



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 6507

(13) U

(51) 7 G05B13/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

ОПИС

ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ
НА КОРИСНУ МОДЕЛЬвидається під
відповідальність
власника
патенту

(54) СПОСІБ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ НЕЛІНІЙНИМ ОБ'ЄКТОМ

1

(21) 20040907439

(22) 13.09.2004

(24) 16.05.2005

(46) 16.05.2005, Бюл. № 5, 2005 р.

(72) Тронь Юрій Оланасович, Мариношенко Олександр Петрович

(73) НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
УКРАЇНИ "КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИ-
ТУТ"

(57) Спосіб автоматичного керування нелінійним об'єктом, який полягає в тому, що вимірюють регульовану координату, отриманий сигнал порівнюють з сигналом завдання, результат порівняння підсумовують з сигналом компенсації нелінійності, який відрізняється тим, що результат порівняння перетворюють в пропорційний сигнал на виході моделі, результат перетворення масштабують і

2

алгебраїчно підсумовують з сигналом керування, вимірюють сигнал завдання, сигнал пропорційний регульованій координаті і сигнал на виході моделі, визначають значення нелінійної складової регульованої координати по збуренню і визначають величину сигналу компенсації зовнішнього збурення згідно виразу:

$$\epsilon_m = b_1 U_z + b_2 U_m - \epsilon_a,$$

сигнал завдання алгебраїчно підсумовують з сигналом компенсації і формують сигнал, пропорційний заданому значенню регульованої координати, де: ϵ_a - сигнал завдання; ϵ_m - сигнал компенсації; U_z - сигнал, пропорційний регульованій координаті; U_m - сигнал з виходу моделі; b_1, b_2 - постійні коефіцієнти.

Спосіб корисної моделі відноситься до галузі автоматичного керування і регулювання і може використовуватися для стабілізації координат об'єктів з нелінійної залежності між регульованою координатою та зовнішнім збуренням.

Відомий спосіб автоматичного керування нелінійним об'єктом, який полягає в лінеаризації нелінійної характеристики об'єкта та керування нелінійним об'єктом, як лінійним [1].

Недоліками цього способу є наявність статичної похибки регулювання та вузький діапазон керуючих впливів, визначений лінеаризованою ділянкою.

Відомий спосіб автоматичного керування нелінійним об'єктом, який полягає в тому, що формують сигнал, пропорційний регульованій координаті, одержану величину зрівнюють з заданим і формують сигнал керування пропорційний отриманій різниці, при цьому задану величину визначають, виходячи з результуючої статичної характеристики системі керування [2].

Недоліком даного способу є статична похибка регулювання, яка визначається не лінійністю результуючої характеристики.

Відомий спосіб автоматичного керування нелінійним об'єктом, який полягає в тому, що форму-

ють сигнал, пропорційний регульованій координаті, одержану величину зрівнюють з сигналом завдання, а результат порівняння сумують з сигналом компенсації не лінійності [3], прототип.

Недоліком відомого способу є те, що для компенсації не лінійності потрібно синтезувати пропорційно-диференціальний регулятор, який реалізує нелінійну функцію, обернену до не лінійності об'єкта регулювання. Крім того, навіть при досягненні лінійності об'єкта регулювання отримана система має статичну похибку.

Ще один недолік відомого способу полягає в тому, що в замкненій системі автоматичного регулювання з від'ємним зворотнім зв'язком зменшується коефіцієнт підсилення прямого перетворення в $\frac{K_p}{1 + K_p K_o}$ разів, що знижує ефективність регулювання.

Задачею заявленого об'єкта є підвищення точності керування за рахунок виключення статичної похибки.

Поставлена задача вирішується тим, в способі керування нелінійним об'єктом, який полягає в тому що вимірюють регульовану координату, отриманий сигнал порівнюють з сигналом завдання,

(13) U

(11) 6507

(19) UA

результат порівняння сумують з сигналом компенсації не лінійності, результат порівняння перетворюють в пропорційний сигнал на виході моделі, результат перетворення масштабують і алгебраїчно сумують з сигналом керування, вимірюють сигнал завдання, сигнал пропорційний регульованій координаті і сигнал на виході моделі, визначають значення нелінійної складової регульованої координати по збуренню і визначають величину сигналу компенсації зовнішнього збурення згідно виразу

$$\varepsilon_M = b_1 U_z + b_2 U_M - \varepsilon_3$$

Сигнал завдання алгебраїчно сумують з сигналом компенсації зовнішнього збурення, а сигнал, пропорційний заданому значенню регульованої координати формують, як алгебраїчну суму сигналу компенсації зовнішнього моменту і сигналу завдання в відповідності з заданим законом керування.

