

СЕКЦІЯ 10
АВТОМАТИЗАЦІЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

УДК 620.179.16

ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ ПОЧАТКУ УЛЬТРАЗВУКОВОГО СИГНАЛУ

Козир О. В. Марієнко В. В.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: oleg.kozyr@aer.kpi.ua, marienkovv@gmail.com

Одним із основних параметрів ультразвукової дефектоскопії є час затримки отриманого сигналу по відношенню до відправленого сигналу. Даний параметр розраховується як різниця часових міток початку отриманого та відправленого сигналів, відповідно (1).

$$\Delta t = t_1 - t_0, \quad (1)$$

де t_0 – час початку відправленого сигналу; t_1 – час початку отриманого сигналу [1].

На похибку розрахунку часу затримки впливає похибка визначення початку сигналу. На практиці, у результаті проведення вимірювань у ультразвуковій дефектоскопії отримують масив вимірних значень, тільки невелика частина якого складає тестовий сигнал (рис. 1). Задача полягає у скануванні цього масиву та встановленні часу початку сигналу.

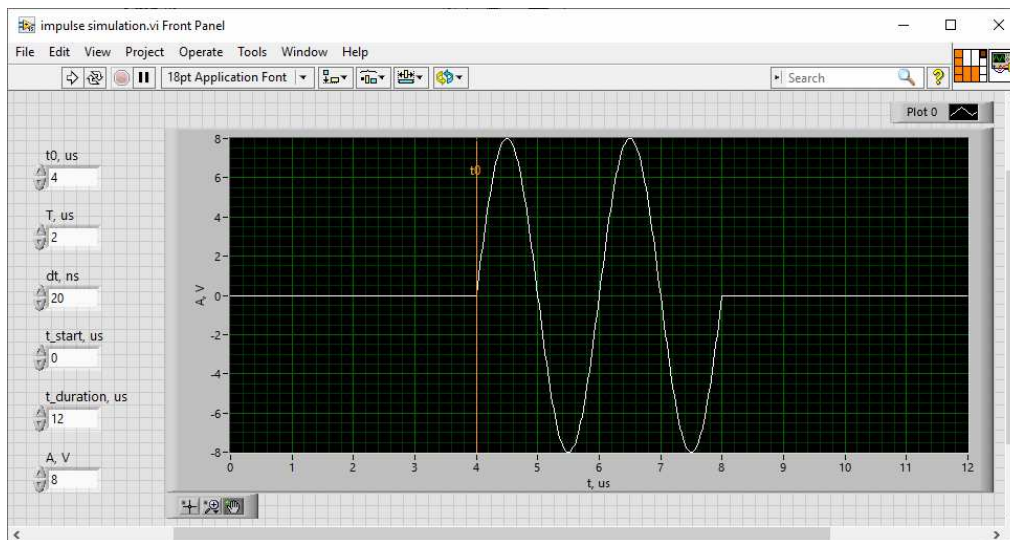


Рис. 1. Лицьова панель віртуального пристрою моделювання тестової вибірки

Поставлена задача була реалізована із використанням середовища графічного програмування та розробки вимірювальних систем, LabVIEW,

компанії National Instruments. Дане середовище дозволяє розробляти віртуальні пристрої для управління реальними пристроями або для імітації останніх.

У даній роботі представлено результати визначення початку сигналу за змодельованою вибіркою. Задача визначення початку сигналу поділялась на дві підзадачі:

1. моделювання тестової вибірки;
2. визначення початку сигналу за змодельованою вибіркою.

З метою виконання вказаних підзадач було розроблено два віртуальних пристрої:

- пристрій моделювання тестової вибірки;
- пристрій визначення початку сигналу.

Віртуальний пристрій моделювання тестової вибірки містить лицьову панель (рис. 1) для задання параметрів вибірки та блок-схему (рис. 2) реалізації алгоритму моделювання.

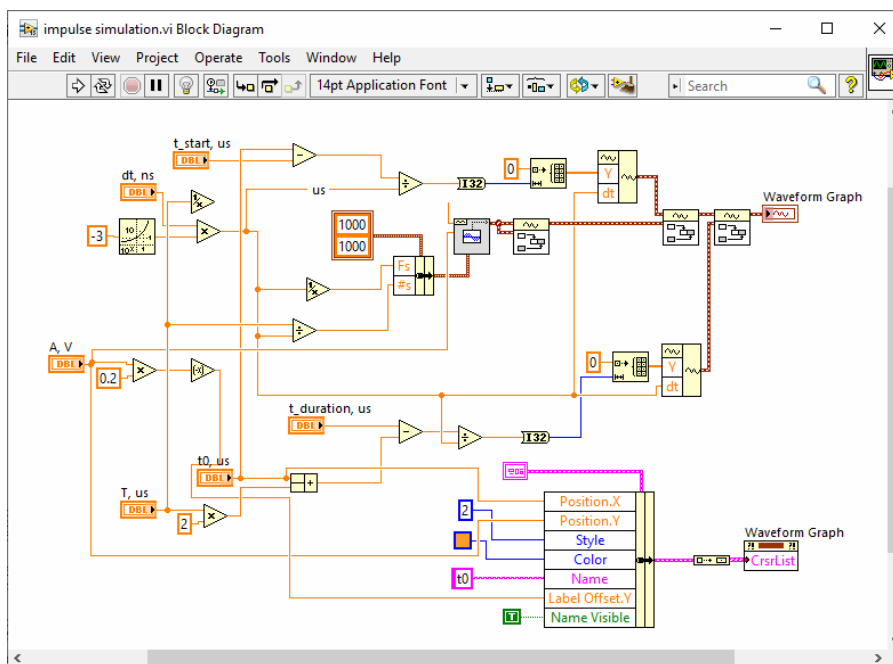


Рис. 2. Блок-схема віртуального пристрою моделювання тестової вибірки

Даний пристрій генерує вибірку тривалістю $t_duration$, мкс (рис. 1). Період дискретизації сигналу задається параметром dt , нс. Перша частина вибірки складає нульові значення, що моделює відсутність сигналу. Тривалість першої частини визначається часом t_0 , мкс. Починаючи з часу t_0 моделюється сигнал синусоїдальної форми. Він містить два періоди. Тривалість періоду задається параметром T , мкс. Сигнал закінчується на часовій мітці $t_0 + 2 * T$ та починається третя частина вибірки, яка складається із нульових значень (рис. 1).

