УДК 681.513

В.М. Азарсков, д-р техн. наук
Л.С. Житецький, канд. техн. наук
О.А. Сущенко, канд. техн. наук

ІДЕНТИФІКАЦІЙНИЙ ПІДХІД ДО ЗАДАЧІ АДАПТИВНОЇ СТАБІЛІЗАЦІЇ ДИСКРЕТНОГО ДИНАМІЧНОГО ОБ'ЄКТА ПРИ НЕРЕГУЛЯРНОМУ ЗБУРЕННІ

Інститут електроніки та систем управління НАУ, e-mail: esu@nau.edu.ua

Розглянуто замкнену систему стабілізації дискретного мінімального фазового об'єкта при нерегулярному невимірюваному збуренні, яка містить звичайний ПІД-регулятор і адаптивний регулятор, де використовуються поточні оцінки невідомих параметрів об'єкта. Для зменшення помилки системи введено режим автономної ідентифікації. Сформульовано правило перемикання регуляторів.

Вступ

При побудові систем автоматичного управління об'єктами в умовах апріорної невизначеності, коли параметри об'єкта апріорі невідомі, а, можливо, ще й непередбачено змінюються у часі, перспективним є використання поточної інформації про реакцію об'єкта на управляючі дії для вдосконалення цих дій шляхом адаптації параметрів регулятора до невідомих параметрів об'єкта безпосередньо під час управління [1; 2].

Ідеї і методи теорії адаптивних систем уперше застосовувалися для управління літальними апаратами [1], пізніше – для управління різними технологічними процесами в хімічній, нафтохімічній промисловості, енергетиці та інших галузях промислового виробництва.

В останні десятиліття в теорії адаптивних систем сформувався напрям пов'язаний з аналізом і синтезом адаптивних систем, орієнтованих на функціонування в умовах так званої нестохастичної невизначеності [2], коли вважається відомим тільки те, що неконтрольоване збурення обмежене за рівнем. Найбільш вагомі результати, досягнуті в цьому напряму, наведено в монографіях [1–3]. Згідно з ідентифікаційним підходом, параметри адаптивного регулятора визначаються поточними оцінками невідомих параметрів об'єкта, які уточнюються безпосередньо в процесі управління. На основі цього підходу в праці [4] отримано формальне розв'язання задачі синтезу субоптимальної адаптивної системи стабілізації об'єкта за наявності довільного нерегулярного збурення з обмеженою швидкістю зміни.

На початковому етапі адаптивної ідентифікації, коли поточні оцінки невідомих параметрів дуже відрізняються від їхніх істинних значень, введення в дію адаптивного регулятора може супроводжуватися значними похибками управління, які в деяких практичних задачах зовсім неприпустимі [5].

На перший погляд, у цих випадках можна було б використати метод ідентифікації, запропонований у праці [6] і орієнтований на статистичну обробку даних вимірювань вхідних і вихідних величин об'єкта. Але такий метод вимагає певного часу для збору необхідних даних і потребує відносно складних програмно-алгоритмічних засобів для його реалізації. Крім того, він розрахований на те, що неконтрольоване збурення являє собою стохастичний сигнал. Задачі управління в умовах нерегулярних збурень розглянуто в працях [1–5].

Для запобігання виникнення значних похибок системи на початковому етапі адаптивної ідентифікації, у праці [7] запропоновано поступове підключення адаптивного регулятора. При цьому ефективність управління знижується. Інший шлях, що веде до зменшення похибки системи на початковому етапі адаптації, полягає в переході до автономної адаптивної ідентифікації, яка повинна здійснюватися в умовах, коли функція управління покладається на існуючий регулятор [8; 9].

Метою даної роботи є узагальнення і обґрунтування ідентифікаційного підходу [8; 9].

