

ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ

УДК 621.317.1; 681.527.6

DOI: <https://doi.org/10.30970/eli.15.8>

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ФІЛЬТРАЦІЇ ЗАВАД ПІД ЧАС ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ СУШИЛЬНОЇ ШАФИ

Д. Трушаков¹, О. Козловський¹, С. Рендзіняк², В. Коруд², М. Федотова¹

¹ *Центральноукраїнський національний технічний університет,
просп. Університетський 8, 25006 Кропивницький, Україна
dmitro.trushakov@gmail.com, kozlovskiyio@gmail.com*

² *Інститут енергетики та систем керування,
Національний університет «Львівська політехніка»,
вул. Степана Бандери 12, 79013 Львів, Україна
serhii.y.rendziniak@lpnu.ua*

У статті наведено результати дослідження проблем автоматизації температурних режимів сушильної шафи. Здійснено побудову автоматизованої системи вимірювання температури сушильної шафи типу СЕШ-3М. Розроблено функціональну схему пристрою сполучення термопари ТМК з аналого-цифровим перетворювачем. Виконано синтез фільтру низьких частот для забезпечення завадостійкості вимірюваних величин. Проведено експериментальні дослідження ефективності фільтру низьких частот у системі вимірювання температури сушильної шафи.

Ключові слова: автоматизована система, термопара, фільтр низьких частот, сушильна шафа.

Постановка проблеми. Впровадження комплексних засобів автоматизації на підприємствах зернопереробної промисловості дозволяє значно скоротити витрати і підвищити вихід готової продукції, а також підвищити продуктивність і поліпшити умови праці. Одним з процесів, які в теперішній час підлягають негайної автоматизації, є сушіння зерна, яке у більшості випадків здійснюється за допомогою морально та технічно застарілого спеціалізованого устаткування.

Сушильні шафи призначені для сушіння при визначеній вологості зерна, зернопродуктів, насіння бобових і олійних культур, а також інших вологомістких сільськогосподарських культур у аграрно-промисловому комплексі. Одною з найпоширеніших сушильних шаф до теперішнього часу є СЕШ-3М, яка широко розповсюджена в агропідприємствах та застосовується в лабораторіях елеваторів, хлібоприймальних, борошномельних, круп'яних, комбикормових, хлібопекарських підприємств і науково-дослідних установ аграрно-промислового комплексу.

Нажаль, рівень автоматизації сушильної шафи СЕШ-3М не відповідає сучасним вимогам сільськогосподарського виробництва. Тому актуальними є дослідження, спрямовані на розроблення автоматизованої системи автоматичного контролю температури.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Попереднім дослідженням стосовно автоматизації зерносушарок присвячено ряд робіт [1-5]. Так у роботі [1] основну увагу сконцентровано на питанні вибору датчика вологості при неповних вимірюваннях вихідних сигналів зерносушарки з киплячим шаром. У роботі [2] наведено підсумки досліджень робастної стійкості замкненої системи автоматичного управління зерносушаркою з киплячим шаром. У роботі [3] проведено моделювання системи автоматичного керування сушінням в зерносушарці з киплячим шаром каскадного типу у пакеті SIMULINK. Однак у подальшому виникла проблема компенсації запізень при неповних вимірюваннях вхідних сигналів зерносушарки з киплячим шаром, яку розглянуто в роботі [4]. Одним з шляхів вирішення цієї задачі стало застосування методу номограм у роботі [5], дослідження яких спрямовано на визначення параметрів оптимального багатомірного регулятора для автоматизації сушіння в киплячому шарі.

Постановка завдання. Метою даної роботи є створення автоматизованої системи вимірювання температури сушильної шафи СЕШ-3М із застосуванням сучасних методів автоматизації та елементів автоматики. У зв'язку з тим, що рівень вихідного сигналу датчика температури складає декілька мілівольт, то основну увагу в даній роботі приділено синтезу фільтра низьких частот для фільтрації інформаційного сигналу від завод.

Виклад основного матеріалу. Принцип дії сушильної шафи СЕШ-3М засновано на рівномірному висушуванні проби за допомогою повітряного потоку (повітряно-тепловий метод), створюваного відцентровим вентилятором і нагрівальними елементами, та обертового столу з пробами.

