

### АНАЛИЗ АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЛУЧАЙНОЙ ВЕЛИЧИНЫ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНОГЕННОГО РИСКА

Представлен алгоритм определения функции распределения случайной величины для прогнозирования вероятности отказа технических систем в режиме эксплуатации. Предложенный алгоритм основан на совместном применении индексных оценок, метода Монте-Карло и методов стохастической оптимизации, что позволяет получить закон распределения случайной величины, которая будет качественно характеризовать величину техногенного риска и позволит прогнозировать его уровень во времени.

**Ключевые слова:** прогнозирование техногенного риска, генетические алгоритмы, имитационное моделирование, количественная оценка риска.

*Вавулін Петро Андрійович, аспірант, кафедра кібернетики хіміко-технологічних процесів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна, e-mail: lestatxa81@gmail.com.*

*Бойко Тетяна Владиславівна, кандидат технічних наук, доцент, в. о. завідувача кафедри кібернетики хіміко-технологічних процесів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.*

*Вавулін Пётр Андреевич, аспирант, кафедра кибернетики химико-технологических процессов, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина.*

*Бойко Татьяна Владиславовна, кандидат технических наук, доцент, и. о. заведующего кафедрой кибернетики химико-технологических процессов, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина.*

*Vavulin Petro, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: lestatxa81@gmail.com.*

*Boiko Tatyana, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine*

УДК 681.516.3

DOI: 10.15587/2312-8372.2016.66778

Денисенко О. Ю.,  
Козаневич З. Я.

## РЕАЛІЗАЦІЯ ДИНАМІЧНИХ КОМПЕНСАТОРІВ В БАГАТОКОНТУРНИХ СИСТЕМАХ РЕГУЛЮВАННЯ

*Розглянуто деякі способи реалізації динамічних компенсаторів у багатоконтурних (в т. ч. комбінованих і автономних) системах автоматизованих систем керування технологічними процесами, які забезпечують інваріантність регулювання параметрів відносно контрольованих і неконтрольованих збурень. Проведений аналіз складності використання цих способів реалізації динамічних компенсаторів для розробки алгоритмів, на основі яких можуть бути створені окремі елементи програмного забезпечення автоматизованих чи комп'ютерно-інтегрованих систем.*

**Ключові слова:** динамічні компенсатори, багатоконтурні системи, автоматизовані системи.

### 1. Вступ

Одним із методів покращення якості перехідних процесів в автоматичних системах регулювання параметрів є введення додаткових динамічних елементів як в існуючі контури регулювання, так і в додатково синтезовані канали впливу.

Інваріантність (незалежність) регулювання параметрів відносно контрольованих чи неконтрольованих збурень досягається шляхом введення додаткових динамічних зв'язків між елементами контурів регулювання [1, 2]. Ці динамічні зв'язки, призначені для динамічної компенсації впливу збурень в контурах керування, встановлюються за допомогою динамічних компенсаторів [2], які реалізуються як стандартні елементи аналогової техніки. Можливості цифрової обчислювальної техніки в автоматизованих системах керування технологічними процесами (АСКТП) дають змогу програмної реалізації функцій динамічних компенсаторів (ДК), що спрощує та полегшує їх експлуатацію.

Актуальність роботи полягає в тому, що: по-перше, програмна реалізація функцій динамічних компенсаторів дозволяє їх включити безпосередньо в програмне забезпечення у виді підпрограм, зв'язаних інформаційними

потоками з підпрограмами реалізації відповідних регуляторів, що утворить єдину конфігурацію для конкретного виробництва; а по-друге, використання обчислювальної техніки, яка присутня в АСКТП чи комп'ютерно-інтегрованих системах (КІС), дозволяє більш точно відтворити потрібні динамічні характеристики ідеальних ДК.

