

11. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. — М. : Техносфера, 2006. — 1070 с.
12. Кобозева А. А. Анализ информационной безопасности / А. А. Кобозева, В. А. Хорошко. — К. : ГУИКТ, 2009. — 251 с.

Unauthorized changes of the digital image require its subsequent saving in some file format which may be different from the original one. The detection of the re-saving image from one format to another is an indirect indication of its integrity violation. The method of separating digital images that originally saved in lossless format from images that were re-saved in lossless from lossy format was developed. The proposed method based on analysis of the normalized vector of singular values and left (right) singular vectors, corresponding to the maximal singular value, of blocks of image matrix. The developed method can be used independently as well as an integral part of the steganalysis process.

**Key words:** *digital image, lossy compression, lossless compression, integrity violations, singular values.*

Отримано: 20.10.2017

УДК 004.94

**А. М. Божок**, канд. техн. наук\*,  
**В. А. Іванюк**, канд. техн. наук\*\*,  
**В. В. Понеділок**, старший викладач\*\*

\*м. Кам'янець-Подільський,

\*\*Кам'янець-Подільський національний університет  
імені Івана Огієнка, м. Кам'янець-Подільський

## **АПАРАТНО-ОРІЄНТОВАНИЙ РЕГУЛЯРИЗАЦІЙНИЙ МЕТОД ДИФЕРЕНЦІЮВАННЯ СИГНАЛІВ**

У статті запропоновано апаратно-орієнтований метод диференціювання сигналів на основі регуляризаційного оператора. Наведено принципову схему корегуючого гідропневматичного пристрою та рекомендації щодо його проектування за допомогою розглянутого методу. На основі обчислювальних експериментів досліджено ефективність регуляризаційного методу та вплив величини завади на отриманий розв'язок.

**Ключові слова:** *чисельне диференціювання, відновлення сигналів, передатна функція, Matlab, регуляризація, гідропневматичний корегуючий пристрій.*

**Вступ.** Операції цифрового диференціювання в алгоритмах керування сучасними технічними системами використовуються досить широко в зв'язку з активним впровадженням цифрових технічних засобів. Операції чисельного диференціювання застосовуються, як в традиційних регуляторах, так і при реалізації більш складних законів регулювання, наприклад, в системах зі змінною структурою, при реалізації оптималь-

них і адаптивних законів керування [1]. З іншої сторони, використання цифрових диференціюючих пристроїв в системах неелектричного типу порівняно складно, та не завжди економічно виправдано. Тому розробка апаратно-орієнтованих методів диференціювання, які б дозволяли достатньо точно із забезпеченням стійкості до завад виконувати диференціювання сигналів є актуальною задачею.

**Метою** статті є розробка апаратно-орієнтованих регуляризаційних методів диференціювання зашумлених сигналів.

**Регуляризаційна модель коригуючих пристроїв.** Задача полягає в диференціюванні сигналу  $y(t)$  в умовах наявності завад. Основна складність — нестійкість розв'язку  $x(t) = y'(t)$ , який проявляється внаслідок наявності шумів у вихідному сигналі. Оскільки задача чисельного диференціювання зашумленого сигналу  $y(t)$  відноситься до класу некоректно поставлених задач [9], то традиційний підхід при розв'язуванні таких задач базується на використанні наближених методів, зокрема, на застосуванні методів регуляризації [9] при розв'язуванні інтегрального рівняння

$$\int_0^t x(\tau) d\tau = y(t) - y_0. \quad (1)$$

Без зменшення загальності вважатимемо  $y_0 = 0$ .

Згідно [9] замість (1) можна розв'язувати інтегральне рівняння Вольтерри другого роду

$$\alpha x(t) + \int_0^t x(\tau) d\tau = y(t), \quad (2)$$

де  $\alpha$  — параметр регуляризації.

