

УДК 519.218.82

М. Я. ОСТРОВЕРХОВ, А. М. СІЛЬВЕСТРОВ, Б. Р. БОРЯК

## КОМПЕНСАЦІЯ ЗАПІЗНЕННЯ В КОНТУРІ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ НАНЕСЕННЯ ІЗОЛЯЦІЇ НА СТРУМОПРОВІДНУ ЖИЛУ КАБЕЛЮ

З метою підвищення якості процесу нанесення полімерної ізоляції на струмопровідну жилу кабелів надвисокої напруги, розглянуто можливість використання в контурі керування технологічним процесом адаптивних до гетероскедастичних збурень фільтрів, функціональні блоки яких – екстраполятори Р. Брауна, що працюють по принципу потрійного експоненціального згладжування, підключені за ноніусним принципом і виконують функції компенсаторів транспортного запізнення. Алгоритм адаптації даного фільтра передбачає використання двох фільтруючих контурів, що функціонують за одним принципом, але із різними параметрами.

**Ключові слова:** фільтр-екстраполятор, запізнення, виробництво кабелів, прогнозування, адаптація, астатизм, експоненціальне згладжування.

С целью повышения качества процесса наложения полимерной изоляции на токопроводящую жилу кабелей сверхвысокого напряжения, рассмотрена возможность использования в контуре управления технологическим процессом адаптивных к гетероскедастическим возмущениям фильтров. Функциональные блоки фильтров являются экстраполяторами Р. Брауна, что работают по принципу тройного экспоненциального сглаживания, подключены между собой по нониусному принципу и выполняют функции компенсаторов транспортного запаздывания. Алгоритм адаптации данного фильтра предусматривает использование двух фильтрующих контуров, функционирующих по одному принципу, но с разными параметрами.

**Ключевые слова:** фильтр-экстраполятор, запаздывание, производство кабелей, прогнозирование, адаптация, астатизм, экспоненциальное сглаживание.

To improve quality of the polymer insulation winding process for extra high voltage cables we researched the possibility of using adaptive filter. This filter can be integrated into control system as data processing algorithm and its main aim is to compensate heteroscedastic noise.

The working principle is based on double exponential smoothing that was proposed by R. Brown. The lag of triple exponential smoothing was compensated by nonius connection of three filters. In such case filter can be used as a transport delay compensator as well.

Algorithm of adaptation was designed to get an ability to change the smoothing factor of the filter during the process. The variability of smoothing factor makes the filter to adapt to changes of noise level and to avoid loss of information. The adaptation process requires using two filtering contours that works with the same principle but with different smoothing factors.

**Keywords:** filter-extrapolator, delay, cable production, forecasting, adaptation, astaticism, exponential smoothing.

**Вступ.** Виробництво кабелів світового рівня з ізоляцією на надвисокій напруги [1, 2] (до 330 кВ) здійснюється на електротехнічному комплексі, який складається з десятків систем, взаємозв'язаних між собою через рухому кабельну продукцію в умовах дії багатьох збурюючих факторів. Стабілізація технологічних параметрів та фільтрація і прогнозування значень технологічних змінних сприяє зменшенню радіального та осьового зміщення ізоляції відносно металічної жили в процесі її багатошарового нанесення. Нанесення тришарової ізоляції на струмопровідну жилу, яка рухається зі швидкістю близько 50 м/хв здійснюється за допомогою блоку екструдерів 1 (рис. 1) [3, 4].

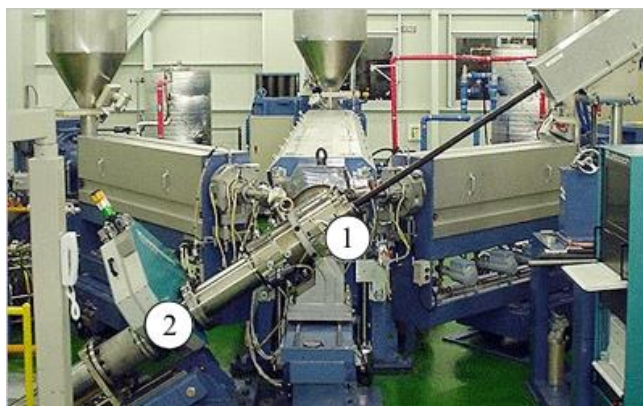


Рис. 1 – Блоки екструдерів (1) та датчиків (2)

Зовнішній діаметр кожного шару ізоляції вимірюється рентген-датчиками 2 (рис. 1), які встановлюються на відстані біля 0,5 м від виходу екструдерів. Це створює в контурах регулювання товщини шарів

ізоляції транспортне запізнення  $t_s$  в середньому 0,5 с. Наявність запізнення негативно впливає на швидкість і точність керування товщиною шарів та може призвести до коливань і втраги стійкості системи [5].

Товщина кожного шару ізоляції регулюється автоматизованими електроприводами екструдерів [6]. Спрощену функціональну схему системи регулювання товщини (зовнішнього діаметру) шарів ізоляції зображено на рис. 2, де:  $X^*$ ,  $X(t)$ ,  $X(t - t_s)$ ,  $\hat{X}(t)$  – вектор-функції заданих, дійсних, вимірних та прогнозованих діаметрів;  $\Delta X(t)$ ,  $U(t)$ ,  $\omega(t)$  – вектор-функції похибки діаметрів, керуючого впливу та швидкостей обертання черв'яків трьох екструдерів.