Розроблений віртуальний пристрій використовувався як джерело змодельованої вибірки у віртуальному пристрої визначення початку сигналу. Цей пристрій містить лицьову панель (рис. 3) та блок-схему реалізації алгоритму визначення часу початку сигналу (рис. 4).

Лицьова панель пристрою (рис. 3) містить віджети для задання часу початку модельованого сигналу та середньоквадратичного значення (СКЗ) випадкової величини розподіленої за нормальним законом. Випадкова величина використовувалась для моделювання випадкової адитивної похибки вимірювання сигналу. СКЗ задавалось у одиницях напруги змодельованого сигналу.

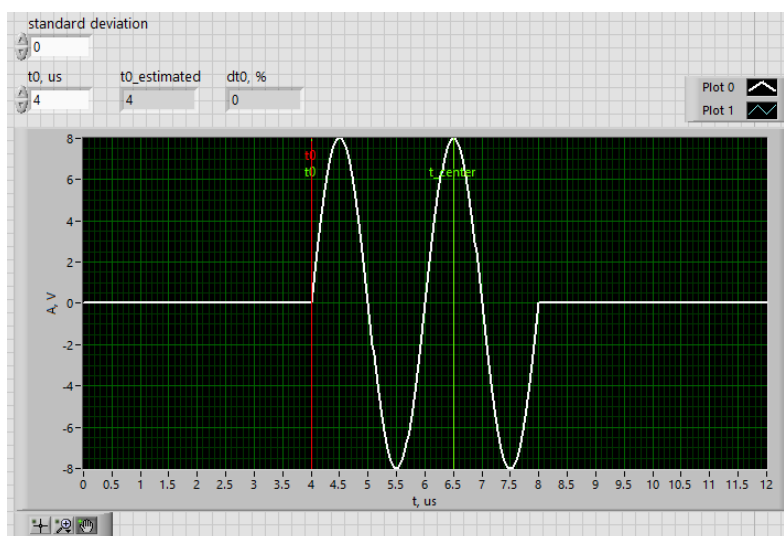


Рис. 3. Лицьова панель віртуального пристрою визначення часу початку сигналу

Також, лицьова панель (рис. 3) містить віджети виведення результату визначення часу початку сигналу та оцінки відносної похибки його визначення.

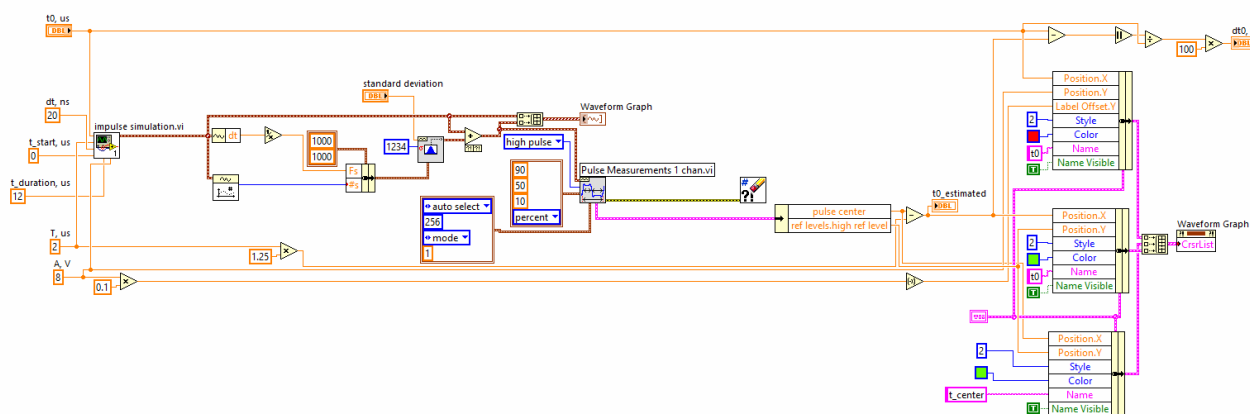


Рис. 4. Блок-схема віртуального пристрою визначення часу початку сигналу

Тестування розроблених віртуальних пристроїв виконувалось на декількох змодельованих вибірках. Перша вибірка не містила випадкової похибки (рис. 3) і тому час початку сигналу був визначений без похибки,

що підтвердило правильність розробленого алгоритму. У подальших вибірках наявність випадкової похибки викликало похибку визначення часу початку сигналу. Відносна похибка становила 1 % для СКЗ в 1 В (рис. 5).

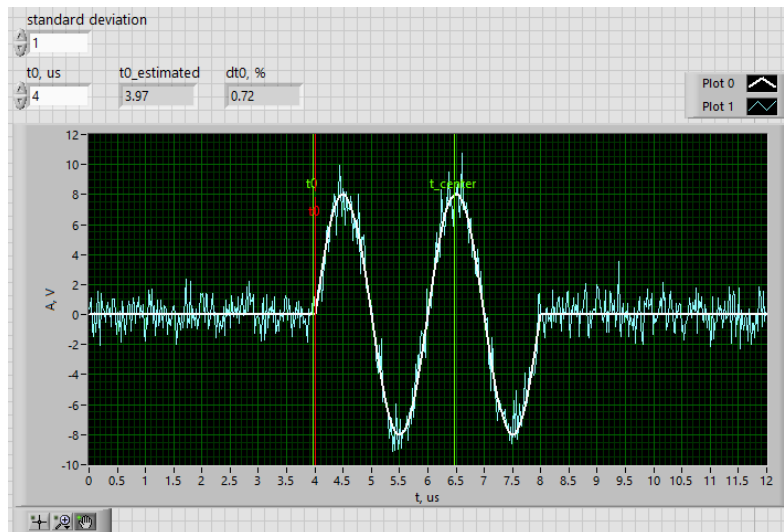


Рис. 5. Визначення часу податку сигналу для СКЗ в 1 В

У разі коли СКЗ становило 5 В, то відносна похибка склала 12 % (рис. 6).

