z=e^{T_0s}}, \quad (17)$$

де $W_{\dot{a}i\delta}(z)$, $W_e(z, s)$ – передавальні функції цифрового регулятора та екстраполятора нульового порядку; T_0 – період дискретності. Тоді отримаємо структури неперервних систем, еквівалентних цифровим, аналогічні до рис. 1–4. Параметричний синтез таких КАСР за частот $\omega \leq \pi/T_0$ доцільно здійснювати за методами теорії неперервних систем [8].

З метою полегшення розрахунку та реалізації таких систем алгоритми функціонування регуляторів необхідно вибирати з числа типових, наявних у бібліотеках програмованих мікропроцесорних контролерів. Зауважимо, що навіть за такого підходу, порівняно з традиційними системами, кількість можливих варіантів реалізації систем з послідовно-паралельним корегуванням істотно зростає, отже, збільшуються і можливості пошуку оптимальних розв'язків задачі синтезу.

Для прикладу виконаємо параметричний синтез і дослідження каскадної системи, яка має структуру (рис. 3) і містить об'єкт – пароперегрівник парового котла енергетичного блока потужністю 800 МВт, динаміка якого описується передавальними функціями [5]:

$$W_o(s) = \frac{K_o e^{-\tau_o s}}{(T_2 s + 1)(T_1 s + 1)^2}; \quad (18)$$

$$W_{oq}(s) = \frac{K_o e^{-\tau_q s}}{(T_3 s + 1)}; \quad W_{oy}(s) = \frac{(T_3 s + 1)e^{-\tau_y s}}{(T_2 s + 1)(T_1 s + 1)^2}. \quad (19)$$

Номинальні значення коефіцієнтів математичної моделі об'єкта: $K_o = 1$; $T_1 = 22,8$ с; $T_2 = 54$ с²; $T_3 = 9,6$ с; $\tau_o = 11,4$ с; $\tau_q = 1,8$ с; $\tau_y = 9,6$ с.

Передавальні функції регуляторів приймаються у вигляді

$$W_{pe}(s) = W_{pie}(s) = K_{pe} \left(1 + \frac{1}{T_{ie}s} \right); \quad (20)$$

$$W_{pcl}(s) = K_{pc} \left(1 + \frac{1}{T_{ic}s} \right), \quad W_{pn2}(s) = K_{pn} \left(1 + \frac{T_{dc}s}{\frac{T_{dc}}{N}s + 1} \right), \quad N = 8. \quad (21)$$

Синтез системи був виконаний за методом багатокритеріального оптимуму в просторі усіх параметрів настроювання [6, 7, 9]. При цьому було прийнято $W_q(s) = 1$. В результаті аналізу був вибраний варіант системи, найкращий за співвідношенням „динамічна точність-запас стійкості”, параметри якого розраховані за значеннями кореневого показника коливності контурів СР та КР $m_c = 0,7$; $m_k = 0,5$ відповідно (табл. 1). У цій самій таблиці з метою порівняння наведені також параметри найкращої (у згаданому розумінні) для заданого об'єкта звичайної каскадної системи типу ПДс-ПШк.

Таблиця 1

Параметри неперервних КАСР ($m_c = 0,7$; $m_k = 0,5$)

Тип системи	K_{pc}	T_{ic}, c	T_{dc}, c	Ω, c^{-1}	K_{pk}	T_{ik}, c	ω, c^{-1}	Запаси стійкості			
								A_{mk}	ϕ_{mk}°	A_{mc}	ϕ_{mc}°
(ПШ-ПД)с-ПШк	2.68	1.63	0.97	0.61	1.16	72.65	0.024	3.75	55.1	1.88	42.8
ПДс-ПШк	5.34	3.59	0.46	0.64	1.20	71.80	0.024	3.94	54.6	1.79	29.0

У табл. 1 наведені також значення запасів стійкості за модулем A_m та фазою ϕ_m° контурів системи. Варто звернути увагу на те, що власна частота Ω внутрішнього контуру приблизно у 30 разів перевищує частоту власних коливань ω зовнішнього контуру, тобто процеси в контурах можна вважати автономними.

За допомогою моделювання з використанням Simulink (MATLAB) були досліджені перехідні характеристики систем за різних вхідних дій (табл. 2).