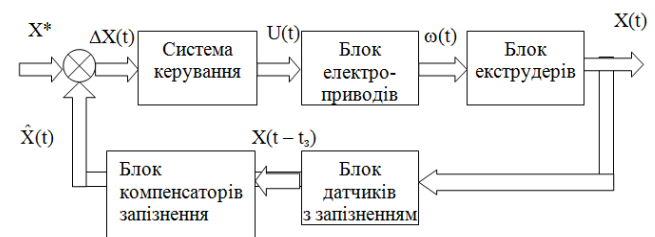


Рис. 2 – Спрощена функціональна схема системи регулювання

**Мета та задачі дослідження.** Мета роботи – підвищення якості керування товщиною шарів ізоляції кабелю шляхом компенсації негативного впливу транспортного запізнення в умовах невизначеності та нестационарності шумів вимірювання. Для досягнення цієї мети в контурі керування для компенсації транспортного запізнення  $t_s$  введено спеціальний блок прогнозування запізнених показників  $X(t - t_s)$  блока датчиків (рис. 2).

© М. Я. Островерхов, А. М. Сільвестров, Б. Р. Боряк. 2017

**Прогнозування сигналів  $X(t-t_3)$  фільтром-екстраполятором Р. Брауна.** Сигнали  $X(t-t_3)$  з давачів вимірюваних діаметрів спотворено гетероскедастичною задавою (випадковим процесом з нестационарною дисперсією). Спектри корисної складової сигналу і випадкових збурень дещо рознесені. Тому для фільтрації випадкових збурень у фільтрі-екстраполяторі Р. Брауна [7, 8] використано три послідовно увімкнених інерційних ланки першого порядку:

$$W(p) = \frac{1}{\tau p + 1}, \tag{1}$$

де  $p$  – оператор Лапласа;  $\tau$  – стала часу.

Інерційні ланки (1) з відповідними до схеми (рис. 3) з'єднаннями і пропорційними ланками та сумуючими елементами утворюють структуру фільтра-екстраполятора Р.Брауна. За умови квадратичної апроксимації:

$$\hat{x}(t+t_3) = \hat{x}(t) + t_3 \cdot \frac{d\hat{x}}{dt} + \frac{t_3^2}{2} \cdot \frac{d^2\hat{x}}{dt^2} \tag{2}$$

прогнозного значення  $\hat{x}(t+t_3)$  тричі згладженого фільтрами (1) сигналу  $\hat{x}(t)$ , коефіцієнти  $k_i$ ,  $i = \overline{1, 5}$  приймають наступні значення:  $k_1 = -\alpha$ ;  $k_2 = \alpha$ ;  $k_3 + k_4 + k_5 = 0$ ;  $2k_3 + k_5 = 0$ ; тоді  $k_3 = k_4 = \alpha^2$ ;  $k_5 = -2\alpha^2$ .

Для дискретної форми реалізації інерційна ланка (1) замінюється дискретною

$$\hat{y}_1(k) = \alpha x(k) + (1-\alpha)y_1(k-1), \tag{3}$$

де  $\alpha = \frac{\Delta t}{\tau}$ .

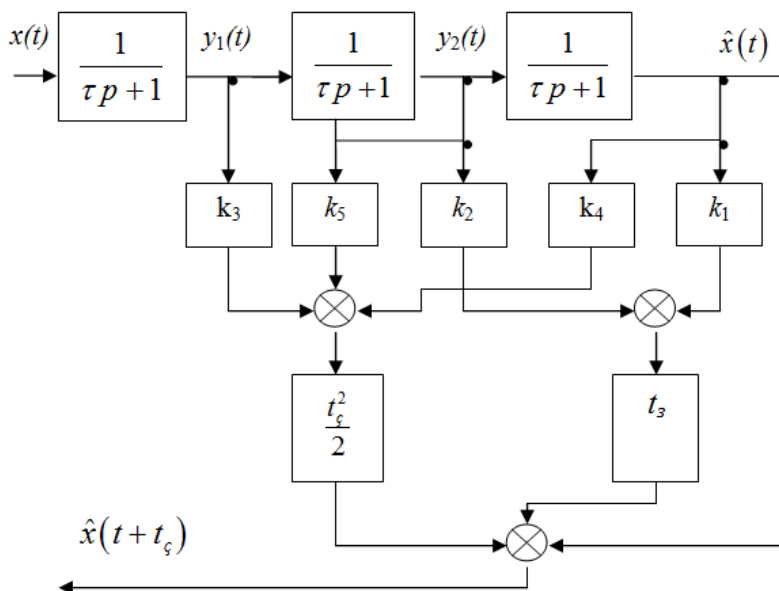


Рис. 3 – Аналогова реалізація фільтра-екстраполятора Р.Брауна

Тоді прогнозне на  $m$  дискретів  $\Delta t$  часу  $t$  значення  $\hat{x}(k+m)$ , аналогічно до (2), дорівнюватиме [7]:

$$\hat{x}(k+m) = \hat{x}(k) + t_3 \cdot \frac{d\hat{x}}{dt}(k) + \frac{t_3^2}{2} \cdot \frac{d^2\hat{x}}{dt^2}(k), \tag{4}$$