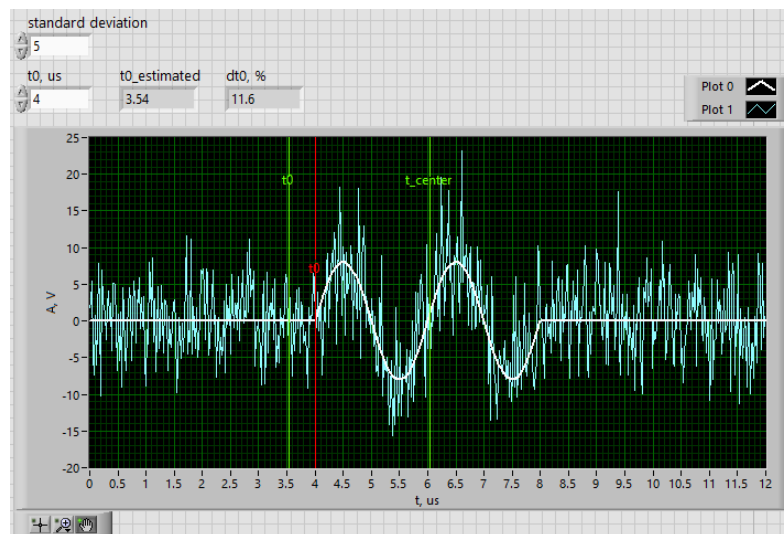


Рис. 6. Визначення часу податку сигналу для СКЗ в 5 В

Розроблені віртуальні пристрої визначення часу початку сигналу можуть бути використані у системах обробки вимірних даних ультразвукового неруйнівного контролю для аналізу часу затримки розповсюдження хвилі у тестовому матеріалі.

Ключові слова: час початку сигналу, ультразвук, неруйнівний контроль.

Література

- [1] N. G. Paulter, D. R. Larson, and J. J. Blair, “The IEEE standard on transitions, pulses, and related waveforms, Std-181-2003” in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 53, no. 4, pp. 1209-1217, Aug.

УДК 621.317.08

ТОЧНІСТЬ ОЦІНЮВАННЯ ХАРАКТЕРНОГО ПАРАМЕТРУ ДВОКОМПОНЕНТНИХ СУМІШЕЙ

Луцик Д. В.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: lushchik.dv@gmail.com

Технологічний процес виготовлення продукції в багатьох галузях промисловості включає процедуру приготування сумішей, під час якої необхідно відтворювати і підтримувати необхідні співвідношення компонент згідно встановленим нормам. Для цього, за результатами вимірювань, здійснюється процедура градування співвідношення компонент, при якому забезпечується задане значення характерного параметру готової суміші, який забезпечує її якість. При реалізації технологічного процесу проводяться контрольні-вимірювальні операції, результати яких несуть інформацію про правильність перебігу технологічного процесу.

Найпростішим випадком сумішей є суміші з двох компонентів. Зазвичай, для даних міксів, співвідношення складників нормують за m масою. У такому разі модельне рівняння процесу приготування суміші має вигляд:

$$y(m) = a_0 x_1(m) + b_0 x_2(m).$$

Характерним параметром таких сумішей у багатьох галузях промисловості є відносний вміст вологи, що має знаходитись в певних межах. Причому допустиме відхилення вологості від нормованого значення значно менше ніж допустиме відхилення маси складників. В залежності від умов виробництва, модельне рівняння може реалізовуватися шляхом цифрового або аналогового введення коефіцієнтів a та b , які показують пропорційний склад суміші.

Характерною особливістю проведення вимірювань у промислових умовах є вплив завод різних видів, з переважанням завод адитивного характеру. Отож безпосереднє вимірювання вологи проводиться з використанням паралельно-послідовної структурної організації. Так як компоненти суміші за фізичними властивостями однакові, то здійснюється рознесення процедури вимірювання компонент у часі. В цьому разі залишається тільки вплив зміщення Δ характеристики перетворення вимірювального каналу (ВК), яке залишається незмінним при вимірюванні компонент.

Компоненти можуть надходити від різних постачальників і відповідно можуть мати різні значення вологості. Тому, перед початком виробництва суміші з наявних компонентів, необхідно провести калібрування результату визначення вологості характеристичної величини суміші $y(h)$, отриманої на підставі прямих вимірювань вологості компонент з послідовним обчисленням, за наведеним модельним значенням, та порівнянням з нормованим значенням $y_0(h)$. За результатами калібрування змінюють співвідношення a до b , чим

забезпечують виробництво суміші з нормованим значенням вологості, а саме $y(h) = y_0(h)$. Водночас дану процедуру необхідно здійснювати при однакових масах компонентів. Множення на вагові коефіцієнти a та b проводиться після вимірювального перетворення. Результат опосередкованого вимірювання вологості суміші буде дорівнювати:

$$(y + \Delta y) = ax_1 + bx_2 + \Delta(a + b).$$

Квадрат невизначеності результату оцінювання характерного параметру суміші визначається з виразу:

$$u^2(y) = u^2(\Delta)(a^2 + b^2 + 2ab),$$

де $2abu^2(\Delta)$ – доданок, обумовлений кореляцією, яка виникає внаслідок проведення математичних дій над результатами вимірювань відповідно до модельного рівняння та внаслідок наявності спільної впливової величини, а саме зміщення Δ характеристики перетворення ВК.

Для зменшення впливу зміщення Δ характеристики перетворення ВК при проведенні контрольних-вимірювальних операцій, у роботі [1] запропоновано відтворювати компоненти коефіцієнтом при іншій вхідній величині, а саме першу компоненту як $ax_1 \cdot b$, та другу компоненту як $bx_2 \cdot a$. Дана операція дозволяє збільшити відношення значення інформативного параметру суміші до зміщення Δ характеристики перетворення ВК, а також привести рівні сигналів, що подаються на ВК, до одного рівня. Щоб привести рівняння обчислення опосередкованого вимірювання до вихідного модельного рівняння, результати масштабуються зворотно вхідному масштабуванню. В результаті квадрат невизначеності буде дорівнювати:

$$u'^2(y) = u^2(\Delta) \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} + \frac{2}{ab} \right).$$

Порівнявши формули квадратів невизначеності до застосування модифікованого відтворення вхідних компонент і після застосування описаного способу, можна відзначити суттєве зменшення невизначеності, викликаной впливом зміщення Δ характеристики перетворення в умовах наявності обчислювальних операцій.