Де: ε_3 - сигнал завдання

ε_M - сигнал компенсації

U_z - сигнал, пропорційний регульованій координаті

U_M - сигнал з виходу моделі

b_1, b_2 - постійні коефіцієнти

На Фіг.1 приведена структурна схема системи для втілення способу.

На Фіг.2, схема системи автоматичного регулювання нелінійним об'єктом в якій блоки 3,8,9 та 10 реалізовані програмним шляхом в процесорі.

На Фіг.3 приведений приклад принципового виконання способу.

На Фіг.4 приклад статичних характеристик регулювання з вигнутою не лінійністю.

На Фіг.5 приклад статичних характеристик з випуклою не лінійністю.

На Фіг.6 ілюстрація розрахункового прикладу.

На Фіг.7-9 приклад накладання шуму на зовнішнє збурення.

Система автоматичного регулювання нелінійного об'єкта Фіг.1 містить перший, другий та третій 1, 2 і 3 суматори, підсилювач 4, регулятор 5, нелінійний об'єкт 6, вимірювач значення регульованої координати 7, модель 8 в якості якої може використовуватися лінійний підсилювач, перший і другий 9, 10 масштабні перетворювачі, перший, другий та третій 11, 12 та 13 модулі вводу аналогових сигналів (аналого-цифрові перетворювачі) АЦП, модуль виводу 14 (цифро-аналоговий перетворювач) ЦАП, інтерфейс 15, процесор 16.

Блоки 2-10 утворюють контур статичного регулювання і виконують роль контуру підлеглого регулювання. Блоки 1, 11, 13, інтерфейс 15 та процесор 16 утворюють контур астатичного регулювання і виконують роль основного контуру регулювання.

Спосіб автоматичного регулювання нелінійним об'єктом виконується наступним чином. Рівняння статичної характеристики нелінійного об'єкта визначається наступною залежністю

$$Z = K_u u - F(M) \quad (1)$$

де: u - сигнал керування

M - збурення регульованої величини

K_u - коефіцієнт передачі прямого перетворен-

ня, що включає в себе блоки 4, 5, 6.

$F(M) = a_1 M + a_2 M^2 + \dots + a_n M^n$ - поліном n -го ступеня який визначає нелінійну характеристику регулювання.

a_1, a_2, \dots, a_n - коефіцієнти полінома які визначаються із системи рівнянь:

$$a_1 M_1 + a_2 M_1^2 + \dots + a_n M_1^n = Z_0 - Z_1$$

$$a_1 M_2 + a_2 M_2^2 + \dots + a_n M_2^n = Z_0 - Z_2$$

.....

$$a_1 M_n + a_2 M_n^2 + \dots + a_n M_n^n = Z_0 - Z_n \quad (2)$$

де: Z_0 - значення регульованої координати при $M=0$, Фіг.2, 3.

n - порядок полінома.

Для втілення запропонованого способу формують сигнал ε пропорційний заданому значенню регульованої координати, вимірюють значення регульованої координати у відповідності з рівнянням:

$$U_z = K_z Z \quad (3)$$

де: U_z - сигнал на виході вимірювача регульованої координати Z ;

K_z - коефіцієнт пропорційності

Для здійснення способу використовується модель 8 з функцією перетворення

$$U_M = K_M u_M \quad (4)$$

де: u_M - сигнал на вході моделі;

U_M - сигнал на виході моделі;

K_M - коефіцієнт перетворення.

Далі, отриманий сигнал масштабують і сумують з сигналом, пропорційним регульованій величині і формують сигнал на виході моделі у відповідності з рівнянням:

$$U_M = K_M (\varepsilon - K_z \beta Z) \quad (5)$$

де: ε - сигнал на вході суматора 3;

U_M - сигнал на виході моделі;

K_M - коефіцієнт передачі моделі;

β - коефіцієнт передачі масштабного перетворювача 9.