Сушильна шафа СЕШ-3М представляє собою сушильну камеру, захищену шаром теплоізоляції з дверима для завантаження бюкс. Камера оснащена столом, який обертається за допомогою турбіни з шестерним редукторним пристроєм, розміщеним у кожусі нагрівача шафи. Обертання турбіни і обмін повітря в шафі здійснюється за рахунок повітряного потоку, створюваного відцентровим вентилятором.

Таблиця 1

Технічні характеристики сушильної шафи СЕШ-3М

Регульована температура, °С	105 ± 1 / 130 ± 1
Максимально допустимий нагрів сушильної камери шафи, °С	150
Середня тривалість розігріву шафи при номінальній напрузі мережі і температурі приміщення +20°С, хв., не більше	
при нагріванні до 105°С	10
при нагріванні до 130°С	15
Падіння температури після повного завантаження зразками розмеленого зерна при номінальній напрузі мережі і температурі приміщення +20°С, % від робочої температури	10
Час відновлення температури після повного завантаження зразками розмеленого зерна при номінальній напрузі мережі і температурі приміщення +20°С, хв.	10
Швидкість обертання столу, об/хв.	5 ± 2
Місткість обертового стола	
сітчастих бюкс, шт.	5
алюмінієвих бюкс, шт.	10
Електроживлення, В / Гц	220 / 50
Потужність, кВт, не більше	1,2

Робочу температуру в сушильній камері на стабільному рівні підтримує електричний нагрівач у нижній частині шафи за допомогою терморегулятора, який складається з ртутного контактного термометра і реле.

Нагрівач складається з двох секцій: основної потужністю 575 Вт і додаткової – 525 Вт. Додаткову секцію вмикають для прискореного розігрівання шафи до температури 140°C. Технічні характеристики сушильної шафи СЕШ-3М подано в табл. 1.

Створення автоматизованої системи регулювання температури сушильної шафи СЕШ-3М базується на застосуванні сучасних методів автоматизації та елементів автоматичності.

У загальному випадку задача регулювання температури формується так: за заданим вектором бажаного стану $x^*(t)$ необхідно знайти такий закон регулювання $U^*(t) = U\{\epsilon(t)\}$, який забезпечує мінімальний екстремум функціонала $I\{\epsilon(t)\}_{\min}$. Вектор похибки $\epsilon(t)$ визначається за виразом

$$\epsilon(t) = x^*(t) - x(t),$$

де $x^*(t)$ – вектор бажаного стану об'єкта регулювання; $x(t)$ – вектор поточного стану об'єкта регулювання.

У будь який момент часу t стан об'єкта керування являється функцією векторів збурюючого впливу $f(t)$ і керуючого впливу $U(t)$, а також початкового стану $x(t_0)$.

Вектор-функцію $f(t)$, яка обумовлює вплив збурюючих впливів, називають вектором збурення:

$$f(t) = \{f_1(t), f_2(t), \dots, f_k(t)\}.$$

Вектор-функція $U(t)$ обумовлює цілеспрямований вплив керуючого органу (КО) на об'єкт регулювання (ОР):

$$U(t) = \{U_1(t), U_2(t), \dots, U_n(t)\}.$$

Отже, стан об'єкта регулювання можна описати математичною моделлю:

$$x(t) = x\{U(t), f(t), x(t_0)\}.$$

Єдина величина, яку тут можливо змінювати – це коректуючий вплив $U(t)$.

Узагальнену структурну схему системи регулювання наведено на рис. 1.

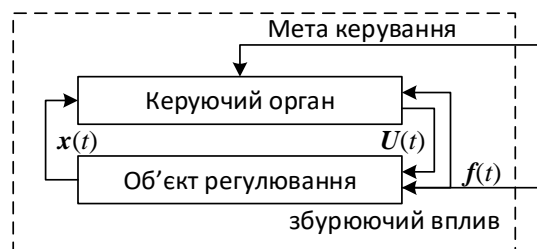


Рис. 1. Узагальнена структурна схема системи автоматичного регулювання

Основними вихідними даними для побудови каналу вимірювання температури в автоматизованій системі є такі:

- 1) діапазон вимірюваної температури сушильної шафи $T_{\min}=50^\circ\text{C}$, $T_{\max}=150^\circ\text{C}$;

2) максимальна термоЕРС з виходу термопари при температурі 150°C $E_{150} = 6,704$ мВ; мінімальна термоЕРС при температурі 50°C $E_{50} = 2,036$ мВ.