де [2]  $\hat{x}(k) = 3\Phi'(k) - 3\Phi''(k) + \Phi'''(k)$ ,

$$\frac{d\hat{x}}{dt}(k) = \frac{\alpha}{2(1-\alpha)^2} \times [(6-5\alpha)\Phi'(k) - (10-8\alpha)\Phi''(k) + (4-3\alpha)\Phi'''(k)]$$

$$\frac{d^2\hat{x}}{dt^2}(k) = \frac{\alpha^2}{2(1-\alpha)^2} [\Phi'(k) - 2\Phi''(k) + \Phi'''(k)],$$

$$\Phi'(k) = \alpha x(k) + (1-\alpha)\Phi'(k-1),$$

$$\Phi''(k) = \alpha\Phi'(k) + (1-\alpha)\Phi''(k-1),$$

$$\Phi'''(k) = \alpha\Phi''(k) + (1-\alpha)\Phi'''(k-1).$$

Для системи (рис. 2) достатньо лінійної апроксимації, бо за час  $t_3$  сигнал  $x(t)$  суттєво не зміниться. І, взагалі, похибка апроксимацій прогнозного значення  $X(t+t_3)$  чи  $X(k+m)$  виразами (2), (4) суттєво менше похибки слідування  $\hat{x}(t)$  за  $x(t)$ , яка утворюється внаслідок потрійного згладжування інерційними фільтрами (1). Так для лінійно зростаючого сигналу  $x(t) = at$  (рис. 4), за теоремою Лапласа [5], усталена похибка  $\varepsilon(\infty)$  дорівнює:

$$\begin{aligned} \varepsilon(\infty) &= \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot W_\varepsilon(p) \cdot x(p) = \\ &= \lim_{p \rightarrow 0} p \left( 1 - \frac{1}{(\tau p + 1)^3} \right) \cdot \frac{a}{p^2} = 3a\tau \end{aligned} \tag{5}$$

Для сигналу квадратичної форми похибка  $\varepsilon(\infty)$  прямує до нескінченності (рис. 5).

**Прогнозування ноніусно увімкненою системою фільтрів Р.Брауна.** Для ліквідації похибки слідування  $\hat{x}(t)$  за  $x(t)$  необхідно для сигналу, що лінійно змінюється, створити структуру фільтра з астатизмом [5] першого порядку, для квадратичної зміни сигналу – з астатизмом другого порядку [9]. На рис. 6 подано структуру фільтра – лінійного екстраполятора з астатизмом другого порядку, де Brown's DES – потрійне експоненціальне згладжування Брауна (Brown's triple exponential smoothing).

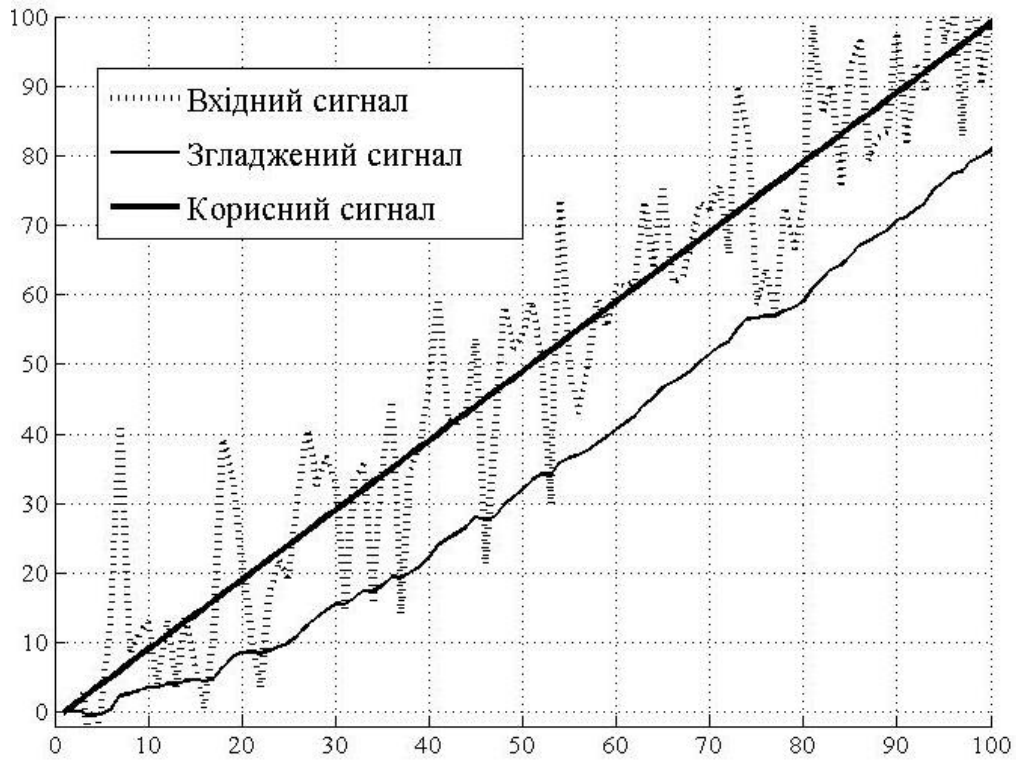


Рис. 4 – Процес згладжування суми лінійного сигналу  $x(k) = k$  і шуму фільтром Брауна,  $\varepsilon(\infty) \cong 20$

