УДК 62-503.57

А.С.Луцик
Луцький національний технічний університет

СИСТЕМИ З АДАПТИВНИМ УПРАВЛІННЯМ

Проведений аналіз адаптивних систем керування та проблем, що виникають при проектуванні, реалізації і використанні нелінійних систем з адаптивним управлінням

Проблема моделювання керованої системи. Для багатьох практичних систем можна обмежитися лінійними моделями, оскільки вони описують поведінку реальної системи досить точно. У зв'язку з тим, що керовані системи стають усе більш складними і підвищуються вимоги щодо точності керуючих систем, і в той же час збільшуються можливості розрахунку, виникла необхідність і можливість використовувати нелінійні, але в той же час емпіричні моделі. Варто на перше місце поставити можливість ефективного використання емпіричних моделей з використанням штучних нейронних мереж, які допомагають компенсувати зростання складності моделей. Використання нечіткої логіки і методів, заснованих на нейронних мережах, дають інженерові нові можливості, хоча і створює нові проблеми: при використанні самонавчальних алгоритмів інколи складно визначити, який час необхідний для самонавчання та коли емпірична модель опише поведінку системи з необхідною точністю.

Адаптивна система – це система, яка крім основного зворотного зв'язку містить принаймні один інформаційний зворотний зв'язок для налаштування параметрів регулятора у разі зміни параметрів керованої системи (рис. 1). Адаптивний регулятор, за допомогою якого реалізується алгоритм адаптивного управління, складається з власне регулятора і функціональних блоків, що реалізують адаптивний алгоритм.

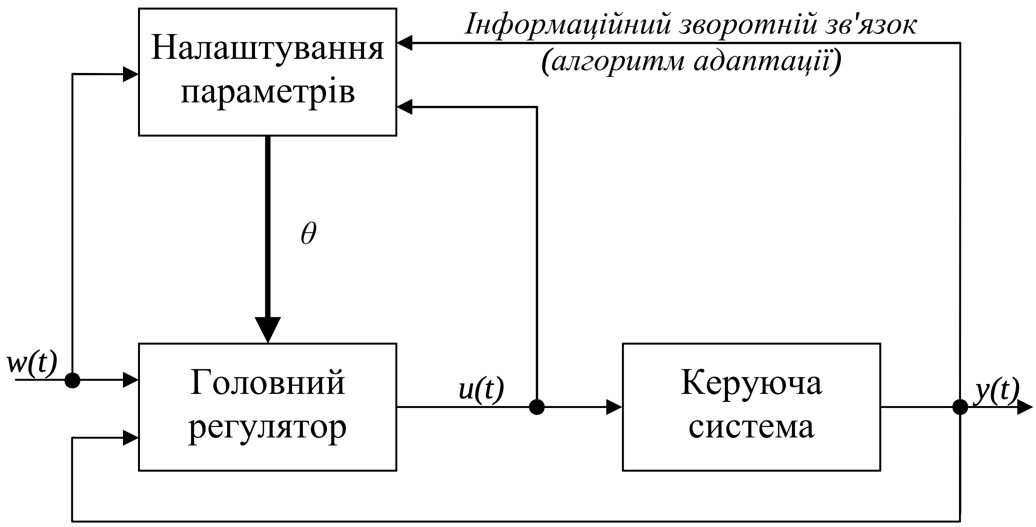

Рис. 1. Структурна схема адаптивної системи

Властивості адаптивних систем:

1) Вихідні параметри об'єкту регулювання і характеристики збурюючих чинників знаходяться під постійним контролем і управлінням за допомогою пристроїв, що додатково включаються до складу керуючих систем.

2) Спостережувана поведінка об'єкту описується деяким показником якості, що оцінює в кількісній формі характер протікання процесу управління.

3) Відхилення показника якості за межі допуску спричиняє за собою автоматичне налаштування параметрів регулятора або заміну алгоритму управління, результатом яких є досягнення бажаного показника якості або реалізації поставленої мети.

При класифікації адаптивних систем з точки зору теорії виходять з використовуваної схеми адаптивного управління. Розрізняють пряму і непряму схеми адаптивного управління, залежно від того, чи працює адаптивний алгоритм на основі моделі керованої системи чи ні.

Пряме адаптивне управління. Адаптивний алгоритм регулятора не містить моделі керованої системи, при цьому параметри регулятора оцінюються безпосередньо.