У якості датчика температури використовується стандартна термопара ТМК типу Т з термопарним проводом мідь-константан у тефлоновій ізоляції з неізольованим спаєм. Робочий діапазон температури термопари ТМК типу Т складає від -270°C до 400°C . Тефлон забезпечує стійкість до більшості хімічно агресивних середовищ, малий діаметр кабелю – малу інерційність, гнучкість і свободу монтажу.

Для реалізації системи автоматизації вимірювання температури сушильної шафи запропоновано функціональну схему, у якій вхідним сигналом є температура, вихідним сигналом – ЕРС. Для підвищення точності вимірювань застосовано фільтр низьких частот другого порядку. Далі сигнал подається на нормалізатор та АЦП вхідного сигналу (рис. 2).

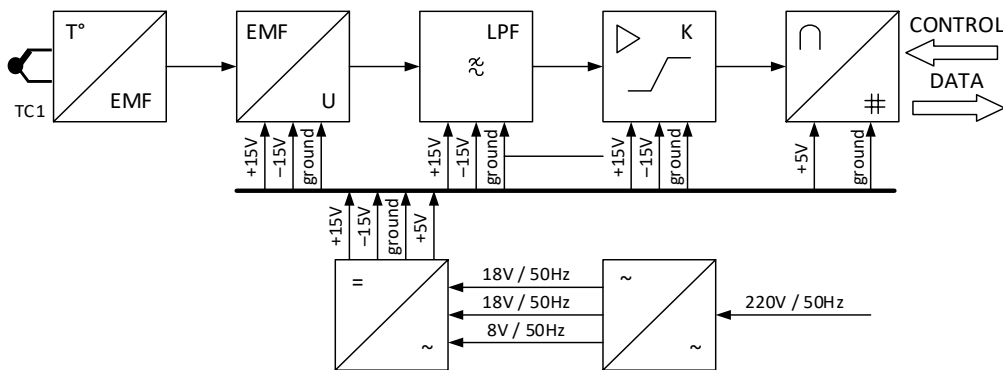


Рис. 2. Функціональна схема пристрою сполучення термопари ТМК з аналого-цифровим перетворювачем

Функціональна схема складається з таких елементів:

- датчик температури T°/EMF , перетворює температуру процесу в електрорушійну силу;
- перетворювач на операційному підсилювачі EMF/U , що перетворює електрорушійну силу в напругу;
- фільтр низької частоти LPF (ФНЧ), що усуває завади високої частоти;
- нормалізатор K вихідного сигналу, який підсилює вихідний сигнал до напруги повної шкали АЦП;
- $\Pi/\#$, аналого-цифровий перетворювач вхідного аналогового сигналу в дискретний код (цифровий сигнал), який кількісно характеризує амплітуду вхідного сигналу;
- $=/\sim$, стабілізатор напруги живлення вузлів пристрою;
- \sim/\sim , трансформатор живлення.

Оскільки вихідний сигнал термопари є сигналом низького рівня, який складає одиниці або десятки мілівольт, тому для забезпечення завадостійкості слід використовувати фільтри низьких частот (ФНЧ).

Розробимо ФНЧ з максимально пласкою характеристикою в межах смуги пропускання $f_s = 50$ Гц з $K = 1$, крутизною характеристики в перехідній області не гірше 15 дБ/окт, нерівномірністю $\Delta\alpha = 3$ дБ, тобто загасання на нормованій частоті $\Omega = 2\omega_s = 2$ не повинне бути менше 15 дБ.