### 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Звичайно розглядається технічна реалізація динамічних компенсаторів за допомогою аналогових елементів [2, 3]. Технічна реалізація динамічних компенсаторів за допомогою аналогових елементів може дати тільки приблизну інваріантність системи по відношенню до конкретного збурення в найбільш небезпечній області частот [2], оскільки методика апроксимації динамічних характеристик ідеальних ДК найбільш відомими і відносно легкими до реалізації динамічними ланками не передбачає іншого результату внаслідок різних структур ідеального і реального ДК.

Структурні схеми регулювання часто ціленаправлено ускладнюються введенням додаткових дина-

мічних ланок: або коригуючих пристроїв безпосередньо в різні місця контуру регулювання з метою покращення його динамічних характеристик [4–7], або в додатковій лінії впливу, з метою покращення динамічних характеристик системи в цілому [2, 7].

При постановці та рішенні задач інваріантності розрізняють як задачі, що ґрунтуються на принципі регулювання по відхиленню чи принципі регулювання по збуренню, так і на обох принципах (комбіновані системи). На рис. 1 наведена структурна схема інваріантної системи регулювання за відхиленням, на рис. 2 — комбінованої системи регулювання [1]. При чому для структурної схеми рис. 1 не важливе саме значення збурення  $F_3$ , важливо тільки, щоб воно було обмеженим за модулем, та визначальними є динамічні характеристики двох додаткових каналів впливу, зазначених штриховими лініями, з передатними функціями  $W_{oc}(p)$  та  $W_i(p)$  відповідно. Однак для збурень  $F_2(p)$  та  $F_1(p)$  неможливо створити два додаткові канали впливу, щоб забезпечити інваріантне від них регулювання  $x(p)$ .

Для комбінованої інваріантної системи регулювання (рис. 2) передбачається вимірювання як регульованої величини  $x(p)$ , так і збурення  $F(p)$ , вплив якого нівелюється додатковим контуром з ДК, який має передатну функцію  $W_k(p)$ .

Технічна реалізація багатоконтурних систем регулювання (інваріантних, комбінованих, автономних та ін.) полягає в реалізації динамічних ланок, які б відповідали певним ідеальним динамічним компенсаторам [2, 3].

Можливе застосування різних математичних методів для технічної реалізації динамічних ланок, ідентичних ідеальним ДК. Проблемне питання їх придатності для використання в експлуатації в складі програмного забезпечення АСКТП.

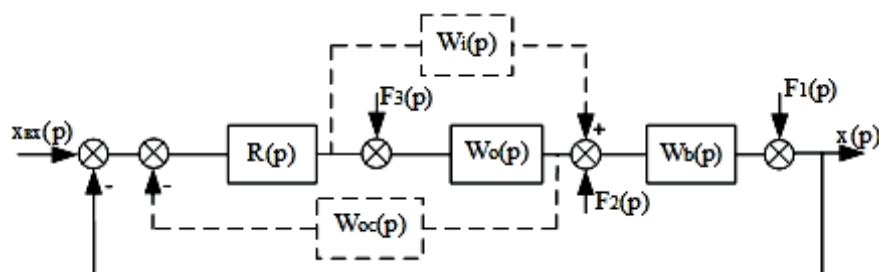


Рис. 1. Структурна схема інваріантної системи регулювання за відхиленням.  
Передатні функції:  $R(p)$  — регулятора;  $W_0(p)$  — об'єкта;  $W_b(p)$  — вимірювача;  
 $W_i(p)$  і  $W_{oc}(p)$  — зворотних зв'язків

