

## ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ МЕТОДОМ ЦИФРОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Л.М.Заміховський, Л.О.Сав'юк

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 48000,  
e-mail: public@ifdtung.if.ua

*В статье рассматриваются вопросы создания унифицированной математической цифровой модели систем автоматического управления (САУ). Создание такой модели с использованием процедурного языка программирования или объектно-ориентированной среды моделирования позволит проводить параметрический и структурный синтез САУ, при одновременном определении статических и динамических характеристик системы в произвольной точке математической модели.*

*There are considered the questions of creating uniform mathematical digital model of automatic control system using procedural programming language or object-oriented modeling environment, which allows to execute parametric and structural synthesis of automatic control system defining simultaneously static and dynamic system characteristics in arbitrary chosen point of mathematical model.*

У будь-якій галузі промисловості, в тому числі і нафтогазовій, широке використання знаходять різноманітні системи управління. При цьому вплив на об'єкт управління здійснюється як за участі людини-оператора – автоматизовані системи управління (АСУ), так і без неї – системи автоматичного управління (САУ). Відмінність сучасних АСУ та САУ від традиційних систем регулювання і управління полягає у тому, що частина управлінських робіт (збір, аналіз і перетворення інформації) виконується за допомогою ЕОМ.

При проектуванні і розробці АСУ або САУ з метою врахування складності об'єкта управління, його конструктивних особливостей і умов експлуатації, використовують методи математичного моделювання, зокрема, цифрового моделювання. При використанні методу цифрового моделювання АСУ (САУ) знаходиться уніфікована математична модель досліджуваного лінійного пристрою (ланки) у вигляді рекурсивного різницевого рівняння. Уніфіковану математичну модель називають цифровою моделлю, так як її структура аналогічна структурі рекурсивного рівняння цифрового фільтра. Зазначений метод цифрового моделювання дозволяє досить ефективно досліджувати з використанням засобів мікропроцесорної техніки, зокрема комп'ютерів, як АСУ, так і неперервні, дискретні та нелінійні САУ.

В [1] детально проаналізовано методи побудови дискретних моделей лінійних систем у середовищі MatLab 6.0. Показано, що розглянуті методи побудови моделей суттєво полегшують здійснення переходу від неперервного перетворення за Лапласом (L-перетворення) до дискретного (Z-перетворення), максимально наближують отриману математичну модель до реалізації будь-якою процедурною мовою програмування, що дає змогу досліднику, який не знайомий із сучасними об'єктно-орієнтованими середовищами (MatLab 6.0, Visible Simulation), не витратити час на їх поглиблене вивчення.

Так, для лінійної ланки будь-якої складності, що має один вхід і один вихід, при дії на вхід сигналу довільного вигляду цифрова модель має вигляд [2]

$$y[nT] = \frac{1}{B_m} \left\{ \sum_{i=0}^m A_{m-i} \cdot x[nT - iT] - \sum_{i=1}^m B_{m-i} \cdot y[nT - iT] \right\}, \quad (1)$$

де:  $m$  – порядок операторної функції передачі  $W(s)$  лінійної ланки;  
 $x[nT]$  – вхідний сигнал довільної форми у вигляді гратчастої функції;  
 $y[nT]$  – вихідний сигнал;  
 $nT$  – дискретний час ( $n=0,1,2,\dots$ );  
 $T$  – період дискретизації;  
 $A_i$  – коефіцієнти, які визначаються через коефіцієнти  $a_i$  чисельника операторної функції передачі;

$B_i$  – коефіцієнти, визначені через коефіцієнти  $b_i$  знаменника операторної функції передачі лінійної ланки

$$W(s) = \frac{a_0 + a_1s + a_2s^2 + \dots + a_ms^m}{b_0 + b_1s + b_2s^2 + \dots + b_ms^m}. \quad (2)$$

Враховуючи, що вивід рекурсивного рівняння (1) і основи теорії цифрового моделювання викладені в [1], у роботі розглядаються практичні аспекти використання даного методу при дослідженні та синтезі САУ, що відрізняються за своїм математичним описом: неперервних, імпульсних та нелінійних.