Результати контрольних оцінювання можна використовувати для управління технологічним процесом. Так як a та b більше 1, ефективність методу зростає зі збільшенням значень a та b .

Ключові слова: двокомпонентна суміш, точність оцінювання вологості, зміщення характеристики перетворення.

Література

- [1] Є. Т. Володарський, та Д. В. Луцик, “Невизначеність оцінки характеристичної величини двокомпонентної суміші”, *Український метрологічний журнал*, № 4, с. 26–30, груд. 2023. DOI: 10.24027/2306-7039.4.2023.298648

УДК 004.032.26

ШТУЧНІ НЕЙРОННІ МЕРЕЖІ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ І ПРОГНОЗУВАННЯ ПРАЦЕЗДАТНОГО СТАНУ ЛІТІЄВИХ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ БЕЗПІЛОТНИХ СИСТЕМ

Почернін С. П.

*Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, Київ, Україна
E-mail: vstandard@ukr.net*

Останнім часом спостерігається бурхливий розвиток та застосування безпілотних систем повітряного та наземного базування, особливо з початком повномасштабної агресії російської федерації проти України. В безпілотних літальних апаратах (БпЛА) та наземних роботизованих комплексах (НРК), як підвиду безпілотних систем, широко застосовують хімічні джерела струму, головним чином літєві акумулятори та батареї на їх основі (ЛіАБ). Експлуатація в бойових умовах за критичних значень параметрів впливу, наприклад, зміна режимів розрядно-зарядних циклів, різкі коливання температури та вологи, знакозмінні ударні та вібраційні навантаження, пошкодження різного ступеню тощо, вимагають постійного моніторингу та прогнозування технічного (працездатного) стану ЛіАБ, використання актуальної інформації в CALS-подібних системах та системах зінтегрованої логістичної підтримки (ILS).

Штучні нейронні мережі (ШНМ) підходять для визначення працездатного стану ЛіАБ, зокрема таких показників: стан заряду (State of Charge, SoC) [1], показник придатності до використання (стан “здоров'я” – State of Health, SoH) [2], залишковий ресурс придатності (термін служби – Remaining Useful Life, RUL) [3]. ШНМ разом з алгоритмами методів опорних векторів (The support vector machine – SVM), глибокого навчання (DL) належать до технологій машинного навчання (ML). Математичний апарат ШНМ для визначення показників працездатності ЛіАБ пов'язаний з методами, заснованими на моделях ЛіАБ (model-based methods), на основі даних (data-driven methods) та на їх поєднанні.

Необхідно зауважити, що профілі розрядних циклів для акумуляторних батарей НРК та БпЛА можуть суттєво відрізнитись. Наприклад, для ЛіАБ БпЛА коптерного типу особливо критичним є фаза повернення з місії (посадка) – батарея вже виснажена, але має видавати піковий струм протягом ~100 сек. Водночас для БпЛА літакового типу важливим є запас потужності під час злету, а посадка менш енерговитратна [4]. Відповідно під час здійснення місії (польоту) моніторинг SoC ЛіАБ більш важливий, в той час як для підготовки місії – технічного обслуговування, ремонту, логістичних операції на перший план виходить визначення і прогнозування SoH і RUL. Для визначення SoC використовують такі архітектури, як глибокі нейронні мережі (DNN) [5],

нейронні мережі з радіальними базисними функціями (RBFNN) [6], адаптивні нейро-нечіткі системи виведення (ANFIS) [7] тощо.

Для визначення SoH та прогнозування RUL ЛіАБ досліджуються різні архітектури ШНМ, такі як нейронні мережі прямого поширення (FNN), рекурентні нейронні мережі (RNN) та мережі з довгою короткочасною пам'яттю (LSTM) [8], яким властива досить висока ефективність завдяки своїй здатності обробляти послідовні дані – часові ряди. Також застосовуються генеративні змагальні мережі (Generative Adversarial Networks, GAN) [9]. Найкращі моделі машинного навчання досягають перевіреної точності класифікації на рівні 96,3 %, (що на 20,4 % більше, ніж у початкової моделі) і середньої помилки класифікації на тестовій вибірці, що становить 7,7 [10].

Термін служби (RUL) ЛіАБ визначають, як правило, у % від 100 (для нових батарей) або в кількості зарядно-розрядних циклів. Точність в прогнозуванні RUL літій-іонних акумуляторів із застосуванням машинного навчання (ML) та ШНМ з використанням 100 або менше попередніх циклів суттєво зросла порівняно з попередніми дослідженнями: в статті [11] зазначалась середня абсолютна похибка (MAE) прогнозування, що становила 78 циклів для набору тестової вибірки зі 100 попередніх циклів. Крім того, середня абсолютна похибка становила 103 цикли, коли використовувались дані лише першого циклу. В статті [12] повідомляється про те, що [...LSTM перевершує інші архітектури моделей в оцінці ємності батареї: середньоквадратична помилка (RMSE) тесту знизилася на 4,69 % і 19,16 % порівняно з FNN і CNN відповідно]. В статті [13], використовуючи DNN, заявлено про можливість прогнозувати залишковий ресурс батареї із середньою абсолютною похибкою у відсотках 6,46 % за один цикл тестування. В роботі [14] зроблено наступні висновки: в прогнозуванні RUL методи машинного навчання порівняно з методами адаптивної фільтрації та стохастичними методами за середнім показником точності на 32,02 % точніші, а період прогнозування на 9,87 % менший, ніж у середньому у двох інших методів. Водночас, алгоритми ШНМ, як і ML в цілому потребують великих обсягів даних, що вимагає збільшення часу обчислень або обчислювальних потужностей. Підкреслюється, що запропонована технологія може робити прогнозування без попередніх даних про конкретну електрохімічну систему (ЛіАБ), що зменшує залежність методів прогнозування від даних. В таблиці 1 наведено результати порівняльного аналізу різних методів прогнозування RUL згідно з [15].