Непряме адаптивне управління. Адаптивний алгоритм регулятора базується на моделі керованої системи, виходячи з якої обчислюються налаштування регулятора.

З точки зору практики розглядаються:

- адаптивні системи з еталонною моделлю (рис. 2). Такі системи працюють за принципом прямого адаптивного управління.

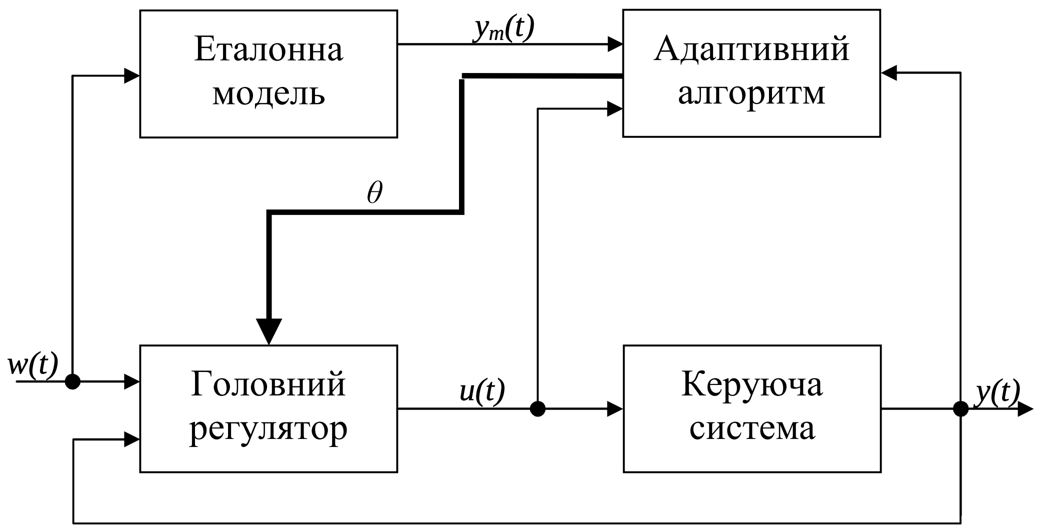

Рис. 2. Структурна схема адаптивної системи з еталонною моделлю

- адаптивні системи з ідентифікацією (рис. 3). Адаптивні системи з ідентифікацією відповідають непрямому адаптивному управлінню. В принципі можлива реалізація системи з ідентифікацією і на основі схеми прямого управління.

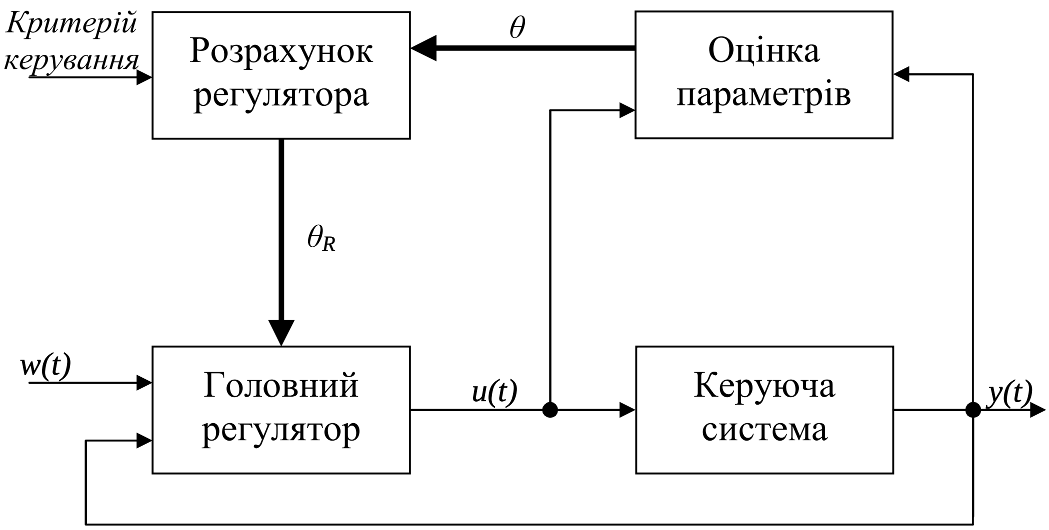

Рис. 3. Структурна схема адаптивної системи з ідентифікацією

Стабільність по Ляпунову. Другий метод Ляпунова. Нехай аналізована нелінійна система задана у вигляді:

$$\dot{x}_i(t) = f_i\left[x_1(t), x_2(t), \ldots, x_n(t), t\right], i = 1, 2, \ldots, n$$