Вихідний сигнал моделі масштабують і сумують з сигналом ε , підсилюють в підсилювачі 3 і формують сигнал керування об'єктом у відповідності з рівнянням:

$$u = K_y (\varepsilon + \beta_M U_M) \quad (6)$$

де: u - сигнал на виході суматора 2;

K_y - коефіцієнт підсилення;

β_M - коефіцієнт передачі масштабного перетворювача 10.

На основі (3) - (6) отримують систему двох координатне взаємопов'язаних рівнянь:

$$Z + K_u \beta_M U_M = K_u \varepsilon - F(M) \quad (7)$$

$$-K_u \beta Z + U_M = K_M \varepsilon \quad (8)$$

Систему можна виразити у вигляді матриці:

$$\begin{bmatrix} 1 & -K_u \beta_M \\ -K_u \beta & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Z \\ U_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_u \\ K_M \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F(M) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Розв'язуючи систему (9) відносно сигналів Z і U_M і збурення $F(M)$ отримують систему двох параметрично взаємопов'язаних рівнянь:

$$(1 + K_u K_M \beta \beta_M) Z = K_u (1 + K_M \beta_M) \varepsilon - F(M) \quad (10)$$

$$(1 + K_u K_M \beta \beta_M) U_M = K_M (1 + K_u \beta) \varepsilon + \beta K_M F(M) \quad (11)$$

Рівняння (10) - (11) визначають рефлексивне керування об'єктом, коли модель взаємодіє з об'єктом таким чином, що об'єкт впливає на модель, а модель впливає на об'єкт. Причому внаслідок такої взаємодії збурення не діє на модель але сигнал на виході моделі містить складову, пропорційну збуренню яке діє на об'єкт, причому таким чином, що при збільшення збурення регулюєма координата зменшується, а сигнал на виході моделі збільшується і навпаки. Модель 8 називається рефлексивною, так як її перетворення (11) відображає перетворення нелінійного об'єкта (10).

При виконанні умови:

$$K_u \beta = 1 \quad (12)$$

що легко досягається вибором коефіцієнта

$$\beta = \frac{1}{K_u} \text{ масштабного перетворювача } 10, \text{ рівняння}$$

(10) - (11) зводяться до вигляду:

$$Z = K_u \varepsilon - F(M), \quad (13)$$

$$U_M = K_F F(M), \quad (14)$$

$$\text{де } K_F = \frac{\beta K_M}{1 + K_M \beta \beta_M}.$$

З рівняння (10) випливає, що по запропонованому способу регулювання знаходиться на більш високому рівні ніж в прототипі, так, як нелінійна характеристика регулювання проходить через точку $Z_0 = K_u \varepsilon$ що відповідає відсутності збурення та природної характеристики, що підвищує ефективність регулювання.

З рівняння (12) випливає, що сигнал U_M на виході моделі пропорційний збуренню яке діє на об'єкт регулювання і інваріантний відносно сигналу керування ε .

У відповідності з запропонованим способом сигнал ε формують, як алгебраїчну суму сигналу завдання ε_3 , пропорційного заданій регулюємі координаті і сигналу ε_M пропорційного зовнішньому збуренню.

$$\varepsilon = \varepsilon_3 + \varepsilon_M \quad (15)$$

З урахуванням рівняння (15), рівняння (9) - (10) можна представити, у такому вигляді:

$$U_Z = -K_0 (\varepsilon_3 + \varepsilon_M) - K_F F(M) \quad (16)$$

$$U_M = -K (\varepsilon_3 + \varepsilon_M) + K_{FM} F(M) \quad (17)$$

де:

$$K_0 = \frac{K_u K_Z (1 + K_M \beta \beta_M)}{1 + K_u K_\beta \beta \beta_M}$$

$$K_F = \frac{1}{1 + K_u K_\beta \beta \beta_M}$$

$$K = \frac{K_M (1 - K_u \beta)}{1 + K_u K_\beta \beta \beta_M}$$

$$K_{FM} = \frac{K_M \beta}{1 + K_u K_\beta \beta \beta_M}$$

Для знаходження величини ε_M сигналу компенсації зовнішнього збурення визначають відношення сигналів U_Z і U_M :

$$\frac{U_Z}{U_M} = \frac{K_0 (\varepsilon_3 + \varepsilon_M) - K_F F(M)}{-K (\varepsilon_3 + \varepsilon_M) + K_{FM} F(M)} \quad (18)$$