У результаті застосування перетворення Лапласа отримаємо

$$\alpha x(s) + \frac{1}{s} x(s) = y(s), \quad (3)$$

де  $s$  — змінна Лапласа. Виразивши  $x(s)$  через  $y(s)$  матимемо

$$x(s) = \frac{s}{\alpha s + 1} y(s). \quad (4)$$

Шляхом еквівалентних перетворень зведемо (4) до вигляду:

$$x(s) = \left( A + \frac{B}{Cs + 1} \right) y(s). \quad (5)$$

Застосування методу невизначених коефіцієнтів до (4) і (5) призводить до наступних залежностей:

$$\frac{s}{\alpha s + 1} = A + \frac{B}{Cs + 1},$$

$$\frac{s}{\alpha s + 1} = \frac{ACs + A + B}{Cs + 1},$$

звідки отримуємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} 1 = AC, \\ 0 = A + B, \\ \alpha = C. \end{cases}$$

Розв'язавши дану систему отримаємо, що:

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{\alpha}, \\ B &= -\frac{1}{\alpha}, \\ C &= \alpha. \end{aligned} \tag{6}$$

Підставивши (6) в (5) матимемо

$$x(s) = \left( \frac{1}{\alpha} + \frac{-\frac{1}{\alpha}}{\alpha s + 1} \right) y(s). \tag{7}$$

Структурна схема моделі (7) побудована в Simulink приведена на рис. 1. Як бачимо, корегуючу диференціюючу ланку можна отримати шляхом паралельного з'єднання ланки підсилення із коефіцієн-

том  $\frac{1}{\alpha}$  та інерційної ланки  $\frac{-\frac{1}{\alpha}}{\alpha s + 1}$ .

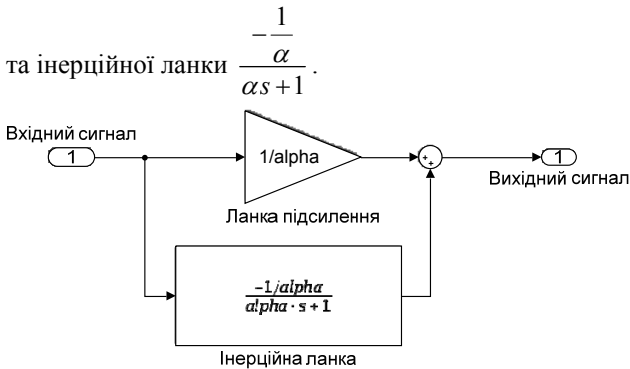


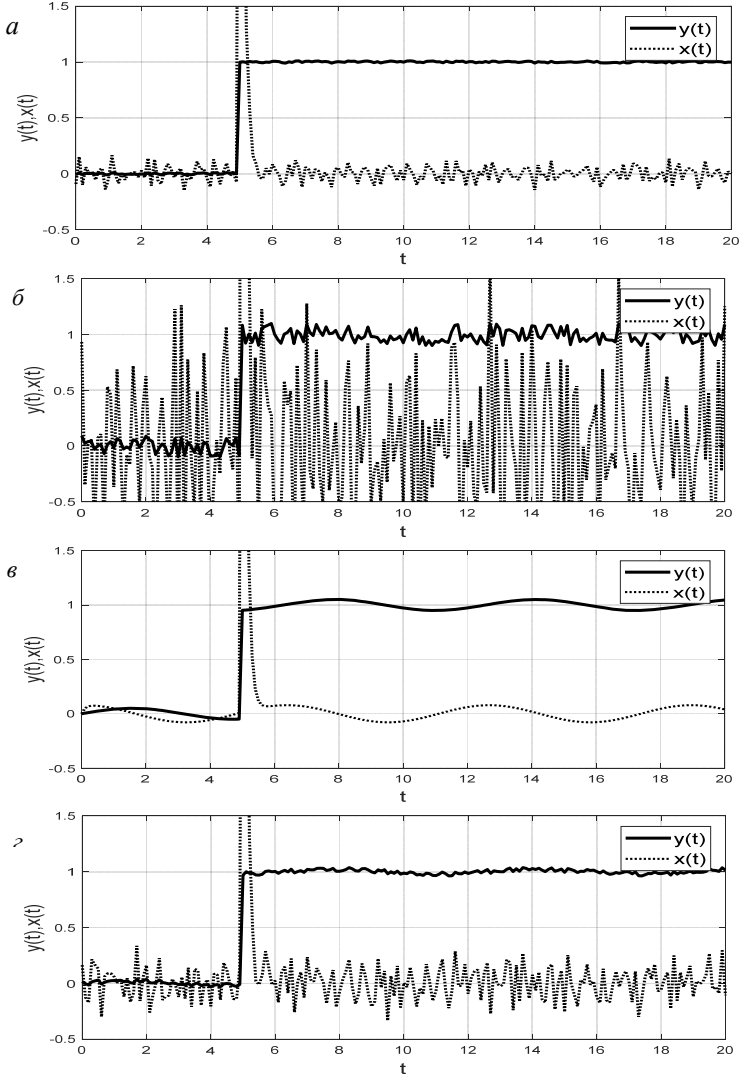
Рис. 1. Структурна схема оператора (7)