Важливо зазначити, що попередня обробка даних методами нормалізації або т. зв. “інженерія ознак” суттєво впливає на точність моніторингової або прогнозної моделі. Конкретна архітектура ШНМ та її параметри, наприклад, кількість шарів LSTM є варіабельними залежно від набору даних, електрохімічної системи ЛіАБ і можливого компромісу між складністю і точністю моделі (алгоритму).

Таблиця 1. Порівняльний аналіз різних методів прогнозування RUL

Група методів	Метод (алгоритм реалізації)	Кількість циклів тестування	Результат /точність прогнозування
Адаптивна фільтрація (Калмана, часток та ін.)	UPF-OMKRVМ	70	RMSE 0.0051 MAPE 0.2592
	AUKF-GASVR	60	RMSE 0.0134 MAE 0.0091
	UKF-ВР	172	RMSE 0.0078 MAE 0.0070
	U-LOCР-PF	70	віднос. прогнозна похибка 1 % RMSE 0.01983
	IUPF	30	похибка прогноз. 0 % , RMSE Mean 0.001102
	SCPF	90 % of AL	Абс. похибка 14
	UKF	100	RMSE 0.01156 MAPE 0.1611
	UPF	32	RMSE 0.00250, похибка прогноз. 2.04 %
Машинне навчання	EMD-DNN-LSTM	130	RMSE 0.0021
	EEMD	-	MAPE 0.0244 RMSE 0.0232
	MC-LSTM	-	RMSE 0.0168 MAPE 0.0105
	Auto CNN-LSTM	Вих.розмір енкодера 50	RMSE 0.0503 Accuracy 94.97 %
	PA-LSTM	90	RMSE 0.0166
	PDD-SVM		Accuracy 94 % RMSE 0.003108
	ABC-SVR	84	MAE 0.0072 RMSE 0.0139
	RVM-GM	100	RMSE 0.00960422
	LSTM RNN	354	Стандарт.відх. 11
	ADNN	20	RMSE 0.0666 точність 93.34 %
	DBN-RVM	-	MAE 0.107106 and RMSE 0.012754
	IP-RVM	40	RMSE 0.0173
	SVM		RMSE 0.1659
	AFS	300	RMSE 0.0836
Стохастичні методи	ИИs-GPR	-	MAPE 0.0565 RMSE 0.0005
	GPM	60	RMSE 0.0158
	WPME	68	MSE 0.001
Інші методи	EMD-ARIMA	60	RMSE 0.0209
	Naive Bayes	16.1	RMSE 0.17

Прим. RMSE – кореневе сер. кв. відхилення; MSE – сер. кв. похибка; MAPE – середнє відсоткове значення похибок; MAE – сер. абс. похибка.

Залежно від технічно завдання реалізація конкретної архітектури ШНМ в BMS – система керування батареєю може бути виконана апаратно – в системі на кристалі (System-on-a-chip), наприклад на платі BMS або за допомогою ресурсів в хмарному середовищі [16].

Із практикою застосування ШНМ і інших технологій ML для моніторингу і прогнозування працездатності акумуляторних систем можна ознайомитись в деяких інших публікаціях, наприклад [17].

В цілому, можливості програмно-апаратної реалізації ШНМ та інших алгоритмів ML для моніторингу і прогнозування з високою точністю (> 90 %) параметрів працездатності (SoC, SoH, RUL та ін.) ЛіАБ безпілотних систем зростають із збільшенням обчислювальних потужностей Sys-on-Chip, хмарних обчислень та появою нових спеціалізованих мікросхем – трекерів ЛіАБ.

Ключові слова: літєві акумулятори, батареї, працездатний стан, машинне навчання, штучні нейронні мережі, методи визначення, моніторинг, прогнозування працездатного стану, стан заряду, залишковий ресурс придатності, термін служби, lithium-ion batteries, state of charge (SoC), state of health (SOH), remaining useful life (RUL), model-based methods, data-driven methods.

Література

- [1] BU-903: How to Measure State-of-charge [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://batteryuniversity.com/article/bu-903-how-to-measure-state-of-charge>
- [2] BU-105: Battery Definitions and what they mean [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://batteryuniversity.com/article/bu-105-battery-definitions-and-what-they-mean>
- [3] BU-901b: How to Measure the Remaining Useful Life of a Battery [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://batteryuniversity.com/article/bu-901b-how-to-measure-the-remaining-useful-life-of-a-battery>
- [4] A. Bills, Sh. Sripad, L. Fredericks, M. Guttenberg, D. Charles, E. Frank, and V. Viswanathan, “A battery dataset for electric vertical takeoff and landing aircraft”, *Scientific Data*, 10:344, pp.1-7, 2023. DOI: 10.1038/s41597-023-02180-5.
- [5] D. N. T. How, M. A. Hannan, M. S. Hossain Lipu, etc., “State-of-Charge Estimation of Li-Ion Battery in Electric Vehicles: A Deep Neural Network Approach”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, is. 5, pp. 5565-5574, 2020. DOI: 10.1109/TIA.2020.3004294
- [6] G. Zhang, B. Xia, J. Wang, B. Ye, Y. Chen, Zh. Yu, and Y. Li, “Intelligent state of charge estimation of battery pack based on particle swarm optimization algorithm improved radical basis function neural network”, *Energy*, vol. 262, Part A, Page 125375, 2023. DOI: 10.1016/j.est.2022.104211
- [7] H. Dai, P. Guo, X. Wei, Z. Sun, and J. Wang, “ANFIS (adaptive neuro-fuzzy inference system) based online SOC (State of Charge) correction considering cell divergence for the EV (electric vehicle) traction batteries”, *Energy*, Volume 80, pp. 350-360, 1 February 2015. DOI: 10.1016/j.energy.2014.11.077
- [8] K. Kaur, A. Garg, and X. Cui, “Deep learning networks for capacity estimation for monitoring SOH of Li-ion batteries for electric vehicles”, *International Journal of Energy Research*, 2021. DOI: 10.1002/er.6005
- [9] D. Puente, J. Amelibia, I. Cumplido, and A. Duo, “Data-driven methodology for optimal Lithium-ion battery RUL prediction”, *Research Square*, 2023. DOI: 10.21203/rs.3.rs-2635321/v1