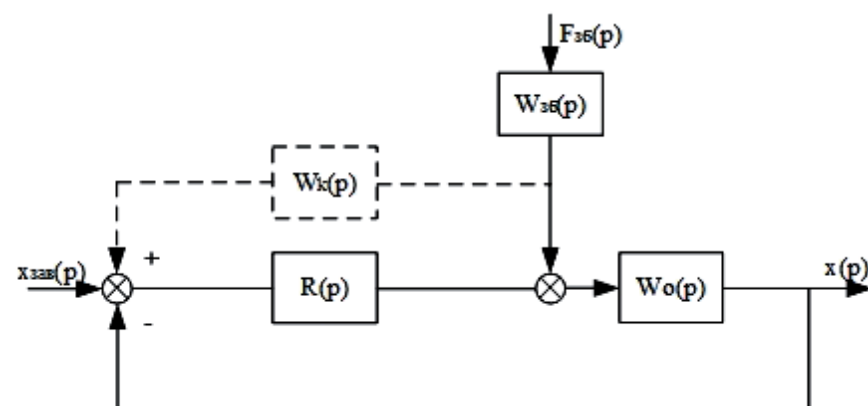


Рис. 2. Структурна схема комбінованої інваріантної системи.  
Передатні функції:  $R(p)$  — регулятора;  $W_0(p)$  — об'єкта;  $W_3(p)$  — збурення;  
 $W_k(p)$  — динамічного компенсатора

Огляд іноземних періодичних видань з проблеми, що досліджується, показує використання динамічних компенсаторів тільки для компенсації зміни динамічних характеристик об'єкта [5, 6], в тому числі для зміни стану системи керування з нестійкої в стійку [7]. Використання статичних компенсаторів в системах живлення електромережі може привести до резонансних явищ [8]. Відсутні дані по використанню і реалізації динамічних компенсаторів з метою забезпечення інваріантності регулювання параметрів у комбінованих і автономних системах.

### 3. Об'єкт, мета та задачі досліджень

Об'єкт дослідження — способи реалізації функцій ДК.

Мета дослідження полягає у виявленні способу, найбільш придатного для реалізації в АСКТП чи КІС, які працюють в режимі реального часу.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

- 1) перерахувати розглянуті способи реалізації ДК;
- 2) розглянути алгоритми, що дозволяють реалізувати кожен із способів;
- 3) вказати на показники, за якими будуть порівнюватися названі способи;
- 4) провести аналіз результатів за названими показниками.

Можливості цифрової обчислювальної техніки, використовуюваної в АСКТП, дають змогу програмної реалізації функцій ДК.

Якщо фізична реалізація ДК можлива, тоді його технічна реалізація за допомогою цифрової обчислювальної техніки можлива декількома шляхами:

— з використанням кінцево-різницевого співвідношень, які отримані в результаті представлення передатної функції ідеального динамічного компенсатора диференціальним рівнянням з наступним його перетворенням до кінцево-різницевого виду [9];

— використання формули Хевісайда [10] з представленням вхідного сигналу як гратчастої функції [9];

— з застосуванням імпульсної перехідної функції ідеального ДК та дискретного представлення інтегралу Дюамеля-Карсона [11–13].

Вибір методу технічної реалізації ДК, який би якнайкраще відповідав його використанню при наявності засобів обчислювальної техніки, що експлуатуються в режимі реального часу, зокрема в АСКТП, є метою даного дослідження.

Задачі досліджень: проаналізувати деякі способи реалізації динамічного компенсатора, а саме: на основі кінцево-різницевого рівнянь представлення його функцій, використання формули Хевісайда чи інтегралу Дюамеля-Карсона як

згортки імпульсної перехідної характеристики ДК та вхідного сигналу з точки зору порівняння можливостей їх використання в програмному забезпеченні АСКТП.

#### 4. Способи та особливості деяких методів технічної реалізації динамічних компенсаторів

Динамічні характеристики ідеальних динамічних компенсаторів (ДК), які б забезпечували інваріантне до заданих збурень регулювання технологічних параметрів визначаються у виді передатних функцій ідеальних ДК, апроксимованих відношенням поліномів:

$$W_{DK}(p) = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} \dots + b_0}{a_n p^n + b_{n-1} p^{n-1} \dots + a_0} = \frac{B(p)}{A(p)}, \quad (1)$$

де  $a$  і  $b$  — коефіцієнти поліномів,  $m$  і  $n$  — порядок поліномів чисельника і знаменника ( $n > m$ ).