**Обчислювальні експерименти.** Для дослідження точності диференціювання сигналів на основі застосування оператора (7) в середовищі Matlab/Simulink проведено ряд обчислювальних експериментів. Вхідний сигнал визначено у вигляді функції

$$y(t) = 1(t-5) + \eta(t),$$

де  $1(t-5)$  — одиничний стрибок,  $\eta(t)$  — шум.

На рис. 2 наведено вхідний сигнал та результат чисельного диференціювання функції  $1(t-5)$  із накладанням різних шумів при  $\alpha = 0.1$ . На рис. 2.а зображено результат диференціювання із накладанням 1% шуму, на рис. 2.б — 10% шуму, на рис. 2.в — синусіoidalного 5% шуму, на рис. 2.г — синусіoidalного та білого 5% шуму.



**Рис. 2.** Вхідний сигнал (—) та результат чисельного диференціювання (-·-·-·-) функції  $1(t-5)$  при  $\alpha = 0.1$

На рис. 3 наведено вхідний сигнал та результат чисельного диференціювання функції  $1(t-5)$  із накладанням шуму при  $\alpha = 0.5$ . На рис. 3.а зображено результати диференціювання із накладанням 1% шуму, на рис. 3.б — 10% шуму, на рис. 3.в — синусиїдального 5% шуму, на рис. 3.г — синусиїдального та білого 5% шуму.

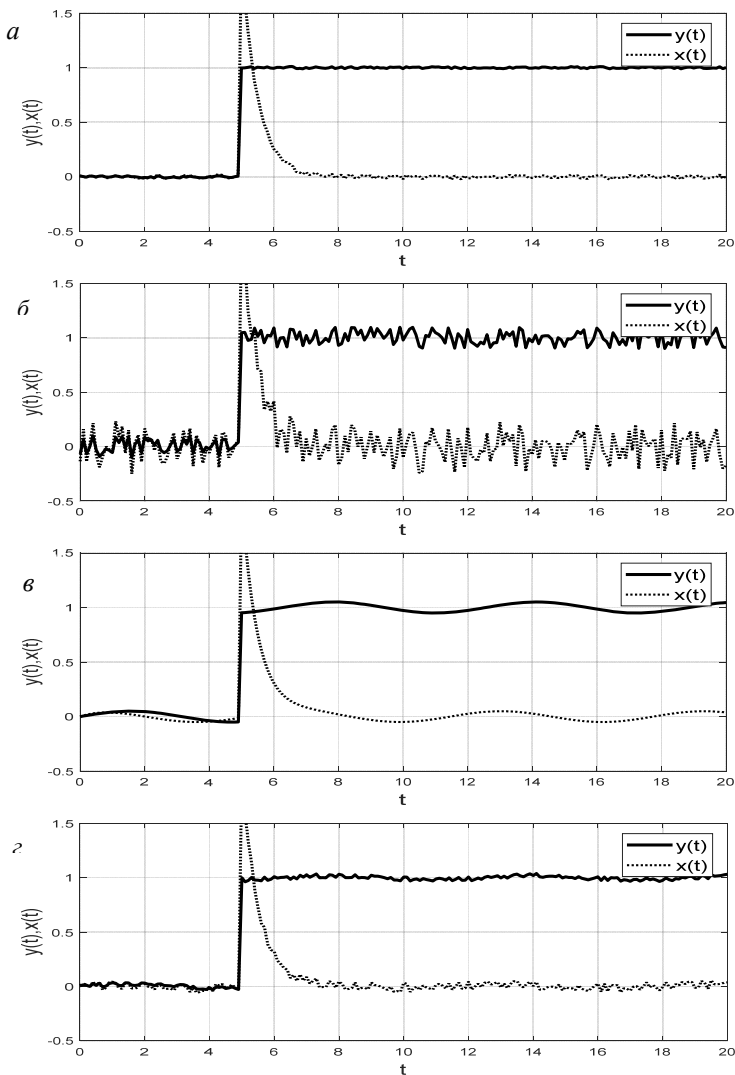


Рис. 3. Вхідний сигнал (—) та результат чисельного диференціювання (.....) функції  $1(t-5)$  при  $\alpha = 0.5$