Передатна функція ланки n -го порядку має вигляд:

$$W(p) = \frac{U_{\text{вих}}(p)}{U_{\text{вх}}(p)} = \frac{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + a_{n-2} p^{n-2} + \dots + a_1 p + a_0}{p^n + b_{n-1} p^{n-1} + b_{n-2} p^{n-2} + \dots + b_1 p + b_0}. \quad (1)$$

Для реалізації складних передатних функцій типу (1) суматори, інвертори, інтегратори комутуються між собою згідно структурної схеми розв'язання диференційного рівняння методом безпосереднього послідовного інтегрування. На рис. 3 наведено один з варіантів структурної схеми, яким реалізовано передатну функцію n -го порядку

$$W(p) = \frac{\frac{R}{R x_n} p^n \pm \frac{R}{R x_{n-1}} \frac{1}{\tau} p^{n-1} \pm \dots \pm \frac{R}{R x_0} \frac{1}{\tau^n}}{p^n + \frac{1}{\tau} \frac{R}{R y_{n-1}} p^{n-1} + \dots + \frac{1}{\tau^n} \frac{R}{R y_0}}, \quad (2)$$

де $\tau = RC$.

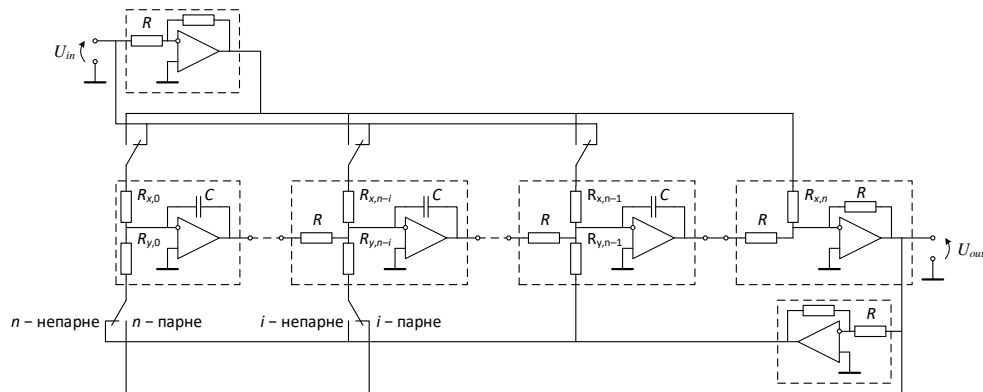


Рис. 3. Структурна ФНЧ за передатною функцією n -го порядку

Спочатку при проектуванні ФНЧ згідно заданої селективності фільтру визначаємо потрібний порядок поліному. Для цього з довідкових джерел використано нормовані частотні характеристики прототипів частотних фільтрів, що апроксимовані за Баттервортом або з використанням формул [6, 7]. Отже, визначаємо мінімальне можливе ціле значення

$$n = -\frac{20 \lg |K(j\omega)|}{20 \lg \omega} = \frac{\alpha}{20 \lg \omega},$$

що у нашому випадку дорівнюватиме $n = 3$.

Як відомо з теорії автоматичного керування, апроксимація за Чебишевим дозволяє отримати рівномірне (рівнохвильове) розподілення похибки у смузі пропускання та велику вибірковість.

Перш ніж приступити до етапу реалізації визначимо передатну функцію при рівнохвильовій апроксимації (апроксимації за Чебишевим). Передатна функція n -го порядку має вигляд

$$W(p) = \frac{a_0}{(p-p_1)(p-p_2)\dots(p-p_n)} = \frac{1}{p^n + b_{n-1}p^{n-1} + b_{n-2}p^{n-2} + \dots + b_1p + b_0}. \quad (3)$$

Знаючи порядок функції Баттерворта ($n = 3$) за довідковими таблицями [6, 7] визначимо коефіцієнти передатної функції

$$W(p) = \frac{1}{p^3 + 2p^2 + 2p + 1} \quad (4)$$

та співмножники знаменника

$$W(p) = \frac{1}{(p+1)(p^2 + p + 1)}. \quad (5)$$

Для забезпечення стабільності в основу структурної схеми ФНЧ покладено каскадну реалізацію, для чого використовуємо відповідний вираз із [7]:

$$W(p) = \frac{U_{\text{вих}}(p)}{U_{\text{вх}}(p)} = W_1(p)W_2(p) = \frac{1}{p+1} \cdot \frac{1}{p^2 + p + 1}, \quad (6)$$