- [10] Z. Fei, Z. Zhang, F. Yang, K.-Leung Tsui, and L. Li, “Early-stage lifetime prediction for lithium-ion batteries: A deep learning framework jointly considering machine-learned and handcrafted data features”, *Journal of Energy Storage*, vol. 52, Part B, 2022. DOI: 10.1016/j.est.2022.104936
- [11] Paulson, Noah H. and Kubal, Joseph and Ward, Logan and Saxena, Saurabh and Lu, Wenquan and Babinec, Susan J., “Feature Engineering for Machine Learning Enabled Early Prediction of Battery Lifetime”, *SSRN Electronic Journal*, p. 30, 2021. DOI: 10.2139/ssrn.3985424/
- [12] K. Kaur, A. Garg, and X. Cui, “Deep learning networks for capacity estimation for monitoring SOH of Li-ion batteries for electric vehicles”. DOI: 10.1002/er.6005
- [13] Chia-Wei Hsu, Rui Xiong, Nan-Yow Chen, Ju Li, and Nien-Ti Tsou, “Deep neural network battery life and voltage prediction by using data of one cycle only”, *Applied Energy*, vol. 306, Part B, 2022. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.118134
- [14] Sh. Wang, S. Jin, D. Deng, C. Fernandez, “A Critical Review of Online Battery Remaining Useful Lifetime Prediction Methods”, *Frontiers in Mechanical Engineering*, vol. 7, 2021. DOI: 10.3389/fmech.2021.719718
- [15] Sh. Jiao, G. Zhang, M. Zhou, and G. Li, “Comprehensive Review of Research Hotspots on Battery Management Systems for UAVs”. *IEEE Access*, vol. 11, pp. 84636-84650, 2023. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3301989
- [16] W. Li, M. Rentemeister, J. Badede, D. Jost, D. Schulte, D. U. Sauer, “Digital twin for battery systems: Cloud battery management system with online state-of-charge and state-of-health estimation”, *Journal of Energy Storage*, 30, art. no. 101557, 2020.
- [17] K. Smith, in *International Battery. Seminar & Exhibit*. July 28-30, 2020. Image credit: Nicholas Brunhart-Lupo. & Francois Usseglio-Viretta. 2021, NREL/PR-5700-78367.

УДК 537.636

ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ ВИЯВЛЕННЯ РУХОМИХ ПІДВОДНИХ ОБ’ЄКТІВ

Самарцев Ю. М.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: Y.Samartsev@kpi.ua

Відомою перешкодою виявлення рухомих підводних об’єктів системами, оснащеними сенсорами параметрів електричного і магнітного полів (ЕМП), є наявність суттєвих завад у вигляді флікер шуму в діапазоні частот 0,01 Гц – 1,0 Гц на фоні суттєвого зниження рівня електромагнітного випромінювання джерелами ЕМП [1]. На фоні типового діапазону чутливості магнітних сенсорів 50 – 100 мВ/нТ на частотах, менше 1,0 Гц, шум магнітного поля може досягати значень 0,2 – 0,3 нТ/Гц. Таке співвідношення сигнал/шум призводить до значного підвищення похибки визначення координат рухомого об’єкта, яка може досягати 20 % і більше [2]. Подібний характер співвідношення сигнал/шум спостерігається і для параметрів електричного поля. В той же час якраз в такому частотному діапазоні знаходяться найбільш суттєві складові електромагнітного поля, за параметрами яких визначаються координати об’єктів. Постає задача скоригувати амплітудно-частотну

характеристику каналу вимірювання параметрів ЕМП з метою підвищення співвідношення сигнал/шум в вище означеному діапазоні частот. З метою побудови вимірювального каналу з такою АЧХ було проведено моделювання флікер шуму і бажаної АЧХ вторинного каналу перетворення сигналу сенсора. Модель сенсора магнітного або електричного поля достатньо повно описується моделлю ланки аперіодичного процесу першого порядку:

$$W_{0in}(f) = \frac{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau_0}{1 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau_0}.$$

Модель флікер шуму згенерована сумою трьох ланок з модулями АЧХ:

$$F_{app1}(f) = \frac{k_1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{sr1}}\right)^2}}; F_{app2}(f) = \frac{k_2}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{sr2}}\right)^2}}; F_{app3}(f) = \frac{k_3}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{sr3}}\right)^2}}.$$

$$F_{appADD}(f) = F_{app1}(f) + F_{app2}(f) + F_{app3}(f).$$

Для моделювання скорегованого каналу вимірювання використано вираз:

$$W_{01}(f) = \frac{[j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f]^2}{[j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f]^2 + [j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f] \cdot b_1 + c_1}.$$

Параметри b_1 та c_1 моделі дозволяють досліджувати ефективність впливу корекції АЧХ на посилення співвідношення сигнал/шум флікер шуму.

На рисунку 1 представлена АЧХ згенерованого флікер шуму.

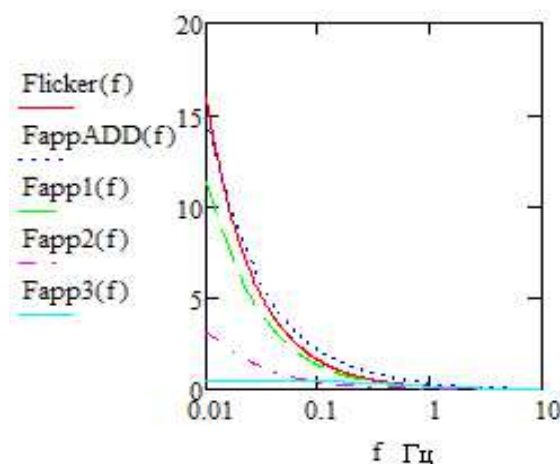


Рис. 1. АЧХ складових $F_{app1}(f)$, $F_{app2}(f)$, $F_{app3}(f)$ та флікер шуму $F_{appADD}(f)$

На рисунку 2 представлені АЧХ сенсора ЕМП та скорегована АЧХ каналу перетворення сигналу сенсора при значеннях $b_1 = 0,544$, $c_1 = 0,197$.