З співвідношення (17) можна отримати рівняння інваріантно відносно сигналів ε_3 і ε_M :

$$\frac{U_Z + K_F F(M)}{U_M - K_{FM} F(M)} = \frac{K_0}{K} \quad (19)$$

Звідси визначають значення нелінійної складової збурення:

$$F(M) = \frac{K_0 U_M - K U_Z}{K K_F + K_0 K_{FM}} \quad (20)$$

Рівняння (20) можна представити в такому вигляді:

$$F(M) = a_1 U_M - a_2 U_Z \quad (21)$$

де:

$$a_1 = \frac{K_0}{K K_F + K_0 K_{FM}}$$

$$a_2 = \frac{K}{K K_F + K_0 K_{FM}}$$

Враховуючи (21) рівняння (16) буде мати вигляд:

$$U_Z = K_0 (\varepsilon_3 + \varepsilon_M) - a_1 U_M + a_2 U_Z \quad (22)$$

Звідки значення сигналу компенсації зовнішнього збурення ε_M визначають у відповідності з рівнянням:

$$\varepsilon_M = \frac{(1 - a_2) U_Z + a_1 U_M - K_0 \varepsilon_3}{K_0} \quad (23)$$

або

$$\varepsilon_M = b_1 U_Z + b_2 U_M - \varepsilon_3 \quad (24)$$

де:

$$b_1 = \frac{1 - a_2}{K_0}$$

$$b_2 = \frac{a_1}{K_0}$$

Рівняння (21) і (24) реалізуються в процесорі 16. Результат обчислення ε_M виводиться через ЦАП 14.

Система автоматичного регулювання працює наступним чином. Нехай до регулюємої координати прикладене зовнішнє збурення, яке відповідає деякому номінальному значенню M_n , поз. 1, Фіг.4 і 5. Значення регулюємої координати дорівнює Z_3 . В процесі регулювання відбувається неперервне вимірювання сигналу завдання ε_3 , сигналу з виходу моделі U_M і сигналу U_Z шляхом їх вводу через АЦП 11, 12 і 13 в процесор. При цьому коефіцієнти a_1 , a_2 , b_1 , b_2 зберігаються в пам'яті процесора у вигляді постійних коефіцієнтів.

Зі зменшенням зовнішнього збурення на величину $M_n - \Delta M$ відбувається збільшення значення регулюємої координати на величину $Z_3 + \Delta Z$. У процесі регулювання у процесорі 16 відбувається розрахунок значення діючого збурення $F(M)$, у відповідності з рівнянням (20) і значення сигналу компенсації ε_M у відповідності з рівнянням (23). Отримане значення ε через ЦАП 14 подається на

другий вхід першого суматора 1 де зрівнюється з сигналом завдання ε_3 і формується сигнал керування ε , який подається на суматор 2. Фізично це означає паралельне зміщення регулюючої характеристики вправо, поз. 3, що призводить до точного відновлення заданого значення регулюємої координати.

Зі збільшенням зовнішнього збурення на величину $M_H + \Delta M$ відбувається зменшення регулюємої координати на величину $Z_3 \sim \Delta Z$. Далі процеси регулювання відбуваються аналогічно вище викладеному, відбувається зміщення характеристики $Z(M)$ вліво і відновлення регулюємої координати до заданої величини, поз. 2, Фіг 4, 5.

Таким чином у відповідності з запропонованим способом регулювання нелінійним об'єктом відбу-

вається у відповідності з лінією 4 паралельною до осі M , що свідчить про астатичне регулювання нелінійного об'єкта.

Для доказу працездатності способу наведемо розрахунковий приклад.

Нехай характеристика нелінійного об'єкта має вигляд:

$$Z = 10u - F(M)$$

$$\text{де } F(M) = 43.2M + 0.89M^2 - 0.0062M^3$$

та вказана на Фіг.6, поз. 1.

Нехай $U = 100$, тоді:

$$Z = 1000 - F(M), \text{ а } F(M) = 43.2M + 0.89M^2 - 0.0062M^3$$

Нехай $K_z = 0.01$. Розрахункові значення цих величин наведено в таблиці 1 і наведені на Фіг.6 поз. 1.