де $W_1(p) = U_{1\text{вих}}(p)/U_{1\text{вх}}(p) = 1/(p+1)$ – передатна функція першої ланки;

$W_2(p) = U_{2\text{вих}}(p)/U_{2\text{вх}}(p) = 1/(p^2 + p + 1)$ – передатна функція другої ланки;

$U_{1\text{вх}}(p) = U_{\text{вх}}(p)$; $U_{2\text{вих}}(p) = U_{\text{вих}}(p)$; $U_{1\text{вих}}(p) = U_{2\text{вх}}(p)$.

При використанні методу послідовного інтегрування рівняння передатної функції кожної ланки

$$W(p) = \frac{U_{\text{вих}}(p)}{U_{\text{вх}}(p)} = \frac{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + a_{n-2} p^{n-2} + \dots + a_1 p + a_0}{p^n + b_{n-1} p^{n-1} + b_{n-2} p^{n-2} + \dots + b_1 p + b_0} \quad (7)$$

доцільно привести до наступної форми:

$$p^n U_{\text{вих}}(p) = (a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_0) U_{\text{вх}}(p) - (b_{n-1} p^{n-1} + \dots + b_0) U_{\text{вих}}(p), \quad (8)$$

звідки

$$U_{\text{вих}}(p) = U_{\text{вх}}(p) \left(a_n + \frac{a_{n-1}}{p} + \dots + \frac{a_0}{p^n} \right) - U_{\text{вих}}(p) \left(\frac{b_{n-1}}{p} + \dots + \frac{b_0}{p^n} \right). \quad (9)$$

Ділення на p в алгебричному рівнянні відповідає інтегруванню у вихідному інтегро-диференційному рівнянні, що зв'язує вхідні і вихідні сигнали фільтру. На основі рівняння (8) для першої і другої ланок (каскадів) маємо:

$$\begin{cases} U_{1\text{вих}}(p) = \frac{1}{p}U_{\text{вх}}(p) - \frac{1}{p}U_{1\text{вих}}(p); \\ U_{\text{вих}}(p) = \frac{1}{p}U_{2\text{вих}}(p) - \left(\frac{1}{p^2} + \frac{1}{p}\right)U_{\text{вих}}(p). \end{cases} \quad (10)$$

Перед побудовою структурної схеми фільтра, яка по суті є і принциповою, та розрахунком параметрів її елементів здійснимо перехід від характеристики прототипу до характеристики синтезованого ФНЧ за допомогою денормування частоти: $p = \bar{p} / \omega_g$.

Для першого каскаду:

$$U_{1\text{вих}}(\bar{p}) = \frac{\omega_g}{\bar{p}}U_{\text{вх}}(\bar{p}) - \frac{\omega_g}{\bar{p}}U_{1\text{вих}}(\bar{p}). \quad (11)$$

Для другого каскаду:

$$U_{\text{вих}}(\bar{p}) = \frac{\omega_g}{\bar{p}}U_{2\text{вих}}(\bar{p}) - \left(\frac{\omega_g^2}{\bar{p}^2} + \frac{\omega_g}{\bar{p}}\right)U_{\text{вих}}(\bar{p}). \quad (12)$$

На рис. 4 наведено схему ФНЧ, у якій використовується інвертуючий вхід підсилювача.

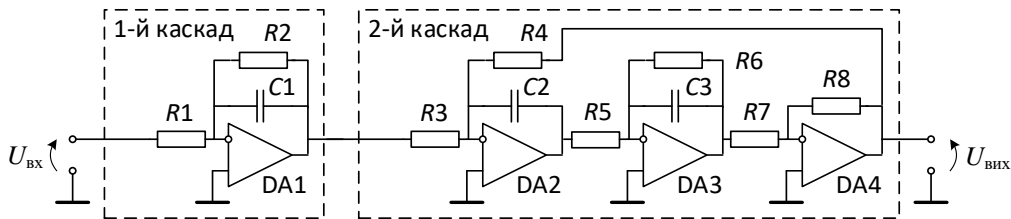


Рис. 4. Схема фільтра низької частоти

Як впливає з формул (11), (12), параметри R_1 , C_1 , а також R_3 , C_2 , та R_5 , C_3 визначаються з рівностей