При застосуванні рекурсивного рівняння (1) зроблений перехід від неперервного часу  $t$  до дискретного часу  $nT$ , тому безперервна функція часу (безперервний сигнал) замінений гратчастою функцією. Замість диференціальних рівнянь використовуються різницеві рівняння, а тому звичайне перетворення Лапласа замінене дискретним перетворенням Лапласа або Z-перетворенням.

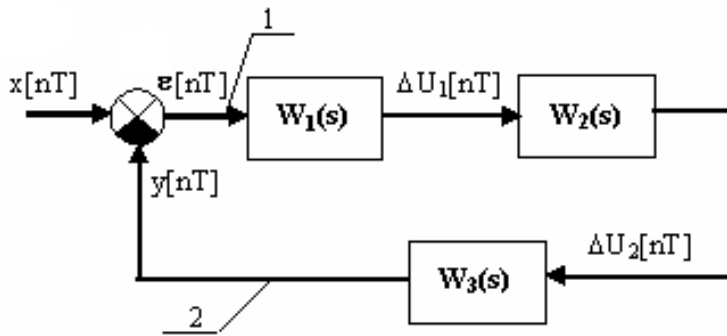


Рисунок 1 — Структурна схема замкнутої астатичної САУ

У результаті розрахунків за допомогою рівняння (1) отримуємо вихідний сигнал у вигляді гратчастої функції. При прямуванні періоду дискретизації  $T$  до нуля ( $T \rightarrow 0$ ), вихідна гратчasta функція наближається до безперервної функції  $y[nT] \rightarrow y(t)$ . При визначенні коефіцієнтів  $A_i, B_i$  рекурсивного рівняння (1) максимально формалізовано.

Для визначення коефіцієнтів  $A_i$  складаємо матрицю коефіцієнтів

$$\bar{A}_m = S_m \cdot \bar{a}_m, \quad (3)$$

де:  $S_m$  – матриця переходу від звичайного перетворення Лапласа ( $L$ -перетворення) до  $Z$ -перетворення;

$\bar{a}_m$  – матриця-стовбець (вектор), складена з коефіцієнтів чисельника операторної функції передачі  $W(s)$  моделі лінійної ланки. Матриці переходу від  $L$  до  $Z$ -перетворення опубліковані в літературі по цифровому моделюванню [2, 3]. Нижче наведено матриці переходу  $S_m$  для  $i = 1, 2, 3, 4$ .

$$S_1 = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix};$$

$$S_2 = \begin{bmatrix} 1/3 & -1 & 1 \\ 10/3 & 0 & -2 \\ 1/3 & 1 & 1 \end{bmatrix};$$

$$S_3 = \begin{bmatrix} 0 & -1/3 & 1 & -1 \\ 4 & -3 & -1 & 3 \\ 4 & 3 & -1 & -3 \\ 0 & 1/3 & 1 & 1 \end{bmatrix};$$

$$S_4 = \begin{bmatrix} -1/45 & 0 & 1/3 & -1 & 1 \\ 124/45 & -4 & 8/3 & 2 & -4 \\ 158/5 & 0 & -6 & 0 & 6 \\ 124/45 & 4 & 8/3 & -2 & -4 \\ -1/45 & 0 & 1/3 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Матриця-стовбець, яка складається з коефіцієнтів чисельника функції передачі має такий вигляд:

$$\bar{a} = \begin{bmatrix} \left(\frac{T}{2}\right)^m \cdot a_0 \\ \left(\frac{T}{2}\right)^{m-1} \cdot a_1 \\ \dots \\ a_m \end{bmatrix}$$

Коефіцієнти  $B_i$  рекурсивного рівняння (1) знаходяться аналогічно, тобто:

$$\bar{B}_i = S_i \cdot \bar{b}_i,$$

де:  $S_i$  – матриця переходу від  $L$  до  $Z$ -перетворення;

$\bar{b}_i$  – матриця-стовбець, що складена з коефіцієнтів знаменника операторної функції передачі  $W(s)$  моделі динамічної ланки.

Розглянемо порядок складання цифрової моделі замкнутої САУ на прикладі одноконтурної астатичної САУ (рис. 1).