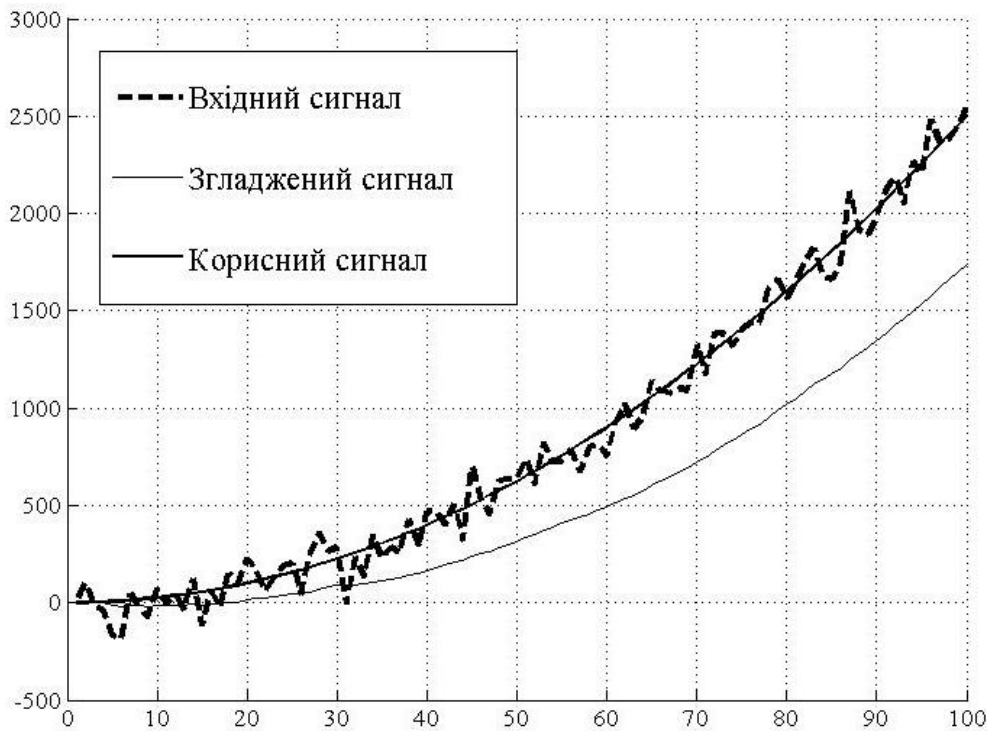


Рис. 5 – Процес згладжування фільтром Р. Брауна суми квадратично зростаючого сигналу