##### 4.1. Використання кінцево-різницевого співвідношень.

Використання кінцево-різницевого співвідношень [9], які відповідають передатним функціям ідеальних ДК, для їх програмної реалізації коректне тому, що постійні часу реальних технологічних об'єктів керування хіміко-технологічних процесів на декілька порядків більші за період квантування вхідних сигналів при їх дискретизації для вводу в АСКТП.

Передатна функція (1) відповідає лінійному диференційному рівнянню у відхиленнях від стаціонарного режиму вхідної  $x(t)$  і вихідної  $y(t)$  величин ДК:

$$\begin{aligned} a_n y^{(n)}(t) + a_{n-1} y^{(n-1)}(t) + \dots + a_0 y(t) &= \\ = b_m x^{(m)}(t) + b_{m-1} x^{(m-1)}(t) + \dots + b_0 x(t), \end{aligned} \quad (2)$$

яке, після, перетворення за Лапласом змінної часу  $t \rightarrow p$  при нульових початкових умовах дає поліноміальну залежність:

$$\begin{aligned} (a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_0) y(p) &= \\ = (b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_0) x(p), \end{aligned} \quad (3)$$

де  $x(p)$  та  $y(p)$  — відповідно перетворені за Лапласом відхилення вхідної та вихідної величин ДК при нульових початкових умовах.

Для переходу до кінцево-різницевої форми рівняння (2) замінюють похідні на відповідні приблизні різниці дискретних значень  $x(t)$  та  $y(t)$ , взятих в  $i$ -ті моменти часу з періодом  $\tau$ , тобто при  $t = i\tau$ :

$$\begin{aligned} y^{(1)}(t) &\approx \frac{(y_i - y_{i-1})}{\tau}, \\ y^{(2)}(t) &\approx \frac{(y_i - 2y_{i-1} + y_{i-2})}{\tau^2}, \\ y^{(3)}(t) &\approx \frac{(-y_i + 3y_{i-1} - 3y_{i-2} + y_{i-3})}{\tau^3}, \end{aligned} \quad (4)$$

і т. д., аналогічно для  $x(t)$ .

Таким чином рівняння (2) перейде в кінцево-різницеву форму, вирішивши яке відносно  $y_i$ , отримаємо рекурентне співвідношення для вихідної величини в  $i$ -й момент часу як функцію елементів часових рядів вхідних і вихідних величин ДК в попередні дискретні їх відліки періодичністю  $\tau$ :

$$\begin{aligned} y_i &= c_1 y_{i-1} + c_2 y_{i-2} + \dots + \\ &+ c_n y_{i-n} + d_1 x_{i-1} + d_2 x_{i-2} + \dots + d_m x_{i-m}, \end{aligned} \quad (5)$$

де коефіцієнти  $c_1, \dots, c_n$  та  $d_1, \dots, d_m$  визначаються через коефіцієнти  $a_n, \dots, a_0$  та  $b_m, \dots, b_0$ .

Співвідношення (5) можна використати для реалізації ДК програмним шляхом на основі часових рядів вхідних і вихідних величин ДК в попередні моменти часу довжиною  $m\tau$  та  $n\tau$  відповідно.

Складність використання цього способу полягає в правильності вибору часу квантування  $\tau$ , яке залежатиме у великій мірі від частотних характеристик вхідного сигналу ДК та неточності формул (4), особливо при великих значеннях показника  $n$ . Метод вимагає зберігання двох різних часових рядів в стековій пам'яті. Крім того, початковий «час наладки» до використання ДК, що працює за цим методом, залежатиме від величини  $n\tau$ , що може бути істотним.

Переваги — у достатній простоті реалізації відповідного алгоритму.