Постановка задачі

Нехай деякий динамічний об'єкт функціонує в дискретному часі $n = 1,2,...$ і описується скалярним різницевим рівнянням

$$y_n + a_1 y_{n-1} + ... + a_l y_{n-l} = \\ = b_1 u_{n-1} + ... + b_l u_{n-l} + v_n, \qquad (1)$$

де $y_n \in \mathbf{R}$, $u_n \in \mathbf{R}$, $v_n \in \mathbf{R}$ – вихід, управляюча дія і неконтрольоване збурення в n-й дискретний момент часу. Коефіцієнти $a_1,...,a_l, b_1,...,b_l$ рівняння (1) вважаємо сталими величинами, невідомими конструктору системи управління. Відомо тільки, що

$$b_1 \neq 0, \qquad (2)$$

тобто об’єкт не містить суттєвого запізнювання в каналі передачі управляючих дій. Різницевий порядок $l \geq 1$ вважаємо також відомим.

Вводимо припущення, що даний об’єкт мінімально-фазовий, тобто всі корені полінома

$$B(z) = b_1 z^{l-1} + ... + b_l$$

лежать усередині одиничного круга $|z|=1$ на площині комплексної змінної z:

$$B(z) \neq 0 \ \ \forall z: \ 1 \leq |z| < \infty . \qquad (3)$$

При цьому ніяких інших обмежень на параметри об’єкта (1) не накладається. Цей об’єкт може бути як стійким, так і нестійким, оскільки розташування коренів полінома

$$A(z) = z^l + a_1 z^{l-1} + ... + a_l$$

може бути довільним. Більш того, зовсім не потрібно, щоб $A(z)$ і $B(z)$ були взаємно простими поліномами. А це означає, що сам об’єкт не обов’язково повинен задовольняти вимогу управління, згідно з якою наявність спільних коренів цих поліномів виключається [1].

Як і в працях [1; 3–5], ніяких апріорних гіпотез відносно множини належності вектора

$$\boldsymbol{\theta} = [a_1,...,a_l, \ b_1,...,b_l]^{\mathrm{T}} \qquad (4)$$

невідомих параметрів об’єкта не вводимо на відміну від праці [2]. Отже, умови (2), (3) визначають єдині апріорні відомості про компоненти $2l$-вимірного вектора $\boldsymbol{\theta} \in \mathbf{R}^{2l}$, якими повинен володіти конструктор.

Вважається, що вихід y_n об’єкта є доступним для вимірювання в кожний n-й дискретний момент часу. Відносно неконтрольованого збурення v_n припускаємо, як і в праці [4], що воно належить до класу так званих нерегулярних збурень [1], які можуть довільно змінюватись у часі з обмеженою швидкістю. Згідно з цим припущенням вважаємо, що

$$|v_n - v_{n-1}| \ \leq \varepsilon < \infty , \qquad (5)$$

де число ε апріорі відоме конструктору.

У математичному плані вимога (5) формально означає, що $\nabla v_n \in l_\infty$, де l_∞ позначає простір всіх обмежених послідовностей $\{\nabla v_n\} = \nabla v_1, \nabla v_2 ...$ величин $\nabla v_n = v_n - v_{n-1}$ з l_∞-нормою $\| \nabla v \|_\infty = \sup\limits_{n \in [0,\infty)} |\nabla v_n|$.

Отже, припускається можливість довільних змін збурення v протягом поточного n-го інтервалу квантування сигналу y за часом. Вважається лише, що всі такі зміни заздалегідь обмежені за модулем. Зазначимо, що в багатьох прикладних задачах, зокрема, в задачах управління неперервними технологічними процесами [8] введена гіпотеза про властивість збурення v більш адекватно відобразить природу реальних явищ, які можуть відбуватися з об’єктом при дії на нього зовнішніх збурюючих факторів.

Уявимо далі, що в розпорядженні конструктора є типовий дискретний ПІД-регулятор, здатний стабілізувати вихід y_n об’єкта на заданому рівні $y^*(y^* \equiv \mathrm{const})$ з певною точністю E^0 у формі граничного співвідношення

$$\overline{\lim_{n \to \infty}} \, |y^0 - y_n| \ \leq \ E^0 . \qquad (6)$$

У співвідношенні (6) $E^0 > E_{\min}$, де $E_{\min} = \inf\limits_{\{u_n\} \in U} \sup\limits_{n \in [0,\infty)} |e_n|$ – точна нижня грань максимально можливої похибки стабілізації