Показники якості неперервної КАСР ПДс-ПІк ($m_c=0,7$; $m_k=0,6$)

Тип системи	Контур корегуючого регулятора				Контур стабілізуючого регулятора			
	u_m	u_{mk}	J_y	t_y, c	q_m	u_{mc}	J_q	t_q, c
По завданню g_k								
(ПІ-ПД)с – ПІк	1,13	1,60	55,20	207	1,60	6,6	4,14	236
ПДс-ПІк	1,13	1,63	52,89	202	2,0	5,8	4,28	229
По збуренню f								
(ПІ-ПД)с – ПІк	0,0047	-0,008	0,0017	–	0,20	-1,68	0,1132	7,0
ПДс-ПІк	0,0052	-0,009	0,0020	–	0,20	-1,60	0,1148	7,3
По збуренню v_1								
(ПІ-ПД)с – ПІ	0,0050	-0,008	0,0019	–	1,00	-27	3,16	12,0
ПДс-ПІк	0,0055	-0,009	0,0022	–	1,00	-48	2,96	11,6

Позначення у табл. 2: u_m , q_m , J_y , J_q , t_y , t_q – максимальні відхилення, інтегральні квадратичні оцінки з помилки та час регулювання процесів за основною та допоміжною регульованими величинами відповідно; u_{mk} , u_{mc} – вихідні сигнали корегуючого і стабілізуючого регуляторів. Час регулювання за основною регульованою величиною для процесів компенсації збурень f і v_1 не фіксувався, оскільки ці відхилення приблизно на порядок менші від п'ятипроцентної зони.

Як бачимо з табл. 2, відхилення та інтегральні квадратичні оцінки процесів за основною регульованою величиною при дії збурень f і v_1 , для компенсації яких, власне, й застосовуються КАСР, настільки малі, що ними можна знехтувати. Отже, стосовно цих збурень систему можна вважати інваріантною.

Основні перехідні процеси в каскадній системі, отримані за допомогою моделювання, показані на рис. 5, де бачимо, що за зміни завдання корегуючого регулятора стабілізуючий регулятор досить швидко відпрацьовує помилку, після чого переходить у слідкуючий режим. Дані табл. 2 та рис. 5 показують, що система з послідовно-паралельним корегуванням (особливо, її внутрішній контур) характеризується якістю, загалом вищою, ніж традиційна КАСР.

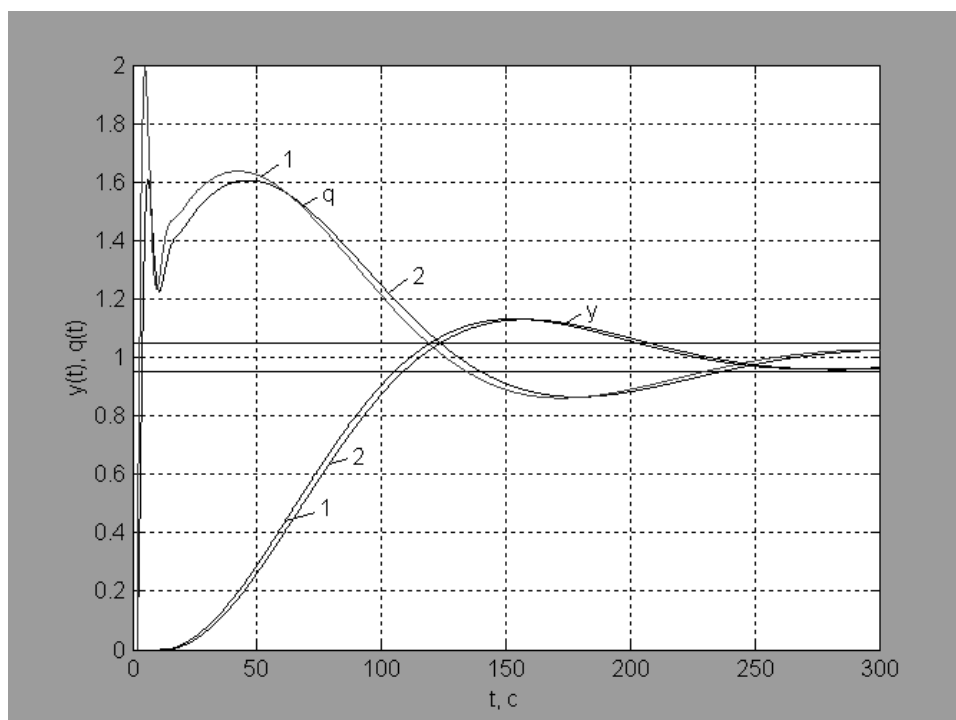


Рис. 5. Перехідні процеси за основною та допоміжною регульованими величинами при зміні завдання g_k (1-ПДс-ПІк; 2- (ПІ-ПД)с-ПІк, $m_c = 0,7$; $m_k = 0,5$)

Ще кращих результатів можна досягти, якщо розрахувати систему за неоднакових коефіцієнтів підсилення регуляторів у контурі стабілізації [4].