**4.2. Використання формули Хевісайда.** Використання формули Хевісайда [10] пов'язане з одержанням з передатної функції (1) зображення вихідної величини  $y(p)$  як функції зображення вхідної величини  $x(p)$  при одиничному скачку ( $x(p) = 1/p$ ), тобто:

$$y(p) = \frac{B(p)}{A(p)} x(p) = \frac{B(p)}{pA(p)}. \quad (6)$$

З наступним зворотнім перетворенням за Лапласом змінної  $p \rightarrow t$  та отриманням бажаного виразу для вихідної величини ДК:

$$y(t) = L^{-1} \left[ \frac{B(p)}{pA(p)} \right]. \quad (7)$$

Вираз (6) спочатку приводять до вигляду, зручного для здійснення перетворення (7). Для цього спочатку знаходять корені характеристичного рівняння  $A(p) = 0$ , а потім представляють вираз (6) як суму наступних дробів:

$$y(p) = \frac{B(p)}{pA(p)} = \frac{A_0}{p} + \frac{A_1}{p-p_1} + \dots + \frac{A_n}{p-p_n}. \quad (8)$$

Якщо корені  $p_1, p_2, \dots, p_n$  — різні дійсні числа, то коефіцієнти  $A_0, A_1, \dots, A_n$  знаходяться за поліномами  $A(p)$  і  $B(p)$  за формулами:

$$A_0 = \frac{B(0)}{A(0)}, \dots, A_i = \frac{B(p_i)}{p_i A'(p_i)}, \quad (9)$$

де  $i$  — номер кореня характеристичного рівняння.

Підставивши значення коефіцієнтів  $A_0, A_1, \dots, A_n$  в (8) та виконавши зворотнє перетворення за Лапласом, отримаємо формулу Хевісайда, яка дає вихідну величину ДК при вхідній одиничній скачкоподібній величині  $x(t) = 1(t)$ :

$$y(t) = \frac{B(0)}{A(0)} + \sum_{i=1}^n \frac{B(p_i)}{p_i A'(p_i)} e^{p_i \cdot t}. \quad (10)$$

Оскільки формула Хевісайда отримана для одиничного скачкоподібного входу, то для її використання для реалізації ДК треба виконати декілька операцій:

- попередньо представити вхідну величину  $x(t)$  як гратчасту функцію  $x(k)$  у вигляді відліків вхідного сигналу через постійні проміжки часу  $\tau$ , тобто для  $t = k\tau$ ;
- утворити послідовність перших різниць  $\Delta x(k)$  гратчастої функції  $x(k)$  для використання формули Хевісайда як послідовності скачкоподібних входів;
- застосувати формулу Хевісайда до кожного елементу послідовності перших різниць  $\Delta x(k)$ , утворивши множину послідовностей  $y_k(t)$ ;
- сформулювати суму впливів усіх  $\Delta x(k)$  на вихід ДК з врахуванням зсуву в часі кожного наступного  $y_k(t)$ , яка і буде виходом ДК  $y(t)$ :

$$y(t) = \sum_{k=1}^k y_k(t). \quad (11)$$

Алгоритм використання цього способу дещо ускладнений в порівнянні з попереднім.

Крім того, формула Хевісайда отримана для випадку, коли всі корені характеристичного рівняння різні, навіть і комплексні. Для кратних коренів [10] цей спосіб не можна використовувати.

Як видно з наведеного алгоритму, застосування цього способу вимагає зберігання в пам'яті значень компонентів вихідної величини на теоретично безкінченному інтервалі часу, що для АСКТП є неприпустимим.

#### 4.3. Застосування імпульсної перехідної функції ДК.

Застосування імпульсної перехідної функції ДК [11] для наступної його технічної реалізації впливає з представлення ДК як динамічної ланки з передатною функцією  $W_{DK}(p)$ , для якої:

$$y(p) = W_{DK}(p) \cdot x(p), \quad (12)$$

де  $x(p)$  та  $y(p)$  — зображення вхідної та вихідної величин відповідно.

Якщо зображення величини представлено добутком зображень двох інших величин, то згідно з теоремою згортки оригінал такої величини є згортокою оригіналів цих двох величин. Оригіналом  $W_{DK}(p)$  є імпульсна перехідна функція  $g(t)$ , а  $x(p)$  — вхідна величина  $x(t)$ . Тоді згідно інтегралу Дюамеля-Карсона:

$$y(t) = \int_0^t x(\tau)g(t-\tau)d\tau, \quad (13)$$

де  $\tau$  — змінна інтегрування.