$$e_n \overset{\Delta}{=} y^0 - y_n \qquad (7)$$

на множині U всіх можливих послідовностей $\{u_n\}$ управляючих дій, які можуть бути фізично реалізовані. Отже, існує принципова можливість забезпечення деякої асимптотичної точності E^0 стабілізації виходу y_n об’єкта (при $n \to \infty$), якщо формувати управляючі дії за схемою

$$u_n = u_n^0 , \qquad (8)$$

де

$$u_n^0 = k_\Pi e_n + k_\mathrm{I} \sum_{i=0}^{n} e_i$$

визначає дискретний ПІД-закон управління з деякими сталими коефіцієнтами k_Π, k_I, який зручно записати у різницевій формі

$$u_n^0 = u_{n-1} + k_1 e_n + k_2 e_{n-1} , \qquad (9)$$

де $k_1 = k_\Pi + k_\mathrm{I}$; $k_2 = -k_\Pi$.

Якщо тепер ввести функціонал

$$J \overset{\Delta}{=} \overline{\lim_{n \to \infty}} \, |y^0 - y_n| ,$$

що визначає показник якості функціонування системи стабілізації об’єкта в асимптотиці при нестохастичному збуренні v_n [1, 3, 4], то доцільно поставити задачу, що може бути сформульована наступним чином. В умовах введених припущень відносно параметрів об’єкта і характерристики збурення та при наявності ПІД-регулятора, який реалізує закон управління (9), треба побудувати адаптивну систему стабілізації, здатну забезпечити виконання вимоги

$$J \leq \varepsilon^0 . \qquad (10)$$

У співвідношенні (10) ε^0 – число, як завгодно близьке до числа $E_{\min}$, що згідно з працею [4] дорівнює

$$E_{\min} = \varepsilon \tag{11}$$

і задовольняє умову $\varepsilon < \varepsilon_0 < E$. Крім цього, вимагається, щоб на етапі адаптації регулятора похибка системи e_n за абсолютним значенням була по можливості невеликою (це суттєвий момент).

Алгоритм адаптивної ідентифікації

Враховуючи вираз (4) вектора параметрів $\boldsymbol{\theta}$ і вводячи вектор фазових змінних

$\varphi_{n-\mathbf{1}} = [-y_{n-1},..., -y_{n-l}, u_{n-1},...,u_{n-l}]^{\mathrm{T}}$,

доступних для вимірювання, представимо рівняння об'єкта (1) у регресійній формі

$$y_n = \boldsymbol{\theta}^{\mathrm{T}}\varphi_{n-1} + v_n\,. \tag{12}$$

Якщо тепер почленно відняти рівняння (12) записані для дискретних моментів часу n та $n-1$, то отримаємо

$$y_n = y_{n-1} + \boldsymbol{\theta}^{\mathrm{T}}\nabla\varphi_{n-1} + \nabla v_n\,, \tag{13}$$

де $\nabla\varphi_{n-1} \overset{\Delta}{=} \varphi_n - \varphi_{n-1}$.

Згідно з формулою (13) рівняння

$$\hat{y}_n = y_{n-1} + \hat{\boldsymbol{\theta}}^{\mathrm{T}}\nabla\varphi_{n-1} \tag{14}$$

доречно розглядати як рівняння моделі об'єкта, в якому $\hat{y}_n$ позначає вихід цієї моделі в n-й момент часу, а $\hat{\boldsymbol{\theta}} = [\hat{a}_1,...,\hat{a}_l,\ \hat{b}_1,...,\hat{b}_l]^{\mathrm{T}}$ – вектор деяких оцінок складових невідомого $\boldsymbol{\theta}$.

Порівняння виразів (13) і (14) показує, що величина

$$\tilde{e}_n = y_n - \hat{y}_n \tag{15}$$

виступає як похибка моделі (похибка ідентифікації), що з'являється внаслідок наявності неконтрольованого збурення v_n і того, що в умовах апріорної невизначеності $\hat{\boldsymbol{\theta}} \neq \boldsymbol{\theta}$.