Припускаємо, що операторні функції передачі контура управління відомі. Перша ланка – аперіодична (фізичним прикладом може бути електродвигун), тому її операторна функція передачі має вигляд

$$W_1(s) = \frac{a_0 + a_1 s}{b_0 + b_1 s}$$

де:  $a_0=k=3; a_1=0; b_0=1; b_1=T_1=0.1$  с.

Друга ланка – пропорційно-інтегруючий фільтр 2-го порядку, його операторна функція передачі має вигляд

$$W_1(s) = \frac{a_0 + a_1 s + a_2 s^2}{b_0 + b_1 s + b_2 s^2},$$

де:  $a_0=1; a_1=R_2 C_2; a_2=0; b_0=0; b_1=R_2 C_2 + R_1(C_1 + C_2); b_2=R_1 C_1 R_2 C_2$ .

Третя ланка – інтегруюча:

$$W_3(s) = \frac{k_1}{s}.$$

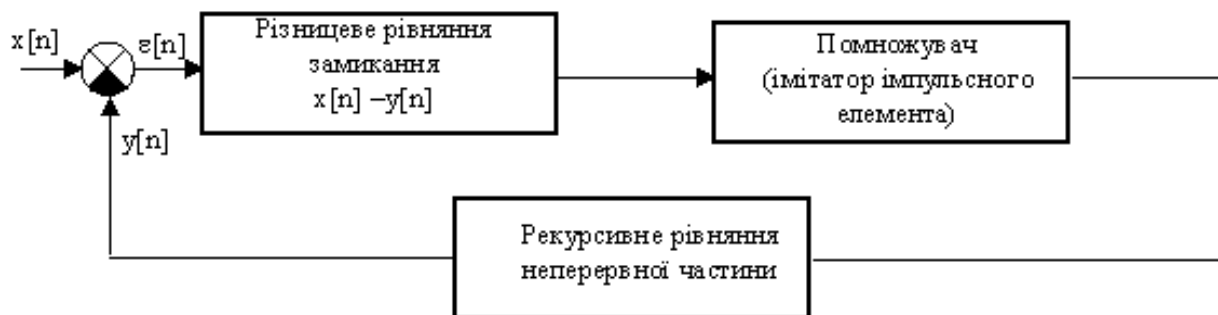


Рисунок 2 — Структурна схема амплітудно-імпульсної САУ

Цифрова модель замкненої САУ складається з рівняння замикання і трьох рекурсивних рівнянь “вхід-вихід” контура управління.

Рівняння замикання

$$\varepsilon[nT] = x[nT] - y[nT]. \quad (3)$$

Рекурсивні рівняння “вхід-вихід” мають такий вигляд:

$$\begin{aligned} DU_1[nT] &= \frac{1}{B_1} \times \\ &\times \left\{ \sum_{i=0}^1 A_{1-i} e^{[nT - iT]} - B_0 DU_1[nT - T] \right\}; \\ DU_2[nT] &= \frac{1}{B_2} \left\{ \sum_{i=0}^2 A'_{2-i} DU_1[nT - iT] + \right. \\ &\left. + \sum_{i=1}^2 B'_{2-i} DU_2[nT - iT] \right\}; \\ y[nT] &= \frac{1}{B_1} \times \\ &\times \left\{ \sum_{i=0}^1 A''_{1-i} DU_2[nT - iT] - B''_0 y[nT - T] \right\}, \end{aligned} \quad (4)$$

де: коефіцієнти  $A_1, A_0, B_1, B_0$  – відповідають функції передачі ланки  $W_1$ ;

$A'_2, A'_1, A'_0, B'_2, B'_1, B'_0$  – функції передачі  $W_2$ ;

$A''_1, A''_0, B''_1, B''_0$  – функції передачі  $W_3$ .

За трьома рекурсивними рівняннями (4) знаходять вихідну змінну  $y[nT]$  на виході контура управління (точка 2 на рис. 1) при вхідній змінній  $\varepsilon[nT]$  (точка 1 на рис. 1). Аналогічно можна скласти цифрові моделі складніших замкнених САУ.