Дослідження робастності каскадних систем

Реальність, яку необхідно враховувати під час проектування систем регулювання, полягає у тому, що вихідні дані для розрахунків (структура і параметри моделі об'єкта) задаються завжди з деякою, переважно навіть невідомою похибкою; з певною похибкою, обумовленою характеристиками технічних засобів, реалізуються також знайдені в результаті розрахунку параметри настроювання регулятора (ПНР). Відповідно для повної упевненості в працездатності системи необхідно ще з'ясувати, чи збереже система стійкість за можливих, нехай навіть невеликих варіацій її параметрів відносно розрахункових значень. Системи, які задовольняють цій вимозі, називають *грубими*. Ступінь впливу зміни параметрів системи на її статичні та динамічні властивості, в тому числі й на зміну її запасу стійкості, називається *чутливістю*. Для її кількісної оцінки використовують різноманітні функції чутливості, які дають можливість оцінювати зміни передавальних функцій, часових та частотних характеристик або показників якості при варіаціях параметрів [1].

Проте грубість системи ще не може вважатися достатньою ознакою її працездатності, необхідно, щоб за можливих варіацій параметрів система зберігала достатній запас стійкості. Системи, які зберігають за усіх можливих варіацій параметрів необхідний запас стійкості, отримали назву *робастних*.

Під час дослідження цієї проблеми необхідно брати до уваги такі міркування. Можливі відхилення параметрів настроювання регуляторів від їх розрахункових значень, обумовлені характеристиками технічних засобів, є незначними, а самі параметри є стабільними. Натомість, параметри математичної моделі об'єкта (як і сама модель) під час експлуатації можуть змінюватися непередбачувано і доволі істотно. Тому неточності встановлення ПНР практично можна не враховувати, а основну увагу треба приділяти вивченню впливу на характеристики системи відхилень параметрів об'єкта від прийнятих під час розрахунку (номінальних) значень.

За традиційного підходу для забезпечення робастності система розраховується з огляду на можливі відхилення параметрів об'єкта. Отже, підвищення робастності досягається за рахунок погіршення динамічної точності за номінальних параметрів об'єкта. Проте, як буде показано нижче, компроміс між суперечливими вимогами точності і робастності може бути досягнутий за рахунок ускладнення структури системи, зокрема, за допомогою додаткових від'ємних зворотних зв'язків.

Найбільш наочно з'ясувати вплив варіацій параметрів можна за допомогою функцій чутливості часових характеристик, які за різних вхідних дій можуть бути визначені аналітично [1]. Однак значно простіше розв'язати цю задачу за допомогою моделювання. Під час моделювання бралася до уваги лише параметрична невизначеність об'єкта, тобто досліджувалися перехідні процеси при його номінальних параметрах та при одночасних відхиленнях усіх параметрів на ± 20 та ± 30 % (рис. 6). Знаки відхилень окремих параметрів були вибрані такими, що спричиняють погіршення динамічної точності системи. Отже, при 20 % відхиленнях $K_0 = 0,8$; $T_1 = 27,36$ с; $T_2 = 64,8$ с²; $T_3 = 7,68$ с; $\tau_q = 2,16$ с; $\tau_y = 11,52$ с, а при змінах параметрів на 30 % – $K_0 = 0,7$; $T_1 = 29,64$ с; $T_2 = 70,2$ с²; $T_3 = 6,72$ с; $\tau_q = 2,34$ с; $\tau_y = 12,48$ с.

Водночас було встановлено, що у звичайній каскадній системі типу ПДс-Пк з ПНР, що відповідають табл. 1 (тобто номінальним параметрам об'єкта), вже при 20 %-му відхиленні параметрів об'єкта під дією сигналу завдання спочатку втрачає стійкість внутрішній контур, а потім і зовнішній. Натомість система з послідовно-паралельним корегуванням типу (ПІ-ПД)с-Пк, ПНР якої також відповідають табл. 1, залишається працездатною навіть за найгіршої гіпотетичної комбінації відхилень параметрів об'єкта. Хоч показники якості обох контурів при цьому істотно погіршуються, але все таки стійкості система не втрачає. Це є особливо важливо з огляду на реальні умови експлуатації подібних систем.