Нехай $\boldsymbol{\theta}_n = [a_1^{(n)},...,a_l^{(n)}, b_1^{(n)},...,b_l^{(n)}]^{\mathrm{T}}$ позначає вектор поточних оцінок $a_1^{(n)},...,a_l^{(n)},\ b_1^{(n)},...,b_l^{(n)}$ невідомих параметрів об'єкта, які повинні уточнюватися на кожному n-му кроці на основі поточної інформації про управляючі дії $u_{n-1},\ u_{n-2},...$ і реакції об'єкта $y_n, y_{n-1},...$ на ці дії. Тоді, поклавши $\hat{\boldsymbol{\theta}} = \boldsymbol{\theta}_{n-1}$, рівняння (14) моделі з параметрами, що підстроюються, можна записати так:

$$\hat{y}_n = y_{n-1} + \hat{\boldsymbol{\theta}}_{n-1}^{\mathrm{T}}\nabla\varphi_{n-1}\,. \tag{16}$$

Згідно з працею [4], будемо будувати алгоритм поточної адаптивної ідентифікації параметрів моделі (16) у формі рекурентного співвідношення

$$\boldsymbol{\theta}_n = \boldsymbol{\theta}_{n-1} - \gamma_n f(\tilde{e}_n, \varepsilon, \varepsilon^0)\frac{\nabla\varphi_{n-1}}{\|\nabla\varphi_{n-1}\|^2}\,. \tag{17}$$

де γ_n – коефіцієнт, який довільно вибирається в діапазоні

$$0 < \gamma' \le \gamma_n \le \gamma'' < 2 \tag{18}$$

таким чином, щоб виконати вимогу

$$b_1^{(n)} \neq 0\,; \tag{19}$$

$f\left(\tilde{e}_n,\ \varepsilon, \varepsilon^0\right)$ – функція нечутливості з порогом, що визначається числом ε^0:

$$f(\tilde{e}_n, \varepsilon, \varepsilon^0) = \begin{cases} \tilde{e}_n - \varepsilon, \text{ якщо } \tilde{e} > \varepsilon^0, \\ \tilde{e}_n + \varepsilon, \text{ якщо } \tilde{e} < -\varepsilon^0, \\ 0 \text{ у решті випадків} \end{cases} \tag{20}$$

$\|\nabla\varphi_{n-1}\|^2 = \sum_{i=1}^{k}(\nabla y_{n-i})^2 + \sum_{i=1}^{l}(\nabla u_{n-1})^2$ – квадрат евклідової норми вектора

$\nabla\varphi_{n-1} = [\nabla y_{n-1},...,\nabla y_{n-l},\ \nabla u_{n-1},...,\nabla u_{n-l}]^{\mathrm{T}}$

з складовими

$\nabla y_{n-i} = y_{n-i} - y_{n-i-1}$,

$\nabla u_{n-i} = u_{n-i} - u_{n-i-1}$ $(i = 1,...,l)$.

З розгляду виразу (20) з урахуванням алгоритму (17), видно, що корекція вектора $\boldsymbol{\theta}_{n-1}$, який був знайдений на попередньому $(n-1)$-му кроці і від якого залежить згідно з рівнянням (16) вихідна величина моделі, відбувається лише тоді, коли поточна похибка ідентифікації $\tilde{e}_n$ за модулем перевищить поріг $\varepsilon^0 > \varepsilon$: $|\tilde{e}_n| > \varepsilon$. У протилежному випадку, тобто коли $|\tilde{e}_n| \le \varepsilon$, цей вектор залишається незмінним: $\boldsymbol{\theta}_n = \boldsymbol{\theta}_{n-1}$.

З праці [4] випливає, що асимптотичну субоптимальність системи управління об'єктом (1) при наявності обмеження (5) у формі граничного співвідношення (10) при будь-якому значенні показника $\rho = \varepsilon/\varepsilon^0 < 1$ субоптимальності можна досягти, якщо формувати управляючі дії за законом

$$u_n^{(a)} = u_{n-1} + \frac{1}{b_1^n}[(1 - a_1^{(n)})e_n + a_1^{(n)}e_{n-1} + ...$$

$$... + a_l^{(n)}e_{n-l} - b_l^{(n)}\nabla u_{n-1} - ... - b_l^{(n)}\nabla u_{n-l+1}]\,. \tag{21}$$

де $u_n^{(a)}$ – вихідний сигнал адаптивного регулятора інтегральної дії.