Обчислювальні експерименти показали, що запропонований метод дозволяє ефективно виконувати диференціювання зашумлених сигналів. Якість отриманих результатів залежать від параметра регуляризації  $\alpha$ , причому спостерігається пряма залежність: при збільшенні шуму у вхідному сигналі необхідно збільшувати параметр  $\alpha$ . В той же час, при збільшенні  $\alpha$ , збільшується час виходу перехідного процесу на усталений режим.

**Пристрій для диференціювання сигналів.** Апаратну реалізацію диференціюючого пристрою керування шляхом паралельного з'єднання підсилювальної і інерційної ланок здійснено в конструкції, яка зображена на рис. 4. Запропонований диференціюючий пристрій містить: 1 — вузол приймання вхідних сигналів, 2, 9, 11 — сильфони, 3, 10, 14 — рухомі фланці, 4, 13 — циліндричні направляючі, 5, 12 — нерухомі фланці, 6 — трубопровід, 7 — перетворювач, 8 — дросель, 15, 17 — тяги, 16 — пружина, 18 — підсумовуючий важіль.

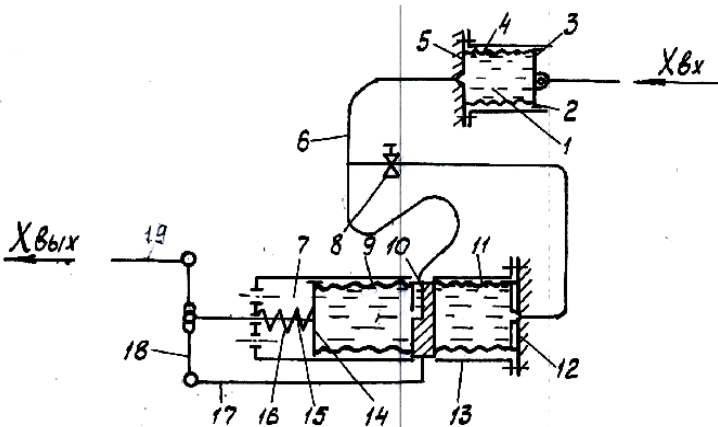


Рис. 4. Принципова схема пристрою для диференціювання сигналів

Пристрій працює наступним чином. У випадку різкої зміни сигналу  $X_{вх}$  через наявність дроселя 8 тиск в сильфоні 11 зростає повільніше, ніж в сильфоні 9. В результаті фланець 10 відносно фланця 12, рухається вліво з деякою затримкою, переміщуючи з собою через тягу 18 нижню частину підсумовуючого важеля 18 і додатково переміщуючи його вихідну частину з тягою 19. Крім того, фланець 14 сильфона 9, що з'єднаний з підсумовуючим важелем 18, в середній його частині також рухається вліво і переміщує його вихідну частину. В результаті на вихідній частині важеля 18 додається два переміщення, тобто сигнал  $X_{вих}$  пристрою складається з переміщення, що викликане зміною вхідного сигналу, та переміщення, що зумовлене

швидкістю зміни вхідного сигналу. У даному випадку пристрій працює як підсилювально-диференціююча ланка.

Передатна функція наведеного пристрою має вигляд суми двох передатних функцій:

$$W(p) = W_1(p) + W_2(p). \quad (8)$$

Інерційна ланка має вигляд:

$$W_1(p) = \frac{K_1}{T_1 s + 1},$$

де  $K_1$  — коефіцієнт інерційної ланки, що характеризує підсилення пристрою по каналу до сильфону 9,  $T_1$  — постійна часу інерційної ланки, яка визначається, як  $T_1 = \frac{\nu}{C_{np} + C_9}$ , де  $\nu$  — коефіцієнт гідравлічного демпфування,  $C_{np}$  і  $C_9$  — відповідно жорсткості пружини 16 і матеріалу стінок сильфону 9.

Ланка підсилення описується передатною функцією:

$$W_2(p) = K_2,$$

де  $K_2$  — коефіцієнт підсилення пристрою по каналу до сильфону 11.