$$\omega_g = \frac{1}{R_1 C_1} = \frac{1}{R_3 C_2} = \frac{1}{R_5 C_3}.$$

Обравши один з них, до прикладу, $C_1 = 0,1$ мкФ, знаходимо:

$$R_1 = 1/\omega_g C_1 = 1/(2\pi f_g C_1) \approx 31,8 \text{ кОм.}$$

Обираємо найближче номінальне значення $R_1 = 33$ кОм. Отже, $R_1 = R_3 = R_5 = 33$ кОм; $C_1 = C_2 = C_3 = 0,1$ мкФ. З цих же виразів (11), (12) отримуємо $R_2 = R_4 = R_6 = 33$ кОм. Оскільки операційний підсилювач DA4 повинен мати коефіцієнт передачі, рівний одиниці, то можна прийняти $R_4 = R_8 = 33$ кОм.

Для експериментальних досліджень спроектованого ФНЧ використано пакет прикладних програм “Electronics Workbench”. На вхід фільтра подавався корисний сигнал разом з адитивною завадою. При цьому корисний сигнал мав амплітуду 2 В і частоту 50 Гц, а завада амплітуду 0,5 В і частоту 1 кГц. Експериментально отримані результати досліджень спроектованого ФНЧ представлено на рис. 5.

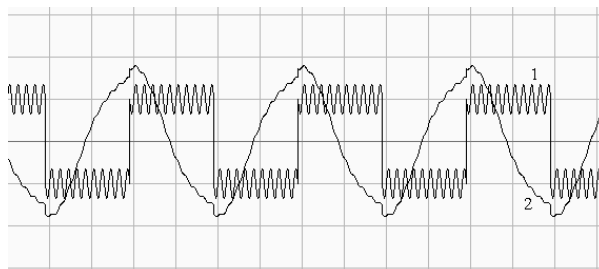


Рис. 5. Експериментальні дослідження спроектованого ФНЧ:
1 – вхідний сигнал з адитивною завадою; 2 – вихідний сигнал

Завдяки розробленому ФНЧ вихідний сигнал автоматизованої системи з інформацією про температуру сушильної шафи відфільтровано від сигналу, що містить адитивну заваду та перевищує його наближено в 4 рази.

Висновки. Проведені теоретичні дослідження дозволили побудувати ефективну автоматизовану систему вимірювання температури сушильної шафи СЕШ-3М. Особливістю розробленої функціональної схеми пристрою сполучення терморпарі ТМК з аналого-цифровим перетворювачем є функціональна завершеність і простота реалізації. Характеристики синтезованого фільтра низьких частот відповідають заданим вимогам щодо забезпечення заводостійкості системи в цілому. Проведено експериментальні дослідження фільтра низьких частот, у результаті яких показано, що вихідний сигнал автоматизованої системи, який містить інформацію про зміну температури сушильної шафи, відфільтровано від сигналу з адитивною завадою та значно її перевищує.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] *M. Fedotova, S. Osadchy, I. Bereziuk, I. Skrynnik.* Investigation of the Effect of Changing the Position of the Gate Valve on the Final Humidity in a Fluidized Bed Grain Dryer According to the Experimental Data //Proc. International Conference “Science and Practice: A New Level of Integration in the Modern World”, Berlin, 2018. – P. 174.
- [2] *M. Fedotova, S. Osadchy, I. Bereziuk, I. Skrynnik.* Investigation of the Impact of Perturbation-Noise on the Quality of Evaluation by the Observation System. Zbiór artykułów naukowych. Z 40 Zbiór artykułów naukowych Konferencji Międzynarodowej Naukowo-Praktycznej, organizowanej dla pracowników naukowych uczelni, jednostek naukowo-badawczych “Inżynieria i technologia Naukowa i Praktyczna Nauka światowa: problemy i innowacje”, 31.10.2017, Warszawa, 2017. – P. 41.
- [3] *Sergey Osadchy, Valentina Zubenko, Marianna Fedotova.* Synthesis of an Optimal Stochastic Stabilization System for an Unstable Multivariable Object with Time Delays in