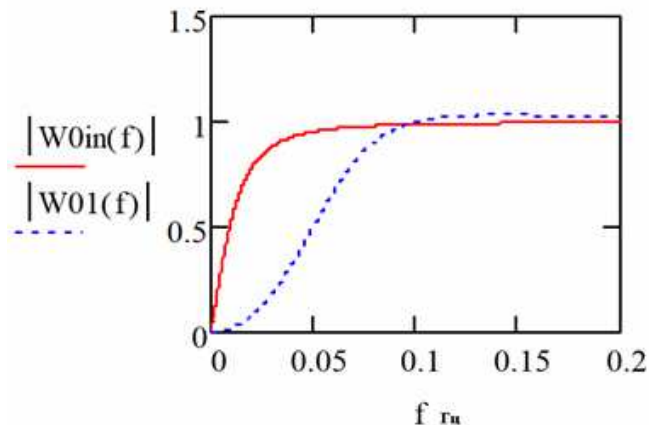


Рис. 2. АЧХ сенсора ЕМП $W_{0in}(f)$ та скорегована АЧХ каналу перетворення сигналу сенсора $W_{01}(f)$

Порівнюючи АЧХ сенсора $W_{0in}(f)$ та скорегованого каналу перетворення $W_{01}(f)$ видно, що в діапазоні частот від 0,01 Гц до 0,1 Гц коефіцієнт придушення флікер шуму скорегованим каналом значно перевищує коефіцієнт придушення флікер шуму сенсором.

Ключові слова: електромагнітне поле, флікер шум, сигнал/шум.

Література

- [1] Jinhong Wang, Bin Li, Lianping Chen, and Li Li, “A Novel Detection Method for Underwater Moving Targets by Measuring Their ELF Emissions with Inductive Sensors”, *Sensors*, 17(8), p. 1734, 2017. <https://doi.org/10.3390/s17081734>
- [2] Jia-wei Zhang, Peng Yu, Run-xiang Jiang, and Tao-tao Xie, “Real-time localization for underwater equipment using an extremely low frequency electric field”, *KeAi. Defence Technology*, vol. 26, pp. 203-212, 2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214914722001441>

УДК 621.317

АНАЛІЗ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОМАТИЗОВАНОГО ВТОРИННОГО ЕТАЛОНУ ОДИНИЦІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ ДЛЯ ПРОМИСЛОВОГО ДІАПАЗОНУ ЧАСТОТ ПРИ ВИМІРЮВАННІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ

¹⁾Шевкун С. М., ¹⁾Малес С. І., ²⁾Добролюбова М. В.

¹⁾Державне підприємство «Всеукраїнський державний науково-виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів» (ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ»);

²⁾Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна
E-mail: shvckun@ukrcsm.kiev.ua, m.dobroliubova@kpi.ua

В ДП «Укрметртестстандарт» з 2001 року експлуатується Вторинний еталон одиниці електричної потужності для промислового діапазону частот ВЕТУ 08-08-01-08. Еталон призначений для зберігання, відтворення та

передавання одиниці електричної потужності, а також калібрування широкої номенклатури еталонних лічильників класів точності 0,1 та 0,05, таких як MTE PTS 3.3; Applied Precision RS 2130, RS 2330, RS 1130, RS 1330; BX-33; MTE SWS 1.3, PWS 2.3 GENX, CHECKMETER 2.3 GENX; Itron SM 3050 [1].

У 2023-2024 роках в НВІ вимірювань електромагнітних величин та оцінки відповідності засобів вимірювальної техніки ДП «Укрметртестстандарт» у формі НДР здійснюється модернізація зазначеного Вторинного еталону.

Метою модернізації є:

- автоматизація вимірювальних процесів;
- підвищення продуктивності та зниження собівартості метрологічних робіт, які виконуються на еталоні;
- розширення динамічного діапазону;
- відновлення ресурсу обладнання, що входить до складу еталону.

Модернізація Вторинного еталону здійснюється шляхом включення до його складу трифазного джерела живлення PS3 [1] для калібрування еталонних лічильників електроенергії виробництва компанії MeterTest, Польща (рис. 1), у комплекті з прецизійним трифазним еталонним лічильником електроенергії RD-33 [1] виробництва компанії Radian Research, США (рис. 2).

Еталонний лічильник Radian Research RD-33 використовує з трифазним джерелом живлення MeterTest PS3 сумісне програмне забезпечення, завдяки чому вони створюють єдиний еталонний програмно-апаратний комплекс.

Для визначення метрологічних характеристик Вторинного еталону при вимірюванні електричної потужності та для підтвердження їх відповідності вимогам технічного завдання у лютому 2024 року було здійснено калібрування еталонного лічильника Radian Research RD-33 на Національному (державному первинному) еталоні одиниць електричної потужності та коефіцієнта потужності (ДЕТУ 08-08-02).

Національний (державний первинний) еталон має простежуваність до Первинного еталону потужності змінного струму Національного метрологічного інституту РТВ (Physikalisch-Technische Bundesanstalt), Німеччина, про що свідчить відповідний сертифікат калібрування.



Рис. 1. Трифазне джерело живлення PS3



Рис. 2. Прецизійний трифазний еталонний лічильник електроенергії

Калібрування Radian Research RD-33 було проведено в діапазонах [2]:

- струму (A): 120; 80; 50; 20; 10; 5; 2; 1; 0,5; 0,2; 0,1; 0,05; 0,02; 0,01; 0,005;
- напруги (V): 60; 120; 240.

Вимірювання проводились при значеннях коефіцієнту потужності: 0,5 L; 1,0; 0,5 C.

Було проведено калібрування при вимірюванні активної та реактивної електричної потужності. В результаті аналізу сертифікату калібрування та протоколу вимірювань [3] визначено, що:

1. Відносне відхилення показів лічильника знаходиться в межах:
 - від -0,009 % до 0,01 % (для активної потужності);
 - від -0,001 % до 0,01 % (для реактивної потужності).
2. Відносне середньоквадратичне відхилення результатів вимірювання знаходиться в межах:
 - від 0 % до 0,009 % (для активної потужності);
 - від 0 % до 0,01 % (для реактивної потужності).
3. Відносна розширена невизначеність складає:
 - від $\pm 0,005$ % до $\pm 0,008$ % (для активної та реактивної потужності).