$$x(k) = \frac{k^2}{4} \text{ і випадкового збурення}$$

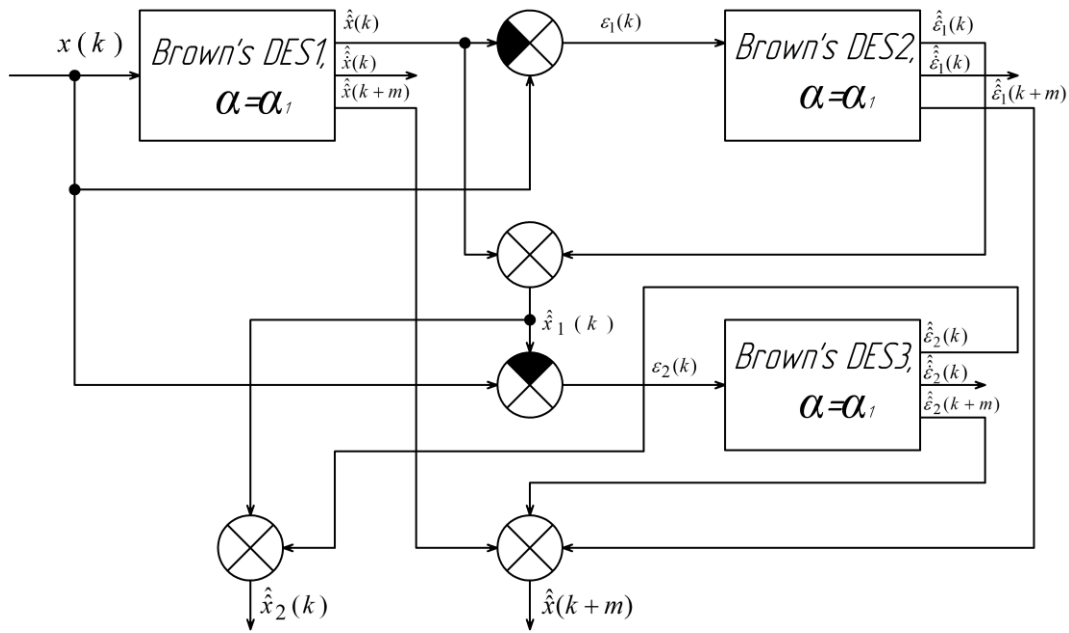


Рис. 6 – Ноніусне ввімкнення фільтрів Р. Брауна

Астатизм забезпечується ноніусним включенням трьох фільтрів Р. Брауна. Перший видає згладжене  $\hat{x}(k)$  і прогнозне  $\hat{x}(k+m)$  значення сигналу  $x(k)$ . На вхід другого фільтра подається похибка  $\varepsilon_1(k)$  слідування  $\hat{x}(k)$  за  $x(k)$  першого фільтра. На вхід третього фільтра подано похибку  $\varepsilon_2(k)$  між  $x(k)$  і сумою  $\hat{x}(k)$  і  $\hat{\varepsilon}_1(k)$ . У результаті складання  $\hat{x}(k)$ ,  $\hat{\varepsilon}_1(k)$  і  $\hat{\varepsilon}_2(k)$  отримуємо скориговане на похибки слідування значення  $\hat{x}_2(k)$ . А при складанні прогноз-

них значень  $\hat{x}(k+m)$ ,  $\hat{\varepsilon}_1(k+m)$  і  $\hat{\varepsilon}_2(k+m)$  отримаємо скориговане на похибку слідування прогнозне значення  $\hat{x}_2(k+m)$ . На рис. 7 показано роботу фільтра (рис. 6) при прогнозі лінійно змінюваного сигналу  $x(k) = k$ , на рис. 8 – квадратично. Як видно з рис. 7, рис. 8, ноніусне з'єднання фільтрів Р. Брауна зі сталим параметром  $\alpha$  забезпечує достатньо якісну фільтрацію без похибки слідування і, відповідно, прогноз (за умов стаціонарності характеристик випадкових збурень у вимірах сигналу  $x(k)$ ).