При зміні порядку інтегрування і враховуючи, що для реальних об'єктів  $g(\tau) = 0$  при  $0 > \tau$ , а також обмеженість «пам'яті ДК» часом  $\tau_{\max}$ , тобто  $g(\tau) = 0$  при  $\tau > \tau_{\max}$  рівняння (13) стане:

$$y(t) = \int_0^{\tau_{\max}} g(\tau)x(t-\tau)d\tau. \quad (14)$$

Рівняння (14) може бути використаним для реалізації ДК в багатоконтурних системах керування АСКТП. Для цього його потрібно привести до дискретного виду, замінивши інтеграл сумою, а неперервні функції — їх дискретними відліками через інтервал часу  $\Delta t$ :  $t = i\Delta t$ .

Квантування імпульсної перехідної функції  $g(t)$  відбувається з тим же періодом часу  $\Delta t$ . Тоді формула (14) набуває дискретного виду:

$$y(i \cdot \Delta t) = \sum_{n=1}^s g(n) \cdot x(i-n)\Delta t, \quad (15)$$

де  $s = \text{Int}(\tau_{\max}/\Delta t)$ , тобто кількість відліків  $g(\tau)$  на інтервалі  $(0, \tau_{\max})$ , а  $i$  — поточний номер значення часу.

Алгоритм використання цього способу полягає в формуванні та обчисленні інтегралу згортки імпульсної перехідної функції ДК та вхідної величини, взятої на інтервалі часу від  $t$  до  $(t - \tau_{\max})$  і є достатньо простим для реалізації ДК в АСКТП.

Використання інтегралу Дюамеля-Карсона можливо для ДК, дійсні частини коренів яких мають від'ємне значення, тобто коли величиною ординат імпульсної перехідної функції ДК  $g(t)$  при  $t > \tau_{\max}$  можна нехтувати (час «пам'яті ДК»).

Похибка переходу від інтегральної (14) до дискретної (15) форми інтегралу Дюамеля-Карсона визначається частотними характеристиками передатної функції ДК  $W_{DK}(j\omega)$  і вхідної величини  $x(j\omega)$ , а також часом квантування  $\Delta t$ .

Використання цього способу вимагає зберігання в пам'яті  $s$  ординат  $g(t)$ , а також в стековій пам'яті  $s$  дискретних відліків вхідної величини  $x_{(i-n)}$  для  $n = 1, 2, \dots, s$ .

Будучи виконаним у вигляді підпрограми, цей спосіб можна використовувати для реалізації як ДК, так і різних коригуючих ланок [5] в контурі регулювання.

## 5. Обговорення особливостей різних способів реалізації ДК

Оцінювати особливості кожного з наведених способів технічної реалізації ДК для використання їх в АСКТП можна за наступними показниками:

1. Кількості параметрів, що підлягають збереженню до наступного часового кроку.
2. Складності попередньої підготовки даних до використання способу в режимі реального часу.
3. Складності самого способу використання в режимі реального часу.

Якщо 1-й показник ще можна якось кількісно оцінити за величинами  $n$  і  $m$  (1), то показники 2 і 3 у великій мірі носять суб'єктивний характер, залежать від досвідченості програміста і їх можна оцінити тільки якісно.

Хотілося б ще додати «точність отриманого результату», тобто точність розрахунку вихідної величини ДК за відповідним алгоритмом, але вона істотно залежить

від часу квантування  $\Delta t$ , яка в свою чергу визначається частотним спектром вхідної величини  $x(t)$ , про який відомо тільки, що він знаходиться в області низьких частот (до  $1 \text{ с}^{-1}$ ) оскільки всі хіміко-технологічні об'єкти, — а автори статті ними займаються, — є низько-частотними.

Усі три способи приводять до ітеративних процедур, де вихідна величина ДК визначатиметься певною кількістю величин, які або вже застосовувалися на попередніх кроках, або були вихідною величиною на попередніх кроках (часових інтервалах).