Так, наприклад, в амплітудо-імпульсній САУ (АІС), структурна схема якої зображена на рис. 2, в контурі управління міститься імпульсний елемент (ІЕ), на виході якого утворюються імпульси тієї або іншої форми, амплітуда яких змінюється відповідно до зміни сигналу похибки. При цифровому моделюванні амплітудо-імпульсної САУ роботу імпульсного елемента можна імітувати шляхом включення в контур управління замість реального імпульсного елемента помножувача зі змінним коефіцієнтом множення. Так, при моделюванні імпульс-

льної системи з прямокутними імпульсами коефіцієнт множення на кожному рахунковому періоді дискретизації впродовж тривалості імпульсу ІЕ береться рівним постійному числу (одиниці, якщо коефіцієнт підсилення імпульсного елемента рівний одиниці). У паузі між імпульсами ( $\gamma \leq \varepsilon \leq 1$ ) коефіцієнт підсилення береться рівним нулю, де  $\gamma$  – відносна тривалість прямокутних імпульсів, що визначається за формулою

$$\gamma = \delta / T,$$

де:  $\delta$  – абсолютна довжина імпульсів,  
 $T$  – період дискретизації.

При будь-якій іншій формі імпульсів коефіцієнт множення на тимчасовому інтервалі дії імпульсів повинен мінятися відповідно до форми імпульсів. Кількість лічильних періодів дискретизації, що приходяться на тривалість імпульсів, повинна бути достатньою. Структурна схема цифрової амплітудно-імпульсної САУ (рис. 2) містить різницеве рівняння замикання, імітатор імпульсного елемента (помножувач) і різницеве рекурсивне рівняння неперервної частини САУ.

Аналогічно можна досліджувати широтно-імпульсні САУ, в яких імпульсний елемент виробляє імпульси, ширина яких змінюється відповідно до зміни сигналу похибки. Такі імпульсні САУ мають назву широтно-імпульсних систем (ШІС). Аналітично ШІС досліджувати значно складніше, ніж АІС. Досліджувати ШІС методом цифрового моделювання не представляє складності. Цифрова модель замкненої ШІС складається з рівняння замикання, рекурсивного рівняння безперервної частини імпульсної САУ і імпульсного елемента, що виробляє імпульси, ширина яких змінюється за законом сигналу похибки. Маючи цифрові моделі замкнених імпульсних САУ, можна досліджувати стійкість цих САУ, використовуючи, наприклад, метод D-розбиття у площині змінних параметрів системи

Значний практичний інтерес представляє дослідження нелінійних САУ розглянутим методом. Оскільки вхідний сигнал  $x[nT]$  – довільного вигляду, то легко здійснити “сполучення” різних ланок, що володіють властивістю спрямованості. Дійсно, значення вихідного сигналу  $y[nT]$  (реакції лінійної ланки на сигнал  $x[nT]$ , який має довільний вигляд) “приймаються” за