Таблиця 1

M, Нм	0	10	20	30	40	50
F(M)	0	349,2	557,6	662,4	700,8	710,0
Z	1000	650,8	442,4	337,6	292,2	290,0
U _z	10,0	6,508	4,424	3,376	2,922	2,900

Нехай номінальне значення $M_H = 20$, що відповідає значенню регулюємої координати $Z = 442,4$. Задамо значення зміни збурення $\pm 50\%$. Задамо наступні значення параметрів: $K_M = 10$, $\beta = 0.001$, $\beta_M = 0.1$. Тоді будемо мати наступні рівняння:

$$Z = 20\varepsilon - F(M)$$

$$U_z = 10\varepsilon - 0.01F(M)$$

$$U_M = 10.1\varepsilon - 0.01F(M)$$

Отриману систему необхідно доповнити законом керування, тобто залежністю регулюємої координати від сигналу завдання. Нехай цей закон відповідає пропорційному у вигляді наступного рівняння:

$$Z_3 = 8.848\varepsilon_3$$

Розрахункові значення цих рівнянь при $\varepsilon_3 = 50$ наведені в таблиці 2 і показані на Фіг.6 поз. 1

Таблиця 2

M	0	10	20	30	40	50
F(M)	0	349,2	557,6	662,4	700,8	710,0
Z	1000	650,8	442,4	337,6	292,2	290,0
U _z	10,0	6,508	4,424	3,376	2,922	2,900
U _M	505	501,508	499,424	498,376	494,992	497,9

Для визначення значень $F(M)$ вимірюють сигнали U_z і U_M :

$$F(M) = 2.0202U_M - 102.0202U_z$$

При $M_1 = 20$ отримують

$$F(M) = \frac{0.2 - 499.424 + 10.1 \cdot 4.424}{0.1(1 - 0.1)} = 557.6$$

При зміні навантаження на ± 50 , тобто при $M_2 = 10$ та $M_3 = 30$ будуть наступні значення:

$$F(M_2) = \frac{0.2 \cdot 501.508 - 10.1 \cdot 6.508}{0.099} = 349.2$$

$$F(M_3) = \frac{0.2 \cdot 498.376 - 10.1 \cdot 3.376}{0.099} = 662.4$$

Для формування сигналу ε_M у відповідності зі знайденими значеннями $F(M)$ діючого збурення будемо мати:

$$\varepsilon_M = 0.05\omega_3 - 0.099U_y + 0.049F(M)$$

$$\varepsilon_{M1} = \frac{10.1 \cdot 442.4 - 20 \cdot 499.424 + 9.9 \cdot 557.6}{100 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 0.1} = 0$$

$$\varepsilon_{M2} = \frac{10.1 \cdot 442.4 - 20 \cdot 501.508 + 9.9 \cdot 349.2}{202} = 10.42$$

$$\varepsilon_{M3} = \frac{10.1 \cdot 442.4 - 20 \cdot 498.376 + 9.9 \cdot 662.4}{202} = 5.24$$

Підставивши отримані значення в рівняння (16) отримаємо:

$$\omega_1 = 20(50 + 0) - 557.6 = 442.4$$

$$\omega_2 = 20(50 - 10.42) - 349.2 = 442.4$$

$$\omega_3 = 20(50 + 5.24) - 662.4 = 442.4$$

Таким чином у відповідності до запропонованого способу, зі зменшенням збурення сигнал завдання зменшується, а при збільшенні збурення -

збільшується, причому, на таку величину, що регулюєма координата залишається постійною. Регулюючі характеристики для такого випадку показано на Фіг 4 поз 2 і 3. При зміні сигналу завдання змінюють значення сигналу ε_3 в рівнянні (22)

Наприклад, потрібно при моменті зовнішнього навантаження $M = 20$ підтримувати регулюєму координату на рівні $Z_3 = 500$

Тоді маємо

$$\varepsilon_M = 0.05 \cdot 500 - 0.099 \cdot 499.424 + 0.049 \cdot 557.6 = 2.88$$

$$\text{Отже } Z = 20(50 + 2.88) - 557.6 = 500$$

Приклад 2 Нехай сигнал ε_3 представляє собою адитивну сполуку постійної складової і вузькополосної низькочастотної перешкоди у вигляді гармонічного сигналу $\varepsilon_3 = 50 + 5 \sin 10t$