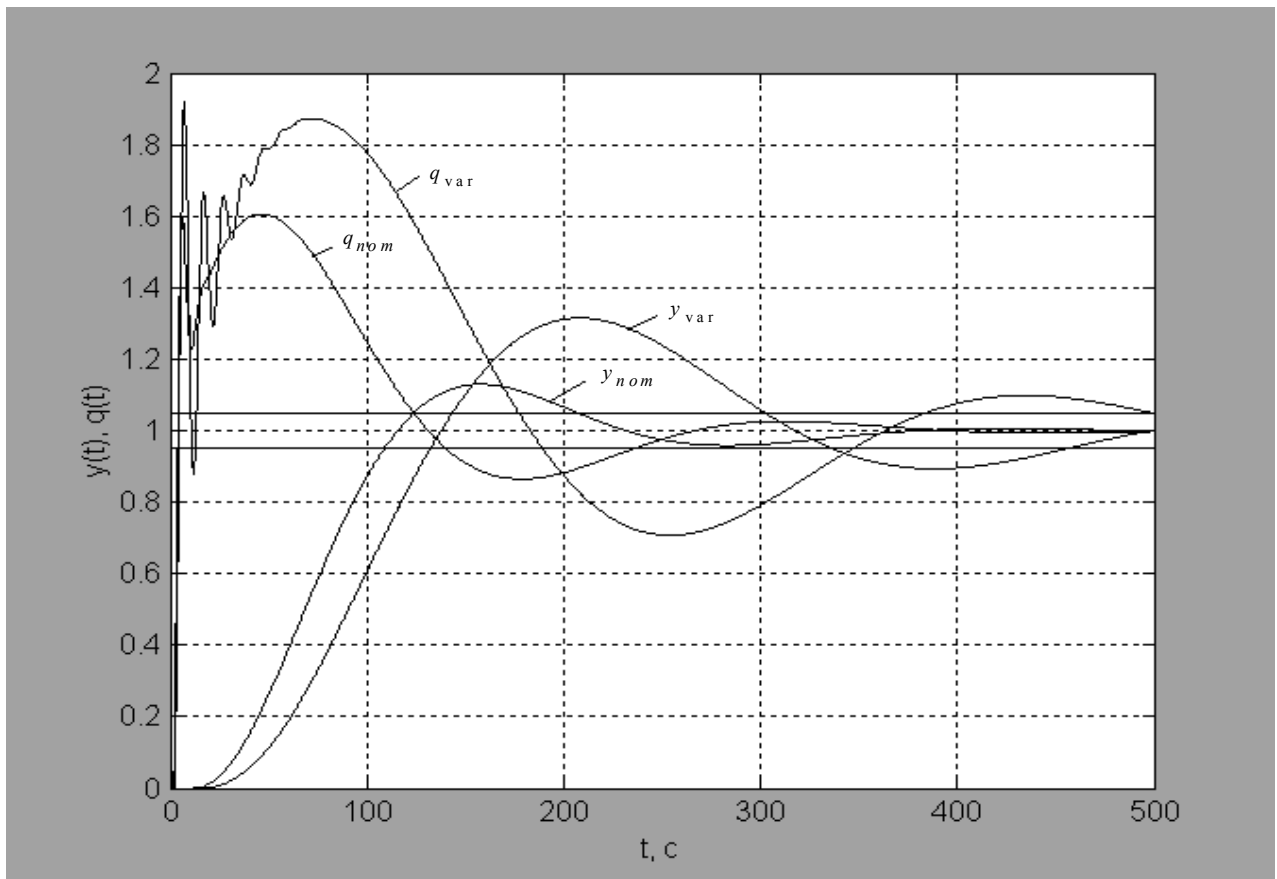


Рис. 6. Перехідні процеси за основною та допоміжною регульованими величинами при зміні завдання g_k (за номінальних параметрів об'єкта та при їх зміні на $\pm 30\%$).

Дані табл. 3, де крім запасів стійкості по модулю та фазі, наведені також значення частотних показників коливності контурів M_c, M_k , показують, що контур КР навіть за значних змін параметрів об'єкта зберігає високий запас стійкості, а в контурі СР погіршення запасу стійкості, хоча й відчутне, але його стійкість не втрачається.