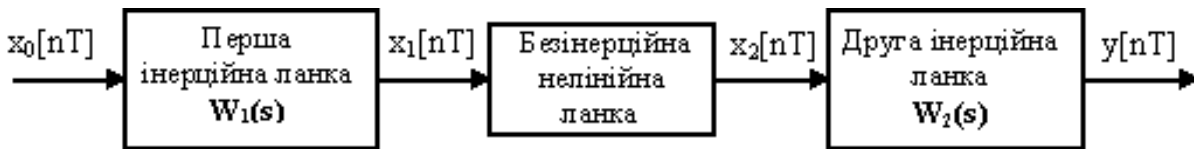


Рисунок 3 — Структурна схема розімкнутої нелінійної системи

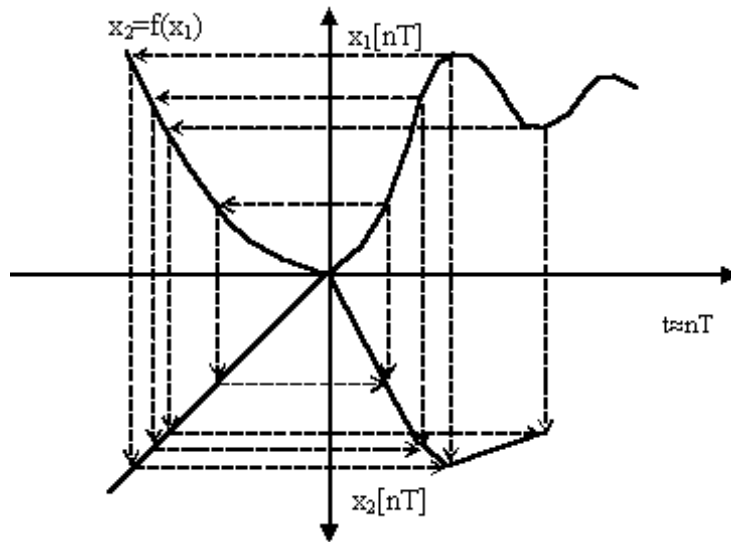


Рисунок 4 — Приклад знаходження вихідного сигналу нелінійного елемента

цифрову модель (рекурсивним рівнянням) наступної ланки і т.д. Таким чином, при послідовному з'єднанні ланок, якщо відомий сигнал на вході першої ланки, то, переходячи від ланки до ланки за допомогою рекурсивних рівнянь вигляду (1), визначається реакція послідовного з'єднання ланок на довільний вхідний сигнал. Якщо серед лінійних ланок є нелінійна ланка, то реакція такого з'єднання ланок також може бути визначена. Нелінійні ланки можуть бути безінерційними і інерційними. Безінерційна нелінійна ланка містить лише безінерційний нелінійний елемент, наприклад, нелінійний опір. Інерційна нелінійна ланка разом з безінерційним нелінійним елементом містить інерційні лінійні елементи (індуктивності, ємності), сполучені тим чи іншим чином.

Відповідно до рис. 3 спочатку визначають реакцію  $x_1[nT]$  на виході першої інерційної ланки за допомогою рекурсивного рівняння:

$$x_1[nT] = \frac{1}{B_m} \left\{ \sum_{i=0}^m A_{m-i} \cdot x_0[nT - iT] - \sum_{i=1}^m B_{m-i} \cdot x_1[nT - iT] \right\}, \quad (5)$$

де  $A_i, B_i$  – коефіцієнти, визначені через коефіцієнти  $a_i, b_i$  операторної функції передачі  $W_1(s)$  і матрицю переходу від L-перетворення до Z-перетворення. Безінерційна нелінійна ланка задається нелінійною характеристикою “вхід-вихід”  $x_2=f(x_1)$ . Є різні методи розрахунку форми сигналу на виході безінерційної нелінійної

ланки. Більш найаочним є метод “4-квадрантної діаграми”, який легко зрозуміти з рис. 4.

У першому квадранті розташована функція часу, що впливає на нелінійну ланку  $x_1(t) \approx x_1[nT]$  (сигнал, що поступає з виходу інерційної лінійної ланки 1). У другому квадранті зображена характеристика “вхід-вихід” нелінійної ланки, а в третьому квадранті побудована допоміжна пряма, розташована під кутом  $45^\circ$  до осей координат. Сигнал на виході нелінійної ланки  $x_2(t) \approx x_2[nT]$  знаходиться графічною побудовою. Порядок знаходження окремих точок шуканої функції показано стрілками. При розрахунку процесу на ЕОМ характеристика “вхід-вихід” нелінійної ланки вводиться в пам'ять машини у вигляді матриці. Машинний алгоритм визначення сигналу на виході нелінійної ланки складається відповідно до розглянутого графічного методу.

Знайдений сигнал  $x_2[nT]$  є вхідним сигналом для другої інерційної лінійної ланки. Визначення реакції цієї частини системи визначається відповідним рекурсивним рівнянням

$$y[nT] = \frac{1}{B_m} \left\{ \sum_{i=0}^m A_{m-i} \cdot x_2[nT - iT] - \sum_{i=1}^m B_{m-i} \cdot y[nT - iT] \right\}. \quad (6)$$

Розглянутий метод дозволяє розраховувати реакцію в розімкненій системі з довільною кількістю послідовно сполучених інерційних лі-

нійних ланок. При цьому значення сигналу  $x_2[nT]$  на виході нелінійної ланки знаходяться безпосередньо за виразом  $x_2 = f(x_1)$ , якщо нелінійна характеристика “вхід-вихід” задана аналітично, або за допомогою розглянутого графічного методу і матриць перерахунку, якщо нелінійна характеристика ланки задана графічно. Знайдені значення сигналу  $x_2[nT]$  на виході нелінійної ланки складають вхідний сигнал для другої інерційної лінійної ланки з функцією передачі  $W_2(s)$ .