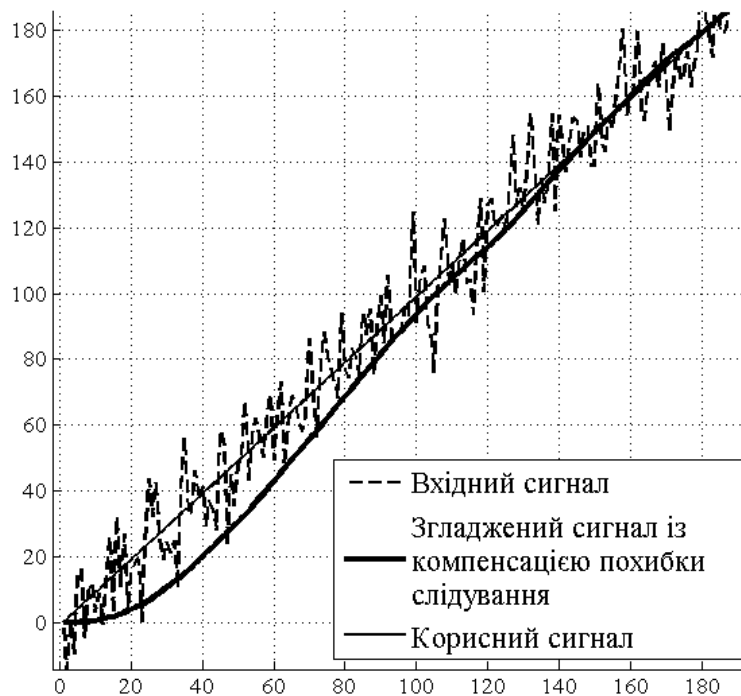


Рис. 7 – Процес прогнозу і компенсації похибки слідування

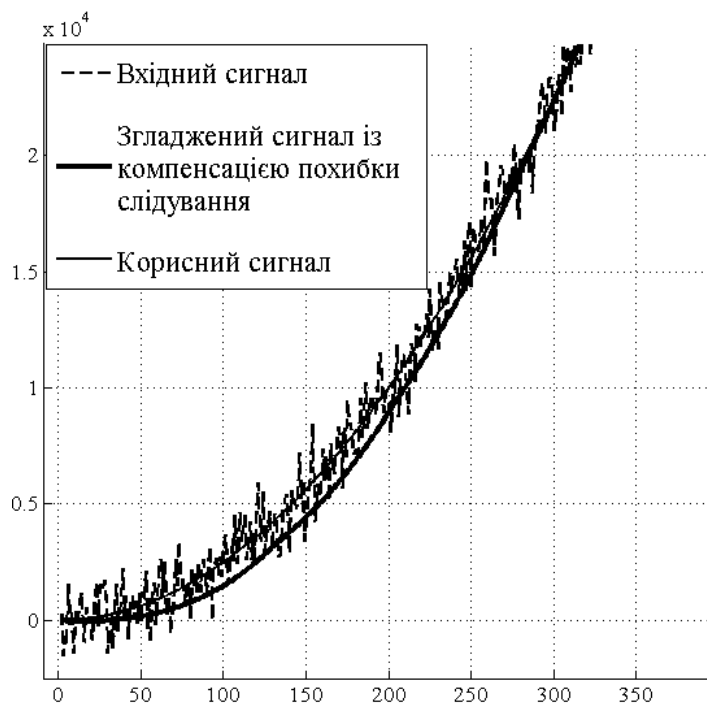


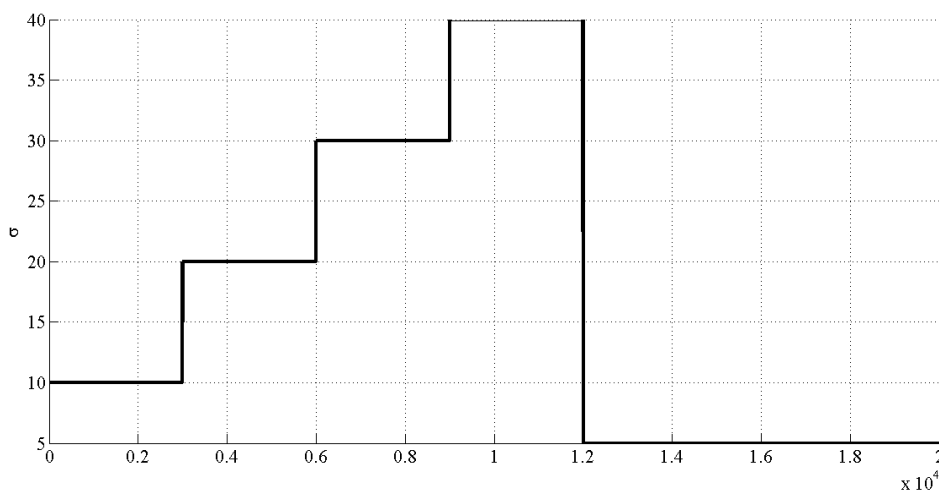
Рис. 8 – Процес прогнозу і компенсації похибки слідування

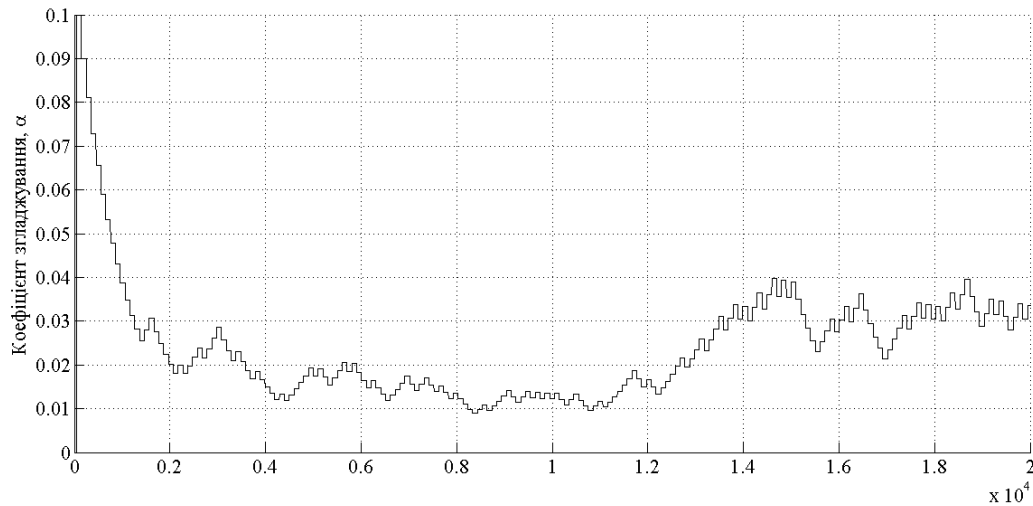
Однак, у випадку нестационарності (гетероскедастичності) випадкових збурень, для якісної фільтрації необхідно змінювати параметр  $\alpha$  фільтра.

**Адаптація фільтра до зміни характеристик сигналу і випадкових збурень.** По ходу технологічного процесу нанесення ізоляції на металеву жилу кабелю мають місце природні зміни характеристик випадкових похибок у вимірюванні діаметрів. Це зміна співвідношення «шум – сигнал», а також частотного спектру шуму. Для якісного прогнозування сигналу  $x(t)$  необхідна адаптація параметру  $\alpha$  фільтра до змін характеристик сигналу і збурення [10]. Для цього скористаємось диференціальним принципом. Прогноз  $x(t)$  виконується двома фільтрами (рис. 6). Один має параметр  $\alpha$ , другий  $\alpha + \Delta\alpha$  ( $\Delta\alpha = 0,1\alpha$ ). Прогнозні

значення обох фільтрів затримуються на  $m$  кроків і зіставляються з поточними значеннями  $x(k)$ . Модулі різниць цих значень усереднюються і відбувається збільшення чи зменшення параметра  $\alpha$  залежно від різниці усереднених модулів. На рис. 9 подано графік зміни у часі стандартного відхилення  $\sigma$  випадкового збурення у вимірах  $x(k)$ ,  $k = 0, 20000$ .

На рис. 10 – процес адаптації параметра  $\alpha$  до  $\sigma$ . Зі збільшенням  $\sigma$  шумів від 10 до 40 (рис. 9)  $\alpha$  зменшився з 0,1 до 0,01 (інтервал часу від  $k = 0$  до  $k = 1200$ ). Далі, при зменшенні амплітуди шуму до 5, відбулося зростання  $\alpha$  до 0,03 і невеликі коливання в зоні  $\alpha = 0,03$  внаслідок дискретності алгоритму настрійки  $\alpha$ .