Отриманні результати калібрування підтверджують відповідність метрологічних характеристик Вторинного еталону при вимірюванні електричної потужності вимогам технічного завдання.

Ключові слова: еталон потужності, метрологічні характеристики.

Література

- [1] S. Shevkun, M. Dobroliubova, and O. Statsenko, “Structural renovation of the Secondary standard of the electric power unit for the industrial frequency range”, *Measurements infrastructure*, Vol. 5, pp. 1-6, 2023. DOI: 10.33955/v5(2023)-029
- [2] ДП “Укрметртестстандарт”. (26-28.02.2024). *Сертифікат калібрування. Портативний лічильник-ватметр еталонний трифазний Radian Research RD-33.*
- [3] ДП “Укрметртестстандарт”. (28.02.2024). *Протокол первинного калібрування еталону № UA/11/240228/000095. Портативний лічильник-ватметр еталонний трифазний Radian Research RD-33.*

УДК 621.319.54

ТЕРМОШУМОВИЙ ДЕФЕКТОСКОП ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ВИРОБІВ

Шевченко К. Л., Яненко О. П., Богомазов С. А.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: k.shevchenko@kpi.ua

Сучасні досягнення в галузі хімії високомолекулярних сполук зумовлюють масштабну заміну металевих деталей машин та агрегатів на аналоги, виготовлені з поліпропілену, поліетилену, полістиролу та інших діелектричних

матеріалів. За експлуатаційними властивостями такі вироби часто перевершують металеві конструкції.

При виготовленні виробів складної форми з діелектричних матеріалів останнім часом використовують дві технології – лиття під тиском та друк за допомогою 3-D принтера. Позитивними рисами цих процесів є відсутність відходів при виготовленні заготовки деталі, мінімальна кількість механічних операцій при формуванні кінцевого виробу та, відповідно, витрат часу.

Проте, в процесі виготовленні діелектричних виробів іноді виникають дефекти у вигляді мікротріщин, мікробульбашок повітря або мікророзшарування матеріалу на певних ділянках. Для невідповідальних вузлів такі дефекти не є критичними. Але, при роботі виробів при високих механічних або термічних навантаженнях наявність таких дефектів часто призводить до руйнування виробу.

Традиційні методи [1, 2] виявлення дефектів в діелектричних матеріалах не дозволяють виявити зазначені вище порушення цілісності саме через їх розміри. Тому актуальною є задача розробки методів та створення пристроїв, які дозволяють виявляти дефекти на рівні мікропошкоджень матеріалу.

Одним з напрямків вирішення цієї задачі є використання власного електромагнітного випромінення (ЕМВ) діелектричних матеріалів. Фізична сутність формування власного ЕМВ діелектричних матеріалів [3] полягає у хаотичному русі носіїв заряду, що викликає часову нерівномірність їх розподілу в об'ємі матеріалу. У свою чергу це призводить до виникнення хаотичного перерозподілу електричних зарядів в матеріалі. В результаті в матеріалі на молекулярному рівні хаотично утворюються ділянки, електричні потенціали яких відрізняються. Природно, між ними виникають мікроструми, які врівноважують різницю потенціалів та створюють відповідне ЕМВ.

Середнє значення квадрату хаотичної напруги, описується формулою Найквіста:

$$\overline{U}^2 = 4kTR\Delta f, \quad (1)$$

де k – постійна Больцмана; T – термодинамічна температура; R – електричний опір ділянки матеріалу; Δf – смуга частот, в якій утворюється хаотична зміна різниці потенціалів.

Аналіз рівняння (1) свідчить, що величина квадрату напруги, а відповідно і рівень власного ЕМВ залежить від температури матеріалу, тому таке випромінення називають радіотепловим. Враховуючи широкий спектр власного випромінення, часто використовують терміни тепловий шум та термошумове випромінення. Другий параметр, що безпосередньо впливає на рівень власного

ЕМВ – це електричний опір матеріалу. Саме його величина дозволяє виявляти дефекти нано- та мікророзмірів у діелектричних матеріалах.

Основна проблема, що виникає при вимірюванні власного ЕМВ діелектричних матеріалів, полягає в тому, що спектральна щільність його потужності становить $10^{-14} \dots 10^{-12}$ Вт/см². За наявності дефектів у досліджуваних виробках необхідно забезпечити чутливість, як мінімум, на порядок вищу наведених вище значень. Враховуючі, що рівень власних шумів приймальної апаратури співрозмірний, або перевищує наведені вище значення, стає зрозумілою складність вимірювання різниці ЕМВ між непошкодженою та дефектною ділянками діелектричного виробу.

Авторами запропоновано функційну схему та алгоритм роботи двоканального термошумового дефектоскопу [4], що забезпечують виключення впливу на результат вимірювання власних шумів приймального тракту. Виключення впливу власних шумів досягається комутаційно-модуляційним перетворенням сигналів опорного та вимірювального каналів та наступним періодичним порівнянням зі зразковим опорним сигналом.

Проведені дослідження свідчать про можливість знаходження та розпізнавання локальних дефектів діелектричних матеріалів, які викликають зміну власного ЕМВ в мікрохвильовому діапазоні на рівні 0,2...0,5 % відносно цілісного матеріалу. Залежно від смуги пропускання вимірювального каналу це дозволяє виявляти дефекти, що мають розмір 0,1...0,3 мм.

Ключові слова: діелектричний матеріал, електромагнітне випромінення, дефект, радіотеплове випромінення, тепловий шум.

Література

- [1] Л. П. Підгорна, Г. М. Черкашина, та В. В. Лебедев, *Теорія та методи дослідження і випробування пластмас, клеїв та герметиків*, Харків: НТУ “ХПІ”, 2015.
- [2] Оцінювання якості виробів з пластичних мас [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib_upload/Передрій,%20Речун/page7.html .
- [3] Ю. О. Скрипник, та К. Л. Шевченко, “Радіотепловий метод неруйнівного контролю діелектричних матеріалів та виробів”, *Вісник КНУТД*, № 5(25), с. 30-36, 2005.
- [4] O. P. Yanenko, K. L. Shevchenko, and V. M. Kychak, *Methods and means of formation, processing and use of low-intensity electromagnetic signals*, Вінниця: ВНТУ, 2020.