Алгоритм дослідження процесів у замкнутій нелінійній САУ дозволяє здійснити дослідження нелінійної САУ при довільній вхідній дії  $x[nT]$  і аналізувати динамічні і статичні характеристики в різних точках замкнутої як автономної так і керованої нелінійної САУ (сигнал на виході САУ –  $y[nT]$ , сигнал похибки –  $\varepsilon[nT]$ , сигнали на виході окремих ланок –  $x_1[nT]$  і  $x_2[nT]$ ). У загальному випадку кількість як лінійних інерційних, так і нелінійних безінерційних ланок у контурі управління може бути довільною. Цей висновок витікає з розглянутого алгоритму дослідження нелінійної САУ. Значно складніше досліджувати нелінійну САУ, що містить інерційні нелінійні ланки. Загальний підхід до дослідження такий, як і в розглянутому вище випадку, але при цьому значно ускладнюється визначення реакції на виході інерційної нелінійної ланки при довільному вхідному сигналі.

Таким чином, метод цифрового моделювання може бути використаний як на етапі про-

боті порушена проблема впливу травматизму на продуктивність технологічного обладнання.

Встановлення залежності техніко-економічного критерію оцінки виробничої системи нафтогазового комплексу від показників безектування сучасних САУ та САР, так і в методичних цілях при вивченні курсів “Теорія автоматичного управління” та “Локальні системи автоматики”. При подальших дослідженнях передбачається розробити програмне забезпечення для реалізації даного алгоритму моделювання вбудованою мовою та візуальними методами сучасного програмного середовища MatLab 6.0.

### Література

1. Сав'юк Л.О. Побудова дискретних моделей лінійних неперервних систем // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. Серія: Методи та засоби технічної діагностики. – Івано-Франківськ, 2001. – Вип. 38 (том 8). – С. 160-165.
2. Щелованов Л.Н., Рассказова Е.И. Моделирование систем передачи дискретных сообщений и документальной электросвязи (системы факсимильной связи): Учеб. пособие / ЛЭИС. – Л., 1989.
3. Деч Г. Руководство к практическому применению Z-преобразования. – М.: Наука, 1971.
4. Самойленко В.И., Пузырев В.А., Грубин И.В. Техническая кибернетика. – М: МАИ, 1994.

УДК 331.46+331.472

## ВПЛИВ ВИРОБНИЧОГО ТРАВМАТИЗМУ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ У НАФТОГАЗОВІЙ ГАЛУЗІ

Я.М.Семчук

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42196, 42203  
e-mail: public@ifdtung.if.ua

*Разработано математическую модель влияния производственного травматизма на динамику производительности работы нефтегазового технологического оборудования. Принято, что характер потока случаев производственного травматизма соответствует марковскому процессу, а проставание оборудования подчиняется экспоненциальному закону. Определено загрузке одноканальной системы массового обслуживания с пуассоновским входным потоком. Приведен пример зависимости среднестатистического значения проставания технологического оборудования от уровня травматизма.*

*Mathematical model of the influence of industrial traumatism on dynamics of productivity of work of the oil – and – gas processing equipment is developed. It is accepted, that character of the stream of cases of industrial traumatism corresponds to the Markovsky's process, and equipment idle standing submits to the exponential law. Loading single-channel system of mass service with the Puasson's entrance mastream is determined. The example of dependence of average value of the process equipment idle standing on the level of traumatism is given.*

У статтях [1, 2] розглянуті основні причини, що призводять до виробничого травматизму в нафтогазовій галузі, а також основні заходи, які запобігають його виникненню. У даній ро-

пеки праці може бути здійснено за допомогою апарату теорії масового обслуговування.

Для теоретичного дослідження цього процесу необхідно використовувати діаграму роз-