Оцінимо способи за п. п. 4.1, 4.2 і 4.3 з точки зору показників 1, 2, 3.

**Показник 1.** Спосіб 4.1 вимагає зберігання  $(n+1)$  попередніх дискретних значень вихідної величини  $y(t)$  та  $(m+1)$  попередніх дискретних значень вхідної величини  $x(t)$  в стековій пам'яті та  $(m+n)$  постійних коефіцієнтів.

Спосіб 4.2. Якщо допустити, що період квантування в цьому способі і способі 4.3 однакові, а також час «пам'яті ДК» відповідає максимальному часу, після якого можна нехтувати усіма доданками суми в формулі (10), тобто при  $t > s\Delta t$ , то можна оцінити наступні обсяги пам'яті:  $(n+m)$  коефіцієнтів та  $n$  коренів з формули (10) і  $n$  стекових послідовностей, кожна з яких довжиною  $s$  значень з перших різниць гратчастої функції  $x(k)$  вхідної величини.

Спосіб 4.3. Цей спосіб вимагає лишень  $s$  ординат імпульсної перехідної функції та  $s$  дискретних значень вхідної величини в стековій пам'яті в попередні проміжки часу.

За цим показником за загальним обсягом пам'яті перевага за способом 4.1, гірше — спосіб 4.3 і на останньому місці — спосіб 4.2.

**Показник 2.** За цим показником найпростіший спосіб 4.3, складніший — спосіб 4.1 і найбільше попередньої підготовки вимагає спосіб 4.2.

**Показник 3.** Одну стекову послідовність вимагає спосіб 4.3, тому він виглядає найпростішим, більшу кількість стекових послідовностей — 2 — передбачає спосіб 4.1 і найважчим в організації циклів і за кількістю стекових послідовностей є спосіб 4.2.

Виходячи з цього аналізу, перевагу за наведеними показниками має спосіб 4.3 — з використанням імпульсної перехідної функції ДК як ядра згортки інтегралу Дюамеля-Карсона.

На користь використання цього способу свідчить і застосування аналогічних алгоритмів при обчисленні поточних значень різних показників виробництва в АСКТП [2], особливо коли ці показники використовуються як цільові функції при управлінні технологічними процесами. Це дасть змогу уніфікувати елементи програмного забезпечення, тобто виконати один з основних принципів побудови АСКТП.

Дослідження різних способів та їх порівняння корисне хоча б тому, що дає можливість вибрати найкращий з них при конкретній постановці задачі розробки ДК для конкретних умов експлуатації. Застосування результатів корисне для встановлення способу реалізації ДК в умовах конкретної АСКТП чи КІС. Авторами статті раніше цей напрямок не розглядався. Для подальших досліджень залишаються відкритими питання точності відтворення динамічних характеристик ідеального ДК з врахуванням способів їх отримання.

## 6. Висновки

У результаті проведених досліджень:

- 1) запропоновані три можливі способи реалізації ДК;
- 2) розглянуті алгоритми, що дозволяють реалізувати ці способи;
- 3) сформульовані і охарактеризовані показники, за якими оцінюються ці способи;
- 4) зроблено висновок про те, що один із трьох розглянутих способів, а саме використання імпульсної перехідної функції ДК для формування інтегралу Дюамеля-Карсона з подальшим його застосуванням для реалізації ДК в АСКТП чи КІС, визнається привабливим як з точки зору простоти алгоритму, так і можливості уніфікації програмного забезпечення цих систем.