Тоді будемо мати наступні перетворення

$$Z(t) = 20(50 + 5 \sin 10t) - F(M)$$

$$U_z(t) = 0.2(50 + 5 \sin 10t) - 0.01F(M)$$

$$U_M(t) = 10.1(50 + 5 \sin 10t) - 0.01F(M)$$

Розрахункові значення для цих рівнянь при $M = 20$ і відповідно $F(M) = 557.6$ наведені в таблиці 3

Таблиця 3

t, мс	0	5	10	15	20	25	30
$\varepsilon(t)$	50,0	53,830	54,929	52,50	48,289	45,075	45,669
$Z(t)$	442,4	519,0	540,88	492,40	408,18	343,54	355,78
$U_z(t)$	4,424	5,190	5,408	4,924	4,081	3,435	3,557
$U_M(t)$	499,324	538,107	549,156	524,674	482,142	449,681	455,68

З таблиці 3 можна зробити висновок, що як кут швидкість ЕП, так і сигнали U_z та U_M мають крім постійної складової низькочастотну перешкоду, тоді

$$F(M)_{t=5} = 2.0202 \cdot 538.107 - 102.0202 \cdot 5.190 = 557.6$$

$$F(M)_{t=10} = 2.0202 \cdot 549.156 - 102.0202 \cdot 5.408 = 557.6$$

$$F(M)_{t=15} = 2.0202 \cdot 524.674 - 102.0202 \cdot 4.924 = 557.6$$

Сигнал ε_M буде визначатися наступними рівняннями

$$\varepsilon_{M1} = 0.05 \cdot 442.4 - 0.099 \cdot 538.107 + 0.049 \cdot 557.6 = -3.83$$

$$\varepsilon_{M2} = 0.05 \cdot 442.4 - 0.099 \cdot 549.156 + 0.049 \cdot 557.6 = -4.924$$

$$\varepsilon_{M3} = 0.05 \cdot 442.4 - 0.099 \cdot 524.674 + 0.049 \cdot 557.6 = -2.5$$

Звідси

$$Z_1 = 20(53.83 - 3.83) - 557.6 = 442.4$$

$$Z_2 = 20(54.924 - 4.924) - 557.6 = 442.4$$

$$Z_2 = 20(52.5 - 2.5) - 557.6 = 442.4$$

Таким чином, при існуванні перешкоди у входному сигналі, система автоматичного керування формує сигнал, рівний по абсолютному значенню, але протилежний по знаку (протифазний) сигнал компенсації перешкоди, що підтверджує присутність властивості інваріантності рівнянь (23) та (28) відносно сигналу завдання

Приклад 3 Розглянемо приклад динамічного характеру зміни моменту навантаження. Наприклад, биття вала ЕП, тоді

$$M(t) = 557.6 + 5 \sin 10t$$

Тоді відповідні перетворення матимуть вигляд

$$U_z(t) = 20\varepsilon - 557.6 - 5 \sin 10t$$

$$U_M(t) = 0.2\varepsilon - 0.01(557.6 + 5 \sin 10t) =$$

$$= 10.1\varepsilon - 0.01(557.6 + 5 \sin 10t)$$

Результати розрахунку цих рівнянь наведено в таблиці 4

Таблиця 4

t, мс	0	5	10	15	20	25	30
$M(t), \text{ Нм}$	557.6	561.43	562.524	560.1	555.889	552.675	553.269
$Z(t)$	442.4	438.57	437.476	439.9	444.111	447.325	446.731
$U_z(t)$	4.424	4.385	4.374	4.399	4.441	4.473	4.467
$U_M(t)$	499.424	499.385	499.374	499.399	499.441	499.473	499.467

$$\text{Тоді } F(M)_{t=5} = 2.0202 \cdot 499.385 - 102.0202 \cdot 4.3857 = 561.430$$

$$F(M)_{t=10} = 2.0202 \cdot 499.374 - 102.0202 \cdot 4.3747 = 562.524$$

$$F(M)_{t=15} = 2.0202 \cdot 499.399 - 102.0202 \cdot 4.399 = 560.10$$

отже

$$\varepsilon_{M1} = 0.05 \cdot 442.4 - 0.099 \cdot 499.385 + 0.040 \cdot 561.43 = 0.191$$

$$\varepsilon_{M2} = 0.05 \cdot 442.4 - 0.099 \cdot 499.374 + 0.040 \cdot$$

$$562.524 = 0.246$$

$$\varepsilon_{M3} = 0.05 \cdot 442.4 - 0.099 \cdot 499.399 + 0.040 \cdot 560.1 = 0.125$$