Рис. 9 – Зміна стандартного відхилення  $\sigma$  шуму у вимірах  $x(k)$

Рис. 10 – Процес адаптації параметра  $\alpha$  до змінної  $\sigma$ 

Таким чином, за невідомих характеристик сигналу  $x(t)$  і випадкових збурень (окрім інформації про рознесення їх спектрів) відбувається налагоджування параметра  $\alpha$  фільтра до області його оптимальних значень ( $\alpha^* = 0,01 \pm 0,003$  для  $\sigma = 40$  і  $\alpha^* = 0,03 \pm 0,005$  для  $\sigma = 5$ ).

Подальше покращення роботи запропонованого фільтра можливе шляхом завдання і адаптації різних значень параметра  $\alpha$  фільтрів Р.Брауна: для першого фільтра (рис. 6) співвідношення шум – сигнал менше, ніж для другого, для другого менше, ніж для третього. Відповідно, оптимальне значення  $\alpha^*$  для першого більше, ніж для другого, для другого більше, ніж для третього.

Для виключення ділянки часу з перехідним процесом від параметричного збурення (зміни параметра

$\alpha$  на  $\pm\Delta\alpha$ ) замість схеми з двома ноніусними фільтрами можна використати схему з трьома:  $\alpha$ ;  $\alpha + \Delta\alpha$ ;  $\alpha - \Delta\alpha$ . З трьох схем для прогнозу використовується та, в якій похибка прогнозу мінімальна. Дві інші змінюють свої  $\alpha$  так, щоб їх значення відрізнялись на  $\pm\Delta\alpha$  від  $\alpha$  оптимального каналу.

**Висновки.** Представлений ноніусний адаптивний фільтр дозволить в умовах статистичної невизначеності і нестационарності характеристик вимірів корисних сигналів забезпечити високоякісний прогноз корисної складової сигналу і, як наслідок, якість і стійкість систем автоматичного управління об'єктами, які мають транспортне запізнення у вимірах їх змінних стану.

#### Список літератури:

1. Шидловський, А. К. Кабели с полимерной изоляцией на сверхвысокие напряжения [Текст]: монография / А. К. Шидловський, А. А. Щерба, В. М. Золотарев, А. Д. Подольцев, И. Н. Кучерявая. – К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2013. – 551 с.
2. Vahedy, V. Polymer insulated high voltage cables [Text] / V. Vahedy // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2006. – Vol. 22, Issue 3. – P. 13–18. doi: [10.1109/mei.2006.1639025](https://doi.org/10.1109/mei.2006.1639025)
3. Rubanenko, O. Determination of optimal transformation ratios of power system transformers in conditions of incomplete information regarding the values of diagnostic parameters [Text] / O. Rubanenko, O. Kazmiruk, V. Bandura, V. Matvijchuk, O. Rubanenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 4, Issue 3 (38). – P. 66–79. doi: [10.15587/1729-4061.2017.108945](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108945)
4. Бикинеева, Ю. Л. Интегрированная система автоматизации кабельного производства [Текст] / Ю. Л. Бикинеева, Е. И. Громаков, В. М. Павлов, А. М. Мальшенко // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314, № 5. – С. 69–74.
5. Методы классической и современной теории автоматического управления [Текст]: учеб. / под ред. Н. Д. Егупова. – М.: Из-во МГТУ им. Н. Е. Баумана, 2000. – 1000 с.
6. Тарарыкин, С. В. Системы координирующего управления взаимосвязанными электроприводами [Текст] / С. В. Тарарыкин, В. В. Тютиков. – Иваново: ИГЭУ, 2000. – 212 с.
7. Brown, R. Exponential Smoothing for Predicting Demand [Text] / R. Brown. – Cambridge, Massachusetts: Arthur D. Little Inc, 1956.
8. Boriak, B. R. Filtering and forecasting signals algorithm based on exponential Brown's filter [Text] / B. R. Boriak, A. M. Silvestrov // Academic J. Control, Navigation and Communication Systems. – 2017. – Vol. 4, Issue 44. – P. 150–152.
9. Сильвестров, А. М. Згладжування та прогнозування сигналів за допомогою ноніусного включення експоненціальних фільтрів моделі Брауна [Текст] / А. М. Сильвестров // Матеріали Всеукраїнської наук.-практ. конференції «Електронні та механотронні системи: теорія, інновації, практика». – Полтава, 2015. – С. 65–68.
10. Боряк, Б. Р. Дослідження алгоритму згладжування і налаштування адаптивного фільтра Брауна при зміні амплітуди шумів [Текст] / Б. Р. Боряк // Матеріали 69 наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету, квітень-травень. – 2017. – Т. 1. – С. 4–6.