Такий результат досягається, по-перше, завдяки додатковому від'ємному зворотному зв'язку в контурі стабілізації і, по-друге, завдяки вибору параметрів системи, за яких забезпечується оптимальне співвідношення між динамічною точністю та запасом стійкості (методика такого вибору буде нами описана в іншій роботі).

Таблиця 3

Запаси стійкості каскадних АСР ($m_c = 0,7; m_k = 0,5$)

Тип системи	Контур стабілізуючого регулятора			Контур корегуючого регулятора		
	A_{mc}	ϕ_{mc}°	M_c	A_{mk}	ϕ_{mk}°	M_k
ПДс-Пк ном	1,79	29,0	2,04	3,94	54,6	1,10
(Пш-ПД)с-Пк ном	1,88	42,8	1,50	3,75	55,1	1,10
$\Delta_i = \pm 20\%$	1,45	36,2	2,47	3,00	44,3	1,37
$\Delta_i = \pm 30\%$	1,31	32,9	3,39	2,82	40,4	1,50

З позицій теорії зворотного зв'язку та чутливості систем є всі підстави очікувати аналогічні позитивні результати і за реалізації інших структур КАСР з додатковими від'ємними зворотними зв'язками.

Висновки. Наведені результати досліджень підтверджують доцільність та ефективність застосування каскадних систем з додатковими від'ємними зворотними зв'язками з огляду на покращання динамічної точності і, особливо, підвищення їх робастності; при цьому також можна забезпечити істотне зменшення максимального значення регулюючої змінної, що запобігає виникненню нелінійних режимів роботи системи.

Незважаючи на ускладнення структури, розрахунок КАСР з послідовно-паралельним корегуванням в аспекті обчислень не складніший, а інколи навіть простіший, ніж звичайних.

Розширення структурних і алгоритмічних можливостей створює умови для пошуку оптимальних рішень при синтезі КАСР.

1. Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. – М., 1978. 2. Atherton D.P. PID Controller tuning. *COMPUTING & CONTROL ENGINEERING JOURNAL*. Vol. 10, № 2, April 1999, pp. 44-50. 3. Ковела І.М. Автоматичні системи регулювання з цифровими ПД-регуляторами, увімкненими за схемами послідовної та послідовно-паралельної корекції // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" "Теплоенергетика. Інженерія докілья. Автоматизація". – 2002. – № 460. – С. 3–11. 4. Ковела І.М., Рудяк П.В., Іванюк О.О. Параметричний синтез АСР з неперервним та цифровим ПД-алгоритмом регулювання // Збірник наукових праць Національного гірничого університету України. – Дніпропетровськ. – 2004. – № 19, Т. 2. – С. 148–157. 5. Ротач В.Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами. – М., 1985. 6. Ковела І.М. Параметричний синтез неперервних і цифрових автоматичних систем регулювання з ПД- та ПД-регуляторами // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" "Комп'ютерна інженерія та інформаційні технології". – 2002. – № 450. – С. 38–50. 7. Ковела І.М., Іванюк О.О. Синтез цифрових каскадних АСР у просторі параметрів настроювання регуляторів // Вісник Національного університету „Львівська політехніка” „Теплоенергетика. Інженерія докілья. Автоматизація”. – 2004. – №534. – С. 3–16. 8. Микропроцессорные системы автоматического регулирования /Под ред. В.В. Солодовникова. – М., 1991. 9. Шавров А.В. Многокритериальное управление в условиях статистической неопределенности. – М., 1990.

УДК 625.3.001

Е. Жак¹, В. Яцук²

¹ Політехніка любельська, Польща,

² Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра метрології, стандартизації і сертифікації

ДОСЛІДЖЕННЯ АЛГОРИТМІВ МОДЕЛЮВАННЯ В ЛІНІЙНИХ СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ СТАБІЛЬНИМИ ПРОЦЕСАМИ

© Жак Е., Яцук В., 2005

The quality estimation of IMC algorithm control for high delay and large inertia objects are made in this paper. The IMC algorithm control sensitivity is determined as control signal value function. Mathematical model object chose are made also and defined some transfer function parameters provide control quality reduce.

Постановка проблеми. Мікропроцесорні регулятори, які широко почали використовувати у 70–80-х роках минулого століття, зробили можливим реалізовувати різноманітні, інколи дуже