- Controls // 2018 IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), October, 16-18, 2018 Kyiv, Ukraine. – P. 114-118.
- [4] *S. Osadchy, V. Zozulya*. Combined Method for the Synthesis of Optimal Stabilization Systems for Multidimensional Moving Objects under Stationary Random Effects // International Scientific and Technical Journal "Problems of Management and Informatics". – No. 3. – May-June, 2013. – P. 40-49 (in Russian).
- [5] *A. Tunik, O. Abramovich*. Fundamentals of Modern Control Theory. Kiev, NAU, 2010. – 259 p. (in Ukrainian).
- [6] *V. Azarskov, L. Blokhin, L. Zhytetskii*. Design Methodology of Optimal Stochastic Stabilization Systems. Monography. NAU, Kiev, 2006. – 432 p. (in Russian).
- [7] *F. Aliev, V. Larin*. Stability and Control: Theory, Methods and Applications. V.8: Optimization of Linear Control Systems: Analytical methods and Computational Algorithms. Gordon and Breach Science Publishers, 1998. – 261 pp.
- [8] *Rudolf Saal*. Handbuch zum Filterentwurf. AEG-Telefunken, 1979. – 663 p.
- [9] *D. Johnson, J. Johnson, H. Moore*. A Handbook of Active Filters. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J., 1980. – 244 p.

AUTOMATED NOISE FILTRATION SYSTEM FOR TEMPERATURE MEASUREMENT OF THE DESICCATOR

D. Trushakov¹, O. Kozlovskiy¹, S. Rendzinyak², V. Korud², M. Fedotova¹

¹ *Central Ukrainian National Technical University,
8 University Ave., UA-25006 Kropyvnytskyi, Ukraine
dmitro.trushakov@gmail.com, kozlovskiyioa@gmail.com*

² *Institute of Power Engineering and Control Systems,
Lviv Polytechnic National University,
12 Stepan Bandera St., UA-79013 Lviv, Ukraine
serhii.y.rendziniak@lpnu.ua*

The results of the study of problems of automation of temperature regimes of the desiccator are presented. One of the processes currently subject to immediate automation is the drying of grain, which in most cases is carried out using morally and technically obsolete specialized equipment, such as drying cabinets designed for drying at a certain humidity of grain and other moisture-intensive crops in the agricultural industrial complex. The implementation of integrated automation tools in the grain processing industry can significantly reduce costs, increase the yield of finished products, and increase productivity and improve working conditions.

One of the most common drying cabinets to date is SESH-3M, which is widely used in agricultural enterprises and is used in laboratories of elevators, grain mills, flour mills, cereals, feed, bakery enterprises, and research and development institutions in agriculture. Unfortunately, the level of automation of that drying cabinet does not meet the modern requirements of agricultural production. Therefore, research aimed at developing an automated system of automatic temperature control is relevant. The purpose of this work is to create an automated system for measuring the temperature of the desiccator using modern automation methods and automation elements. Due to the fact that the level of the output signal of the temperature sensor is a few millivolts, the main attention is paid to the synthesis of a low-pass filter to extract a useful signal from the information signal with noise.

The conducted theoretical researches allowed to creation of an effective automated system for measuring the temperature of the desiccator. A feature of the developed functional scheme of the device for connecting the thermocouple with an analog-to-digital converter is the functional completeness and ease of implementation. The characteristics of the synthesized low-pass filter meet the specified requirements to ensure noise reduction of the measured values and noise immunity of the system as a whole. Experimental studies of the low-pass filter were shown that the output signal of the automated system, which contains information about the change in oven temperature, is effectively filtered from the accompanying noise and significantly exceeds it.

Key words: automated system, thermocouple, low-pass filter, desiccator.

Стаття: надійшла до редакції 21.05.2021,
доопрацьована 24.06.2021,
прийнята до друку 25.06.2021