або в еквівалентному векторно-диференціальному вигляді:

$$\dot{x}(t) = f\left[x(t), t\right],$$

Визначення 1. Рівноважний стан $x=0$ нелінійної системи

$$\dot{x}(t) = f\left[x(t), t\right]$$

є стабільним за Ляпуновим, якщо для будь-якого $e > 0$ і $t_0 > 0$ знайдеться таке число $d(e, t_o) > 0$, що якщо $|x_0| < d$, то $|x(t; x_0; t_0)| < e$ при $t \geq t_0$.

Визначення 2. Рівноважний стан $x=0$ нелінійної системи

$$\dot{x}(t)=f\left[x(t),t\right]$$

є стабільним за Ляпуновим, якщо для певних $r>0$ і будь-якого h та при $t_0>0$ знайдеться такий інтервал часу $T(n,x_o,t_o)>0$, що якщо $|x_0|<r$, то $|x(t;x_0;t_0)|<h$ при $t\geq t_0+T$.

Визначення 3. Рівноважний стан $x=0$ нелінійної системи

$$\dot{x}(t)=f\left[x(t),t\right]$$

є стабільним за Ляпуновим, якщо $x=0$ стабільно за Ляпуновим і виконується умова $\lim\limits_{t\to\infty}\|x(t,t_0,x_0)\|=0$ для будь-якого x з початковим значенням x_0, що лежитьу досить малій околиці нуля

Другий методя Ляпунова дозволяє визначити, чи стабільний стан рівноваги нелінійної системи

$$\dot{x}(t)=f\left[x(t),t\right],$$

не знаходячи відповідного системі рішення рівняння.

Метод заснований на побудові скалярної функції з відомими властивостями *V(x, t)* і подальшому аналізі похідної за часом *V(x, t)* в рішеннях системи.

Теорема 1. Стан рівноваги нелінійної неавтономної системи

$$\dot{x}(t)=f\left[x(t),t\right]$$

рівномірно стабільно асимптотично у відношенні великого за величиною сигналу, якщо існує така скалярна функція *V(x, t)* з безперервними частинними похідними від *x* і *t*, що *V(0, t) = 0* і виконані наступні умови:

- *V(x, t)* задана позитивно, тобто існує така неперервна неспадаюча скалярна функція *a*, що *a(0) = 0* і *V(x, t)> a(|x|)> 0* для усіх *t* і $x\neq 0$;
- *V(x, t)* усічена зверху, тобто існує така неперервна неспадаюча скалярна функція *b*, що *b(0) = 0* і *V(x, i)< b(|x|)* для будь-яких *t*;
- *V(x, t)* задана негативно;
- *V(x, t)* радіально необмежена функція, тобто *a*|*x*| → ∞, якщо |*x*| → ∞.

Теорема 2. Стан рівноваги нелінійної автономної системи

$$x(t)\quad f\left[x(t)\right],\ f\left[0\right]\quad 0$$

рівномірно асимптотично стабільний (у разі великої величини сигналу) тоді, коли існує така скалярна функція *V(x)* з частинними похідними по *x* і *t*, що *V(0) = 0* і виконані наступні умови:

- *V(x)> 0*, якщо $x\neq 0$, тобто позитивно задана;
- *V (x)< 0*, якщо $x\neq 0$, тобто негативно задана;
- *V(x)> 0*, якщо |*x*| → ∞.

Теорема 3. Стан рівноваги *x = 0* лінійної стаціонарної системи

$$x(t)=Ax(t)$$

асимптотично стабільний тоді, коли для кожної позитивно заданої симетричної матриці Q існує позитивно задана матриця P, яка є одним з рішень рівняння:

$$AP + PA = - Q$$

Скористаємося другим методом Ляпунова. Виходячи з цього методу, якщо вдається знайти таку функцію Ляпунова *V(x, t)*, що

V(x, t)>0, якщо $x\neq 0$;

V(x, t)<0, якщо $x\neq 0$;

V{x, t} → ∞, якщо |*x*| → ∞*;*

V{x, t} = 0, якщо *x = 0*,

тоді стани рівноваги *x = 0* є асимптотично стабільним. Якщо функція *V(x, t)* задана негативно частково, то стан рівноваги *x = 0* тільки стабільний.