Для реалізації закону (21) використовують поточні оцінки, що генеруються алгоритмом (17).

Співвідношення (17), (21) разом з рівняннями (15), (16), (20) і умовою (18), що забезпечує виконання вимоги (19), визначають адаптивний регулятор повністю. При цьому вимога (19) гарантує невироджуваність закону управління (21).

Оскільки в умовах, коли вектор $\boldsymbol{\theta}_n$ поточних оцінок невідомих параметрів $a_1,...,a_l$, $b_1,...,b_l$ залишається далеким від вектора $\boldsymbol{\theta}$, введення в дію адаптивного регулятора (21), (17) на початковому етапі управління об'єктом (1) може призвести до значних похибок e_n, то доцільно на цьому етапі функцію управління об'єктом передати звичайному ПІД-регулятору, який реалізує закон (9) і забезпечує виконання співвідношення (6). Одночасно пропонується ввести режим автономної ідентифікації моделі (14). У цьому режимі корекція вектора $\boldsymbol{\theta}_{n-1}$ параметрів моделі за алгоритмом (17) повинна здійснюватися на основі поточної інформації про управляючі дії u_n, що формуються ПІД-регулятором (9) та реакцією y_n об'єкта на ці дії в замкненій системі.

Ураховуючи той факт, що сам алгоритм (17) ідентифікації належить до класу скінченнозбіжних алгоритмів [1; 4], рекомендується перехід на адаптивне управління, якщо протягом певного числа $N (N >> 1)$ інтервалів квантування сигналів за часом похибка ідентифікації $\tilde{e}_n$ за модулем не перевершує поріг ε^0, тобто якщо згідно з виразами (17), (20) жодної корекції вектора $\boldsymbol{\theta}_{n-1}$ не відбулося. Але такий прийом зовсім не гарантує, що після підключення адаптивного регулятора з виразами (17), (21) абсолютна величина похибки e_n стабілізації буде тепер вже залишатися відносно невеликою. Тому треба передбачити можливість повторного підключення ПІД-регулятора за умови, що в режимі адаптивного управління сталася прикра подія, а саме, виявилося, що в n-й момент часу під дією адаптивного регулятора похибка e_n перевищила певний рівень:

$$|e_n| > kE , \tag{22}$$

де $k \geq 1$ – деякий коефіцієнт.

Число k в умові (22), як і число N, визначає конструктор системи.

Для формалізації алгоритму переключення регуляторів введемо характеристичну функцію

$$\chi_n \overset{\Delta}{=} \begin{cases} 1, \text{ якщо } \quad \chi_{n-1} = 0, \ N_t = N, \\ 0, \text{ якщо } \ i \quad \chi_{n-1} = 1, \quad |e_n| > E \\ \chi_{n-1} \quad \text{у решті випадків,} \end{cases} \tag{23}$$

де N_n – поточне число кроків (інтервалів квантування сигналів за часом) після останньої корекції вектора $\boldsymbol{\theta}_{n-1}$;

$$E = kE^0 . \tag{24}$$

Взявши до уваги визначення (23) функції χ_n і вираз (24), запишемо алгоритм, що формально описує правило переходу від одного регулятора до іншого:

$$u_n = \begin{cases} u_n^0, & \text{якщо} \quad \chi_n = 0, \\ u_n^{(a)}, & \text{якщо} \quad \chi_n = 1, \end{cases} \tag{25}$$

де обов'язковою початковою умовою є

$$\chi_0 = 0 . \tag{26}$$

Співвідношення (23–26) і рівняння (8), ПІД-регулятора і (21) адаптивного регулятора визначають закон управління об'єктом (1).

Структурна схема самої замкненої адаптивної системи стабілізації, в якій реалізується запропонований метод поточної ідентифікації об'єкта, зображена на рис. 1.