Як бачимо, отримана передатна функція (8), яка описує корегуючий гідропневматичний пристрій, співпадає з моделлю (7). При проектуванні даного пристрою необхідно передбачити, щоб всі фізичні параметри, які характеризують пристрій, прямували до параметрів математичної моделі, тобто,  $K_1 \rightarrow -\frac{1}{\alpha}$ ,  $T_1 \rightarrow \alpha$ ,  $K_2 \rightarrow \frac{1}{\alpha}$ . Параметр  $\alpha$  необхідно

підібрати із врахуванням узагальненого показника «складність фізичної реалізації / необхідна точність диференціювання».

Аналогічно до вказаного прикладу можна побудувати і інші технічні реалізації диференціаторів, зокрема, гідропневматичний диференціатор [2], диференціюючий пристрій систем автоматики неелектричного типу [3], пружинний диференціатор теплових сигналів [4], діафрагмовий пневматичний диференціатор [5], диференціатор крутного моменту [6], диференціатор гідропневмомеханічних сигналів [7], пневматичний диференціатор [8].

**Висновки.** Запропонований апаратно-орієнтований регуляризаційний метод диференціювання сигналів та побудований на основі нього оператор дає змогу в реальному часі виконувати диференціювання зашумлених сигналів. Наведено рекомендації, щодо підбору регуляризаційного параметру, які дозволяють підвищити ефективність проектування диференціюючих пристроїв неелектричних сигналів.

### Список використаних джерел:

1. Методы и устройства интерпретации экспериментальных зависимостей при исследовании и контроле энергетических процессов / А. Ф. Верлань, Б. Б. Абдусатаров, А. А. Игнатченко, Н. А. Максимович. — К. : Наук. думка, 1993. — 208 с.
2. Божок А. М. Патент України на корисну модель UA 100200 U, G06G 5/00. Пристрій для диференціювання сигналів / А. М. Божок, В. В. Понеділок. — № u201501526; заявл. 23.02.2015; опубл. 10.07.2015. — Бюл. № 13/2015.
3. Божок А. М. Патент України на корисну модель UA 101652 U, G06G 5/00, G05B 6/00. Диференціюючий пристрій систем автоматики неелектричного типу / А. М. Божок, В. В. Понеділок. — № u201502781; заявл. 27.03.2015; опубл. 25.09.2015. — Бюл. № 18/2015.
4. Божок А. М. Патент України на корисну модель UA 102721 U, G06G 5/00. Пружинний диференціатор теплових сигналів / А. М. Божок, В. В. Понеділок. — № u201506174; заявл. 22.06.2015; опубл. 10.11.2015. — Бюл. № 21.
5. Божок А. М. Патент України на корисну модель UA 115387 U, G06G 5/00. Діафрагмовий пневматичний диференціатор / А. М. Божок, В. В. Понеділок. — № u201611761; заявл. 21.11.2016; опубл. 10.04.2017. — Бюл. № 7.
6. Божок А. М. Патент України на корисну модель UA 118947 U, G12B 3/02. Диференціатор крутного моменту / А. М. Божок, В. В. Понеділок. — № u201703188; заявл. 03.04.2017; опубл. 28.08.2017. — Бюл. № 6.
7. Божок А. М. Патент України на корисну модель UA 62175 U, G06G 5/00. Диференціатор гідропневмомеханічних сигналів / А. М. Божок, В. В. Понеділок. — № u201103036; заявл. 15.03.2011; опубл. 10.08.2011. — Бюл. № 15.
8. Божок А. М. Патент України на корисну модель UA 81360 U, G06G 5/00. Пневматичний диференціатор / А. М. Божок, В. В. Понеділок. — № u201300828; заявл. 24.01.2013; опубл. 25.06.2013. — Бюл. № 12.
9. Тихонов А. Н. Методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. — М. : Наука, 1986. — 288 с.

The article is devoted to hardware-oriented method of differentiation of signals based on regularization operator. The principal scheme of the corrective hydropneumatics device and recommendations for its design was investigated with the considered method. The computational experiments are shown the efficiency of the regularization method and was investigated the effect of the size of the noise on the obtained solution.

**Key words:** *numerical differentiation, signal recovery, transfer function, Matlab, regularization, hydropneumatic correction device.*

Отримано: 17.10.2017