звідки

$$Z_1 = 20(50 + 0.191) - 561.43 = 442.4$$

$$Z_2 = 20(50 + 0.246) - 561.524 = 442.4$$

$$Z_3 = 20(50 + 0.125) - 561.10 = 442.4$$

Результати розрахунку $Z(t)$, та ε_K при динамічній зміні навантаження $M(t)$, з урахуванням наведених вище викладок наведено в таблиці 5

Таблиця 5

t, мс	0	2	4	6	8	10
M(t), Нм	564.137	561.607	554,761	554,854	553,799	559.027
Z(t)	442.4	442.4	442.4	442.4	442.4	442.4
ε_K	0,327	0,2	-0,142	-0,137	-0,190	0,071

Ці данні підтверджуються моделюванням результатів за допомогою програмного забезпечення Mathcad, результати у вигляді графіків наведені на Фіг.7

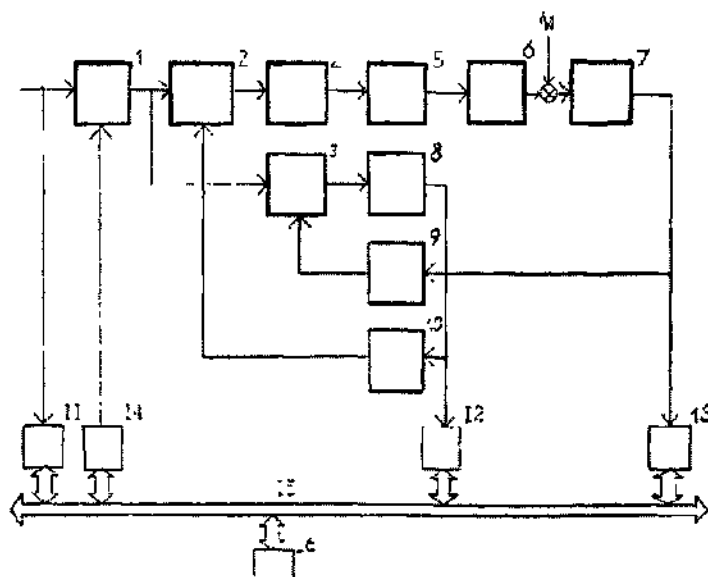
Наведені розрахункові приклади наочно підтверджують працездатність такого способу, а також досягнення позитивного ефекту, який полягає у відсутності статичної похибки, тобто у підвищенні точності регулювання при нелінійній характеристиці.

Звичайно, усі теоретичні викладки, викладені у описанні винаходу у розділі підвищення точності

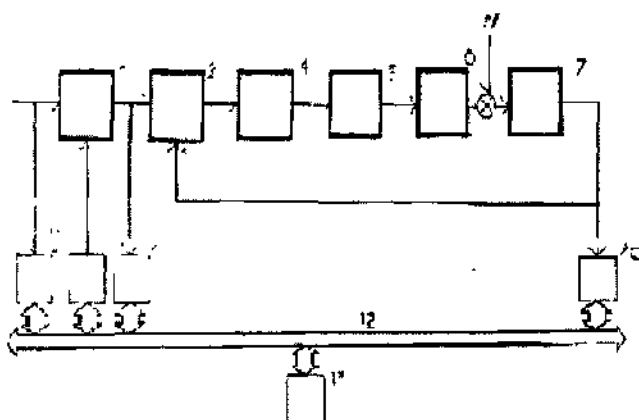
регулювання відносяться також до об'єктів з лінійною характеристикою.

Література:

1. Зайцев Г.Ф. Основы теории автоматического регулирования. Киев, Киевское высшее инженерное радиотехническое училище, 1974, с 437.
2. Юревич А. Н. Теория автоматического управления. - Ленинград, 1957, с. 175-176
3. Система регулирования нелинейного объекта. Авторское свидетельство СССР, №1679206, МПК G05B 13/00, 1990.



Фиг. 1



Фиг. 2