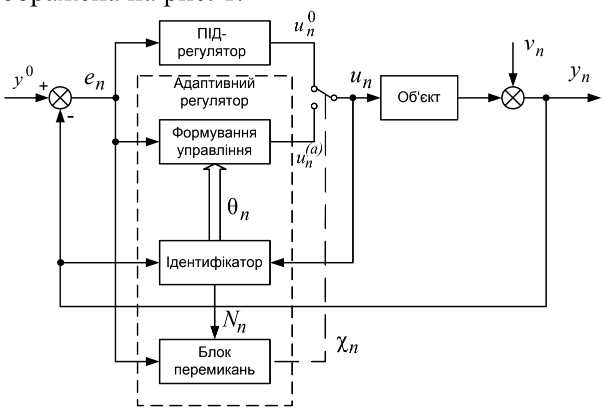


Рис. 1. Структурна схема замкненої адаптивної системи стабілізації

Асимптотичні властивості замкненої системи

Згідно з умовою (26) і правилом (25) перемикання регуляторів на початку роботи системи функція управління передається ПІД-регулятору (9), який забезпечує відповідно до граничного співвідношення (6) обмеженість за модулем похибки e_n (7): $|e_n| < E^0$ для всіх досить великих n. Звідси $|y_n - y_{n-1}| \leq 2E^0$ для всіх досить великих n. Оскільки ж об'єкт мінімально-фазовий, то за умови обмеженості (5) згідно з рівнянням (13) змінна ∇u_n буде залишатися обмеженою принаймні доти, доки $\chi_n = 0$. Отже, умова (5) гарантує обмеженість вектора $\nabla\varphi_n : \|\nabla\varphi_n\| < \infty$ при $\chi_n = 0$. Тому процес корекції вектора $\boldsymbol{\theta}_{n-1}$ за алгоритмом (17) обов'язково завершиться за скінченне число кроків. А це означає, що неодмінно настане момент, коли $N_t = N$. У цьому разі згідно з виразом (23) характеристична функція χ_n набуває значення $\chi_n = 1$, і відповідно до правила (25) вступить у дію адаптивний регулятор. Адаптивний регулятор може тепер бути відключеним від об'єкта, якщо тільки похибка стабілізації e_n перевищить за модулем число E (див. вирази (25), (23)).

У праці [4] показано, що коли ідентифікація відбувається одночасно з управлінням за законом (21), то в кожний n-й момент часу похибка стабілізації e_n (7) збігається з похибкою ідентифікації $\tilde{e}_n$ (15) з точністю до знаку: $e_n = -\tilde{e}_n$. Це означає, що умовою повторного переходу до ПІД-регулятора є порушення нерівності $|\tilde{e}_n| \le E$. Оскільки $k > 1$, $E^0 > E_{\min}$, а $\varepsilon^0 < E$, то з урахуванням (11) маємо $E > \varepsilon^0$. Звідси видно, що подія $|\tilde{e}_n| > E$ вказує на порушення нерів-ності $|\tilde{e}_n| \le \varepsilon^0$. Тому кожного разу, коли $|\tilde{e}_n| > \varepsilon^0$, згідно з виразами (17), (20) неодмінно відбувається корекція вектора $\boldsymbol{\theta}_{n-1}$. Але в умовах поставленої задачі число моментів настання події $|\tilde{e}_n| > E$ не може бути нескінченним. Таким чином, число перемикань регуляторів скінченне: неодмінно настане такий момент часу N^*, що $\chi_n = 1$ для всіх $n \ge N^*$. Отже, після чергового підключення адаптивного регулятора останній більш не буде відключатися. А це врешті-решт і забезпечує виконання вимоги (10) асимптотичної субоптимальності замкненої системи при будь-якому значенні показника $\rho = \varepsilon / \varepsilon^0 < 1$ [4].

Модельний експеримент

Для перевірки працездатності та ілюстрації особливостей запропонованого методу адаптивної стабілізації проводилося моделювання описаної замкненої системи при таких вихідних даних: $l = 2$; $a_1 = 1{,}2$; $a_2 = 0{,}5$; $b_1 = 5{,}0$; $b_2 = 2{,}0$; $y^0 = 10{,}0$; $\varepsilon^0 = 1{,}001$; $E = 20{,}0$; $N = 100$. Тривалість експерименту становила 2000 тактів. Послідовність $\{v_n\}$ збурень моделювалась як нестаціонарний випадковий процес авторегресії у формі

$$v_n = v_{n-1} + \xi_n ,$$

де $\{\xi_n\}$ – послідовність незалежних псевдовипадкових величин, рівномірно розподілених в інтервалі $[-1{,}0; 1{,}0]$.