Етапи синтезу:

1) Вибір типу головного регулятора і структури
2) Скласти рівняння помилки у вигляді:

$$\dot{e}(t)=f_e\left[e(t)\right]+g_e\left[p(t)\right]$$

3) Скласти функцію Ляпунова:

$$V(e,p)=f_e\left[e(t)\right]+g_e\left[p(t)\right]$$

4) Вичислити похідну від функції Ляпунова *V(e, p)* за часом по траєкторії з рівняння

помилки:

$$\dot{V}(e,p)=\dot{f}_e\left[e(t)\right]+\dot{g}_e\left[p(t),\dot{p}(t)\right]$$

і проаналізувати отриманий результат. За допомогою виразу $\dot{g}\left[p(t),\dot{p}(t)\right]=0$ знаходять алгоритми налаштування параметрів регулятора.

5) Формування алгоритмів налаштування адаптивного регулятора, а при необхідності також модифікація. Алгоритми налаштування мають вигляд:

$$\dot{p}(t)=\ \ Ge(t)s^{T}(t)$$

Припустимо, що скалярна система першого порядку, що ідентифікується, задана рівнянням стану

$$\dot{x}(t)=ax(t)+bu(t),$$

де параметри *a* і *b* постійні, але не відомі. Нехай система асимптотично стабільна *a < 0* і скалярний вхід *u(t)* і стан *x(t)* (співпадає з виходом) – усічені сигнали.

Для оцінки параметрів системи скористаємося наступним виразом:

$$\dot{\hat{x}}(t)a_m\hat{x}(t)+\left[\hat{a}(t)-a_m\right]x(t)+\hat{b}(t)u(t),\ a_m<0$$

Завданням є налаштування параметрів $\hat{a}(t)$ і $\hat{b}(t)$ так, щоб:

$$\lim_{t\to\infty}\hat{a}(t)=a,$$

$$\lim_{t\to\infty}\hat{b}(t)=b$$

Складемо також функцію помилки *e(t).* Далі потрібно скласти функцію Ляпунова для знаходження параметрів алгоритму налаштування. Вона має вигляд:

$$V(e,a,b)=\frac{1}{2}\left[e^2(t)+\tilde{a}^2(t)+\tilde{b}^2(t)\right]$$

Після чого вимагається знайти похідну цієї функції, і вивести шукані параметри.

Нижче приведена структурна схема системи ідентифікації адаптивної системи. Поведінка схеми описується рівняннями:

$$\dot{e}(t)=a_m e(t)+\tilde{a}(t)x(t)+\tilde{b}(t)u(t),$$

$$\dot{\tilde{a}}(t)=-e(t)x(t),$$

$$\dot{\tilde{b}}(t)=-e(t)u(t).$$

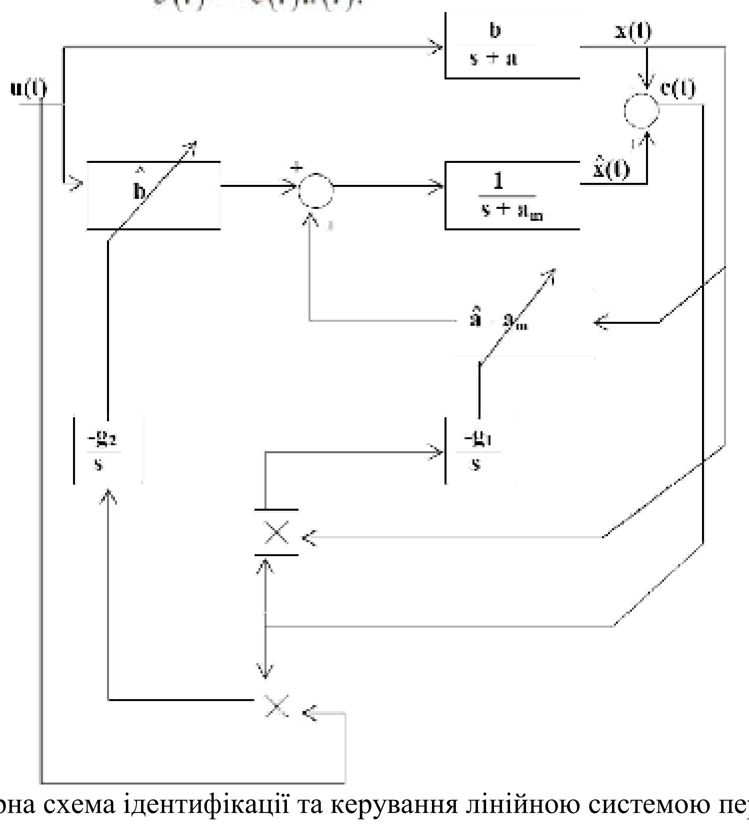

Рис. 4. Структурна схема ідентифікації та керування лінійною системою першого порядку

Припустимо, що скалярна система першого порядку, що ідентифікується, задана рівнянням:

$$\dot{x}(t)=ax(t)+bu(t),$$

де параметри *a* і *b* постійні, але не відомі.

Еталонна модель задана так:

$$\dot{x}_m(t)=a_m x_m(t)+b_m w(t),\ a_m<0$$

Враховуючи, що практичне значення мають тільки системи із зворотним зв'язком, а параметри керованої системи невідомі виберемо рівняння налаштовуваного регулятора таким чином:

$$u(t)=-k(t)x(t)+k_0(t)w(t)$$

Після виразу стану системи і деяких перетворень випишемо функцію помилки:

$$\dot{e}(t)=a_m e(t)-b\tilde{k}(t)x(t)+b\tilde{k}_0(t)w(t)$$

Далі розглянемо два досить важливих часткових випадків.

1) Параметр *b* відомий. Тоді адаптивну систему можна реалізувати, виходячи зрівняння:

$$\dot{k}(t)=be(t)x(t)$$

2) Відомий знак параметра *b*. Тоді для реалізації адаптивної системи слід алгоритми налаштування регулятора представити у вигляді:

$$\dot{k}(t)=-sign(b)e(t)x(t),$$

$$\dot{k}_0(t)=-sign(b)e(t)w(t).$$

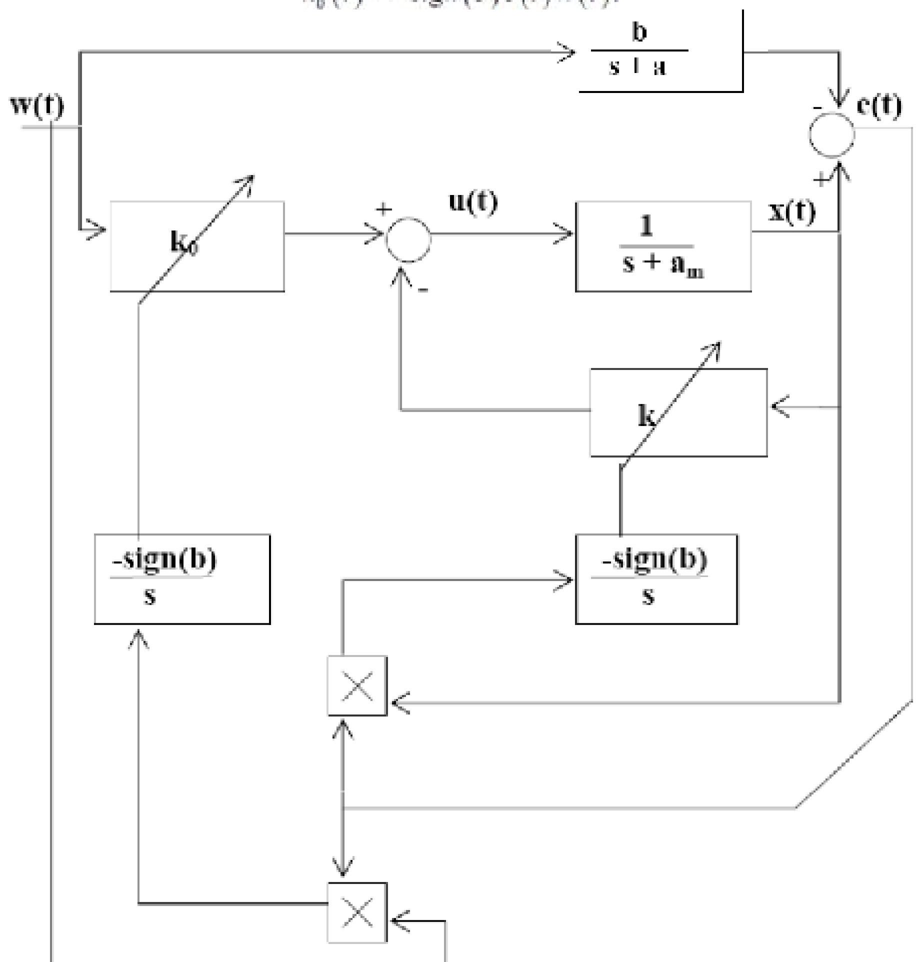

Рис. 5. Структурна схема керування лінійною системою першого порядку

Розглянемо оцінку параметрів динамічної системи в реальному часі на основі адаптивної системи з ідентифікацією. Розглядається дискретна модель скалярної лінійної стаціонарної системи:

$$A(z^{-1})y(k)=z^{-d}B(z^{-1})u(k),$$

де *d* – затримка в дискретних тактах.

Оцінка параметрів полягає в оцінці множників a_i і b_j поліномів $A(z^{-1})$ і $B(z^{-1})$ на основі вимірів *u(k)* і *y(k)*, за умови що порядки поліномів відповідно *n* і *m* затримка *d* відома. При необхідності оцінювати параметри часто застосовується метод найменшого квадрата і його різноманітні модифікації. Для цього необхідно виходити з диференціального виду математичної моделі:

$$y(k)+a_1 y(k-1)+...+a_n y(k-n)=b_1 u(k-d-1)+b_2 u(k-d-2)+...+b_m y(k-d-m)$$

У окремий момент часу k нам відомі значення:

$$u(k-1), u(k-2),...; y(k-1), y(k-2),...$$

Відносно цього і знаючи оцінки множників поліномів $A(z^{-1})$ і $B(z^{-1})$ можна оцінити (спрогнозувати) вихід $\hat{y}(k \mid k-1)$. Після чого потрібно отримати вираз для оцінки помилки, матрицю, що містить дані, вектор параметрів Θ, вектор виходів, що містить дані вимірів і вектор помилок.

Для оцінки параметрів в реальному часі відповідно до методу найменших квадратів використовується наступне рівняння (використовується рекурентна схема обчислень):

$$\hat{\Theta}(k)=\hat{\Theta}(k-1)+K(k)\left[y(k)-\varphi(k)\hat{\Theta}(k-1)\right], K(k)=P(k)\varphi(k),$$

де $P(k)$ – матриця коваріації оцінок параметрів.

При використанні рекурентного методу найменших квадратів виникає проблема dbзначення початкових величин для параметрів. Розумно вибирати параметри так, щоб:

$$\hat{\Theta}(0)=0,$$

$$P(0)=\alpha I, \alpha >> 1$$

Приведений вище метод носить назву узагальненого методу найменших квадратів.

Адаптивні системи з ідентифікацією. Нехай керована система задана у вигляді:

$$A(z)y(k)=B(z)u(k)$$

Поведінка закритої системи описується еталонною моделлю

$$A_m(z)y_m(z)=B_m(z)w(k)$$

Лінійний регулятор:

$$R(z)u(k)=T(z)w(k)-S(z)y(k)$$

Маємо на увазі таку модель керованої системи:

- поліноми $A(z)$ і $B(z)$ не містять одиничних коефіцієнтів;
- множники поліномів постійні але невідомі;
- порядки поліномів n, m відомі.

Адаптивна система з ідентифікацією може бути реалізована за непрямою або прямою схемою адаптивного управління. У разі непрямої схеми адаптивного управління оцінюються параметри керованої системи і на підставі останніх оцінок обчислюються параметри регулятора. При реалізації схеми прямого адаптивного управління оцінюються параметри регулятора, використовуючи властивості системи із зворотним зв'язком. Часто називають непряму схему адаптивного управління також явним алгоритмом, а пряму схему – неявним алгоритмом.

Алгоритм непрямої схеми адаптивного управління:

1. етап. Оцінка множників поліномів $A(z)$ і $B(z)$, наприклад, за допомогою рекурентного методу найменших квадратів;
2. етап. Розрахунок регулятора, тобто у разі лінійного регулятора – знаходження поліномів $R(z)$, $S(z)$ і $T(z)$;
3. етап. Розрахунок і застосування керуючого сигналу $u(k)$.