## Література

1. Глушков, В. М. Энциклопедия кибернетики [Текст]: у 2 т. / В. М. Глушков, Н. М. Амосов, И. А. Артеменко и др.; под ред. В. М. Глушкова. — К.: УСЭ, 1974. — Т. 1. — 608 с.
2. Дудников, Е. Г. Автоматическое управление в химической промышленности [Текст]: учебник для вузов / А. В. Казаков, Ю. Н. Софиева и др.; под ред. Е. Г. Дудникова. — М.: Химия, 1987. — 368 с.
3. Трегуб, В. Г. Автоматизация технологических процессов та виробництва [Текст]: метод. / уклад.: В. Г. Трегуб, М. С. Глушенко, Є. С. Проскурка. — К.: НУХТ, 2013. — 44 с.
4. Бунке, О. С. Автоматизация процессов керування інерційними контурами котлоагрегата теплової електростанції з використанням методу динамічної корекції [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.07 / О. С. Бунке. — Київ, 2014. — 168 с.
5. Dorf, R. C. Modern control systems [Text] / R. C. Dorf, R. H. Bishop. — Ed. 9. — NJ: Prentice-Hall, Upper Saddle River, 2001. — 831 p.
6. Nayak, O. B. Dynamic performance of static and synchronous compensators at an HVDC inverter bus in a very weak AC system [Text] / O. B. Nayak, A. M. Gole, D. G. Chapman, J. B. Davies // IEEE Transactions on Power Systems. — 1994. — Vol. 9, № 3. — P. 1350–1358. doi:10.1109/59.336131
7. Jianwei, F. The design of compensators for telecontrol system based on network [Text] / F. Jianwei, W. Qi, C. Wei, Y. Duwei // 2008 IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems. — Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE), 2008. — P. 104–107. doi:10.1109/iccis.2008.4694786
8. Kowalak, R. Computer-aided analysis of resonance risk in power system with Static Var Compensators [Text] / R. Kowalak // PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY. — 2016. — Vol. 1, № 3. — P. 22–27. doi:10.15199/48.2016.03.05
9. Жученко, А. І. Спеціальні розділи математики для дослідження комп'ютерних систем [Текст]: навч. посіб. / А. І. Жученко, Л. Д. Ярошук. — К.: ІВЦ «Видавництво «Політехніка», 2002. — 208 с.
10. Остапенко, Ю. О. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів керування [Текст]: підруч. / Ю. О. Остапенко. — К.: НТУУ «КПІ», 1999. — 424 с.
11. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического регулирования [Текст] / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. — М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1972. — 768 с.
12. Мышкис, А. Д. Элемент теории математических моделей [Текст] / А. Д. Мышкис. — 3-е изд., испр. — М.: Ком-Книга, 2007. — 192 с.
13. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи [Текст]: учеб. / Л. А. Бессонов. — 7-е изд., перераб. и доп. — М.: Высшая школа, 1978. — 528 с.

**РЕАЛИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ КОМПЕНСАТОРОВ  
В МНОГОКОНТУРНЫХ СИСТЕМАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ**

Рассмотрены некоторые способы реализации динамических компенсаторов в многоконтурных (в т. ч. комбинированных и автономных) систем, автоматизированных систем управления технологическими процессами, обеспечивающими инвариантность регулирования параметров относительно контролируемых и неконтролируемых возмущений. Проведен анализ сложности использования этих способов реализации динамических компенсаторов для разработки алгоритмов, на основе которых могут быть созданы отдельные элементы программного обеспечения автоматизированных или компьютерно-интегрированных систем.

**Ключевые слова:** динамические компенсаторы, многоконтурные системы, автоматизированные системы.

---

*Денисенко Олексій Юрійович, кафедра автоматизації хімічних виробництв, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна, e-mail: alexdenisenko94@gmail.com.*

*Козаневич Звенислава Ярославівна, кандидат технічних наук, доцент, кафедра автоматизації хімічних виробництв, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна, e-mail: dkozanevych@yahoo.com.*

---

*Денисенко Олексій Юрійович, кафедра автоматизації хімічних виробництв, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.*

*Козаневич Звенислава Ярославівна, кандидат технічних наук, доцент, кафедра автоматизації хімічних виробництв, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.*

---

*Denysenko Oleksiy, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: alexdenisenko94@gmail.com.*

*Kozanevych Zvenyslava, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: dkozanevych@yahoo.com*