Початкові значення параметрів моделі (16) і параметрів ПІД-регулятора були вибрані такі: $a_1^{(0)} = 5{,}0$; $a_2^{(0)} = 0$; $b_1^{(0)} = 0{,}005$; $b_1^{(0)} = 0{,}001$; $k_1 = 0{,}07$; $k_2 = 0{,}01$.

Результати модельного експерименту показано на рис. 2–5. Як показав цей експеримент, складові вектора $\boldsymbol{\theta}_n$ відносно швидко досягають деякого околу відповідних складових невідомого $\boldsymbol{\theta}$: (рис. 3, *а*).

Перше підключення адаптивного регулятора відбулося лише на 467-му кроці (рис. 4). Таке підключення супроводжувалося певним виплеском похибки e_n (рис. 5), що призвело до повторного вводу в дію ПІД-регулятора (рис. 4). Остаточне підключення адаптивного регулятора настало на 792-му кроці (рис. 4).

Як видно з рис. 5, адаптивний регулятор здатний забезпечити бажану точність стабілізації виходу y_n об'єкта для всіх досить великих n_0. Таку якість управління вдається досягти в умовах, коли саме збурення v_n змінювалось у досить значних межах: -43,7 $\le v_n \le$ 7,25 (рис. 2).

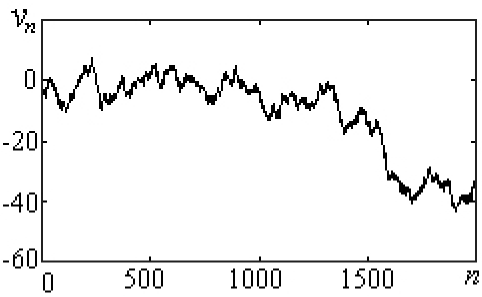
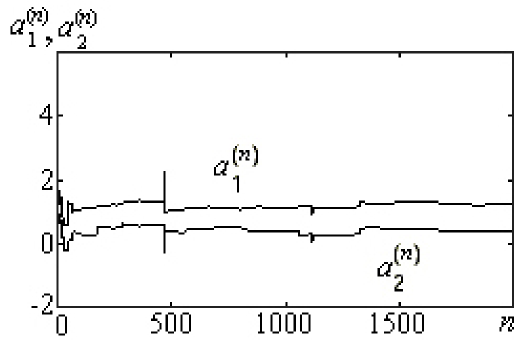
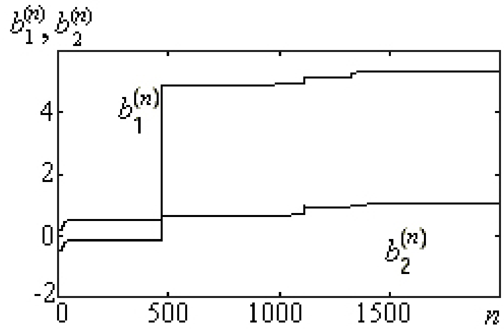


Рис. 2. Неконтрольоване збурення



а



б

Рис. 3. Поточні оцінки:
а – $a_1^{(n)}$, $a_2^{(n)}$; *б* – $b_1^{(n)}$, $b_2^{(n)}$