Вказані дії виконуються багаторазово в реальному часі.

Алгоритм прямої схеми адаптивного управління:

1. етап. Оцінка множників поліномів $R(z)$ і $S(z)$ із застосуванням моделі

$$A_0(z)A_m(z)y(k)=B^-(z)\left[R(z)u(k)+S(z)y(k)\right]$$

(керована система мінімальнофазна і з швидко затухаючими нулями) або оцінка множників поліномів $R^*(z)$ і $S^*(z)$ і відновлення єдиного коефіцієнта із застосуванням моделі

$$A_0(z)A_m(z)y(k)=R^*(z)u(k)+S^*(z)y(k)$$

2. етап. Розрахунок і застосування керуючого сигналу $u(k)$.

Проблеми при проектуванні, реалізації і використанні систем з адаптивним управлінням. Нині існує три основні проблеми, пов'язаних з реалізацією і практичним використанням адаптивних систем:

1) Проблема апріорної інформації;
2) Проблема моделювання керуючої системи;
3) Пошук нових методів реалізації.

Проблема апріорної інформації одна з найбільш суттєвих проблем при створенні адаптивних систем. Пояснимо проблему апріорної інформації на основі поліноміальних дискретних моделей входу-виходу. Ми припускаємо, що керована система адекватно описується заданими моделями, для яких задані:

- порядки поліномів (або поліноміальних матриць) $A(z^{-1})$, $B(z^{-1})$ і $C(z^{-1})$ є відповідно n, m і n;
- затримка d в дискретних тактах;
- множник b_0 відомий або відомий тільки його знак.

Практика показала, що в загальному випадку з порядком поліномів можна помилитися на +1, тобто цей порядок вище на один, чим реальний. Затримка має бути в загальному випадку задана правильно. Вказана вище апріорна інформація потрібна для того, щоб були правильно задані параметри регулятора.

Існує, зрозуміло, завдання зниження кількості апріорної інформації. Класична адаптивна система містить два (у загальному випадку вертикальних) зворотні зв'язки, сигнальний по стану або виходу і інформаційний (параметричну), для переналаштування параметрів за оцінками, і припускає апріорну інформацію у вказаному вище об'ємі.

Для зменшення кількості апріорній інформації (чи ліквідації) використовується введення другого інформаційного зворотного зв'язку (структурного), за допомогою якого реалізується адаптивне управління по структурних параметрах. При цьому адаптивна система значно ускладнюється.

Проблеми реалізації адаптивних систем. Враховуючи усе вищесказане, стає ясно, що в загальному випадку адаптивна система є складною системою з ієрархічною структурою, яка як правило реалізується на програмному рівні, використовуючи при цьому програмні технології реального часу. Проблеми при створенні – проектування адаптивних процесів із задовільною динамікою напрацювання достатньої надійності реалізації. При цьому часто використовується прототипування.

Прототипування адаптивних систем – ітеративний процес і містить наступні важливі етапи, які виконуються до задоволення поставлених умов:

1 етап специфікація керованої системи;
2 етап моделювання керованої системи;
3 етап аналіз моделі і прийнятих рішень;
4 етап постановка завдань управління і їх правка;
5 етап вибір структури адаптивної системи;
6 етап вибір параметрів і/або алгоритму/методу оцінки стану;
7 етап вибір типу регулятора і структури;
8 етап апробація адаптивної системи на рівні алгоритму і знаходження меж значень або значень експериментально підбираних параметрів;
9 етап аналіз результатів і висновки;
10 етап введення обмежень для адаптивної системи, що реалізовується;
11 етап перевірка адаптивної системи на рівні реалізації;
12 етап аналіз результатів і висновки;
13 етап оформлення проекту.

1. Мелихов А.Н. и др. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. – М.: Наука, 1990. – 272 с.
2. Ротач В.Я., Клюев А.С. Автоматизация настройки систем управления. М.: Энергоиздат, 1984 – 272 с.
3. Алиев Р.А., Церковный А.Э., Мамедова Г.А. Управление производством при нечеткой исходной информации. М.: Энергоиздат. 1991. – 234 с.
4. Дьяконов В.П. Simulink 5/6/7 Самоучитель. – М.:ДМК, 2008 – 781с.