#### Bibliography (transliterated):

1. Shidlovs'kiy, A. K., Shcherba, A. A., Zolotarev, V. M., Podol'tsev, A. D., Kucheryayaya, I. N. (2013). Kabeli s polimernoy izolyatsiey na sverhvysokie napryazheniya. Kyiv: In-t elektrodinamiki NAN Ukrainy, 551.
2. Vahedy, V. (2006). Polymer insulated high voltage cables. IEEE Electrical Insulation Magazine, 22 (3), 13–18. doi: [10.1109/mei.2006.1639025](https://doi.org/10.1109/mei.2006.1639025)
3. Rubanenko, O., Kazmiruk, O., Bandura, V., Matvijchuk, V., Rubanenko, O. (2017). Determination of optimal transformation ratios of power system transformers in conditions of incomplete information regarding the values of diagnostic parameters. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4 (3 (88)), 66–79. doi: [10.15587/1729-4061.2017.108945](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108945)

4. Bikineeva, Yu. L., Gromakov, E. I., Pavlov, V. M., Malysenko, A. M. (2009). Integrirovannaya sistema avtomatizatsii kabel'nogo proizvodstva. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 314 (5), 69–74.
5. Egupov, N. D. (Ed.) (2000). Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya. Moscow: Iz-vo MGTU im. N. E. Baubana, 1000.
6. Tararykin, S. V., Tyutikov, V. V. (2000). Sistemy koordiniruyushchego upravleniya vzaimosvyazannymi elektroprivodami. Ivanovo: IGEU, 212.
7. Brown, R. (1956). Exponential Smoothing for Predicting Demand. Cambridge, Massachusetts: Arthur D. Little Inc.
8. Boriak, B. R., Silvestrov, A. M. (2017). Filtering and forecasting signals algorithm based on exponential Brown's filter. Academic J. Control, Navigation and Communication Systems, 4 (44), 150–152.
9. Silvestrov, A. M. (2015). Zghladzhuvannya ta prohnozuvannya syhnaliv za dopomohoiu noniusnogo vkluchennia eksponentsialnykh filtriv modeli Brauna. Materialy Vseukrainskoi nauk.-prakt. konferentsiy «Elektronni ta mekhantronni systemy: teoriya, innovatsiy, praktyka». Poltava, 65–68.
10. Boriak, B. R. (2017). Doslidzhennia alhorytmu zghladzhuvannya i nalashuvannya adaptivnogo filtra Brauna pry zmini amplitudy shumiv. Materialy 69 naukovoi konferentsii profesoriv, vykladachiv, naukovykh pratsivnykiv, aspirantiv ta studentiv universytetu, kviten-traven, 1, 4–6.

Надійшла (received) 21.09.2017

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Компенсация запізнення в контурі керування процесом нанесення ізоляції на струмопровідну жилу кабелю/ Острроверхов М. Я., Сильвестров А. М., Боряк Б. Р.** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 33(1255). – С.61–67. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

**Компенсация запаздывания в контуре управления процессом нанесения изоляции на токопроводящую жилу кабеля/ Острроверхов Н. Я., Сильвестров А. М., Боряк Б. Р.** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 33(1255). – С. 61–67.– Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

**Delay Compensation in the Control Circuit for the Insulation Process on the Conductor Cable/ Ostroverkhov M., Silvestrov A., Boryak B.** //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 33 (1255).– P.61–67. – Bibliogr.:10. – ISSN 2079-5459

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Острроверхов Микола Якович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теоретичної електротехніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», проспект Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056; e-mail: [n.ostroverkhov@hotmail.com](mailto:n.ostroverkhov@hotmail.com).

**Сильвестров Антон Миколайович** – доктор технічних наук, професор, кафедра теоретичної електротехніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», проспект Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056; ; e-mail: [silvestrovanton@gmail.com](mailto:silvestrovanton@gmail.com).

**Боряк Богдан Радиславович** – аспірант, кафедра автоматики та електропривода, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Першотравневий проспект, 24, м. Полтава, Україна, 36011; e-mail: [lightraven72@gmail.com](mailto:lightraven72@gmail.com).

**Острроверхов Николай Яковлевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической электротехники, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», проспект Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056; e-mail: [n.ostroverkhov@hotmail.com](mailto:n.ostroverkhov@hotmail.com).

**Сильвестров Антон Николаевич** – доктор технических наук, профессор кафедры теоретической электротехники, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», проспект Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056 ; e-mail: [silvestrovanton@gmail.com](mailto:silvestrovanton@gmail.com).

**Боряк Богдан Радиславович** – аспирант, кафедра автоматики и электропривода, Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка, Первомайский проспект, 24, м. Полтава, Украина, 36011; e-mail: [lightraven72@gmail.com](mailto:lightraven72@gmail.com).

**Ostroverkhov Mykola** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Theoretical Electrical Engineering, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 37, Peremohy Avenue, Kyiv, Ukraine, 03056; e-mail: [n.ostroverkhov@hotmail.com](mailto:n.ostroverkhov@hotmail.com).

**Silvestrov Anton** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Theoretical Electrical Engineering, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 37, Peremohy Avenue, Kyiv, Ukraine, 03056; e-mail: [silvestrovanton@gmail.com](mailto:silvestrovanton@gmail.com).

**Boryak Bohdan** – postgraduate student, department of automation and electric drive, Yuriy Kondratyuk Poltava National Technical University, 24, Pershotravnevy prospect, Poltava, Ukraine, 36011; 03056; e-mail: [lightraven72@gmail.com](mailto:lightraven72@gmail.com).