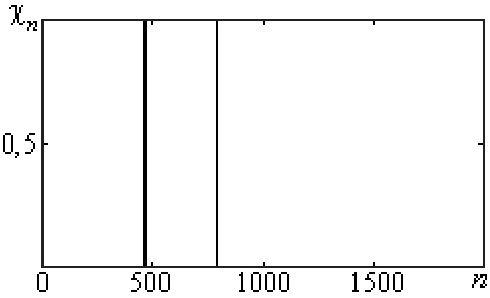


Рис. 4. Характеристична функція

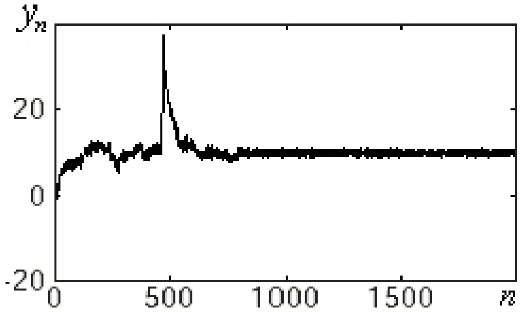


Рис. 5. Вихід об’єкту

Після першого підключення адаптивного регулятора на 467-му кроці, коли $\chi_n = 1$ (рис. 4), спостерігаються помітні “виплески” оцінок $a_1^{(n)}, a_2^{(n)}$ (рис. 3, *а*), $b_1^{(n)}, b_2^{(n)}$ (рис. 3, *б*). Такі явища зумовлені тим, що похибка ідентифікації $\tilde{e}_n$ в цьому режимі дорівнює за модулем похибці стабілізації e_n, яка під дією адаптивного регулятора залишається ще відносно значною.

Висновки

Уведення режиму автономної ідентифікації дозволяє суттєво зменшити похибку стабілізації на початковому етапі адаптації параметрів моделі, коли поточні оцінки невідомих параметрів об’єкта ще значно відрізняються від їхніх дійсних значень.

Список літератури

1. *Фомин В.Н*., *Фрадков, А.Л., Якубович В.А.* Адаптивное управление динамическими объектами.– М.: Наука, 1981. – 448 с.

2. *Кунцевич В.М*., *Лычак М.М.* Синтез оптимальных и адаптивных систем управления: Игровой подход. – К.: Наук. думка, 1985. – 248 с.

3. *Landau I.D., Lozano R*., *M'Saad M.* Adaptive control. – London: Springer, 1997. – 562 p.

4. *Житецкий Л.С.* Развитие метода рекуррентных конечно-сходящихся алгоритмов для решения задачи адаптивной стабилизации линейного дискретного динамического объекта //Кибернетика и вичислительная техника. – 1983. – Вып. 60. – С. 17–22.

5. *Ydstie B.E.* Transient performance and robustness of direct adaptive control //IEEE Trans. Automat. Contr. – 1992. –37, 8. – P. 1093–1105.

6. *Блохин Л.Н.* Оптимальные системы стабилизации. – К.: Техніка, 1982. – 144 с.

7. *Основы* управления технологическими процессами / Под ред. Н.С. Райбмана. – М.: Наука, 1978. – 440 с.

8. *Skurikhin V.I*., *Zhiteckij L.S., Procenko N.M.* Method of careful adaptive process control – experiences on glass tube manufacturing process // Proc. of the IFAC Workshop “Evaluation of adaptive control strategies in industrial applications. (Tbilisi, USSR, 17–20 Oct., 1989). – Pergamon Press. – 1990. – P. 321–326.

9.*Zhiteckij L.S*., *Skurikhin V.I, Procenko N.M., Sapunova N.A.* Adaptive robust and careful control applied to steam temperature regulation of a thermal power plant // Proc. of the 13th IFAC World Congress (San Francisco, USA, 30th June – 5th July, 1996). – 1996. – Vol. O. – P. 115–120с.

Стаття надійшла до редакції 02.02.04.

В.Н. Азарсков, Л.С. Житецкий, О.А. Сущенко

Идентификационный подход к задаче адаптивной стабилизации дискретного динамического объекта при нерегулярном возмущении

Рассмотрена замкнутая система стабилизации дискретного минимального фазового объекта при нерегулярном неизмеряемом возмущении, содержащая обычный ПИД-регулятор и адаптивный регулятор, в котором используются текущие оценки неизвестных параметров объекта. Для уменьшения ошибки системы введен режим автономной идентификации. Сформулировано правило переключения регуляторов.

V.M. Azarskov, L.S. Zhiteckij, O.A. Sushchenko

An identification approach to the problem of discrete-time dynamical plant under irregular disturbance

The closed-loop system for the stabilization of discrete-time minimum phase plant under irregular unmeasurable disturbance is designed. It contains an usual PID controller and adaptive controller using the current estimates of unknown plant parameters. To decrease the stabilization error during at initial adaptation stage, the autonomous identification regime is introduced. The rule of controllers switching is formulated.