

## ОПТИМІЗАЦІЯ АЛГОРИТМІЧНО-ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОНОМНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ МОДУЛІВ РОЗПОДІЛЕНИХ ДІАГНОСТИЧНИХ СИСТЕМ

**Р.М. Сисак\***, канд.техн.наук  
Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна. Е-mail: [rsysak@ied.org.ua](mailto:rsysak@ied.org.ua)

*Розглянуто питання підвищення енергоефективності автономних модулів розподілених багаторівневих систем моніторингу стану та технічного діагностування обладнання об'єктів електроенергетики за рахунок використання оптимізованих алгоритмів та програм статистичної обробки даних вимірювань. Розроблено удосконалений алгоритм перевірки реалізації діагностичних сигналів на однорідність, який використовується для попереднього виявлення дефектів елементів електротехнічного обладнання об'єктів електроенергетики. Зменшення часу виконання програм та відповідно зниження рівня енергоспоживання автономних вимірювальних модулів досягається за рахунок використання обчислень із цілими числами, що реалізуються сучасними 32-розрядними мікроконтролерами. Бібл. 17.*

**Ключові слова:** статистична діагностика, обладнання об'єктів електроенергетики, цифрова обробка сигналів, перевірка однорідності даних, алгоритм.

**Вступ.** У роботах [1, 2] було проаналізовано особливості побудови систем діагностування обладнання електроенергетичних об'єктів з урахуванням концепції інтелектуальних електричних мереж [3] і на цій основі розроблено узагальнену структуру багаторівневої системи моніторингу стану та технічного діагностування таких об'єктів. За рахунок використання розподілених обчислювальних ресурсів, а також з урахуванням ступеня критичності дефектів різних вузлів обладнання, що діагностуються, така структура дає можливість знизити вартість системи діагностування при збереженні високих показників точності та достовірності виявлення дефектів. При цьому важливе значення має програмне забезпечення, яке керує роботою модулів системи, а також забезпечує їхню взаємодію та двосторонній обмін інформацією між модулями [4, 5].

Як показує практика, для моніторингу стану та діагностування складних технічних об'єктів (таких, як електростанції) існує потреба в одночасному вимірюванні та аналізі значної кількості параметрів і процесів, що призводить до необхідності обробляти, передавати та накопичувати велику кількість інформації. Внаслідок цього системи моніторингу стану та технічного діагностування, побудовані на основі традиційної «централізованої» структури, повинні мати значні обчислювальні потужності та обсяги пам'яті, що ускладнює їх та підвищує собівартість. Альтернативою є використання розподіленої багаторівневої структури системи. В розподілених багаторівневих системах вимірювальна інформація піддається попередньому аналізу безпосередньо у місці її отримання для того, щоб відокремити тільки ту, яка важлива для визначення стану всього технічного об'єкта. При цьому передача інформації в центральний модуль діагностичної системи для її подальшого глибокого аналізу здійснюється лише за наявності обґрунтованої причини вважати, що у контрольованому вузлі є критичний дефект. Завдяки цьому суттєво зменшуються обсяги даних, що передаються між модулями системи моніторингу та діагностування, знижується навантаження на її елементи. Для успішної реалізації багаторівневої системи необхідно створити модулі, що дають можливість виконувати необхідні вимірювання та обчислення, а також мають невисоку вартість. При цьому слід розв'язати дві основні задачі: вибрати апаратну частину модулів та розробити алгоритмічно-програмне забезпечення для них. Очевидно, що ці задачі взаємопов'язані. Оскільки найбільшу кількість у системах моніторингу стану та діагностування обладнання об'єктів електроенергетики складають модулі вимірювання та попередньої обробки даних (вимірювальні модулі), причому значна їх частина призначена для отримання сигналів з рухомих елементів обладнання, то в рамках цієї роботи зупинимось на розгляді саме автономних вимірювальних модулів.

Виходячи з цього, основною метою даної роботи є підвищення енергоефективності автономних вимірювальних модулів розподілених систем моніторингу стану та діагностування обладнання об'єктів електроенергетики шляхом оптимізації алгоритмів та програмного забезпечення, яке в них застосовується.

**Оптимізація енергоспоживання вимірювальних модулів.** При розробленні автономних модулів вимірювання і обробки даних, які працюють від автономного джерела живлення, важливим аспектом є зменшення кількості енергії, що вони споживають під час роботи. У той же час для організації локальної обробки даних потрібно нарощувати функціональність і швидкодію апаратури, а це, в свою чергу, призводить до підвищення потужності споживання. Виходом із цієї ситуації є використання сучасних мікроконтролерів, які підтримують так званий режим очікування, коли більшість компонентів фактично вимикається, а також мають короткий час переходу в активний режим. Це дає можливість додаткової економії батареї завдяки періодичній активації для виконання необхідного обсягу обчислень і подальшому переходу в режим очікування. При виборі конкретної моделі мікроконтролера слід враховувати низку факторів, серед яких не лише апаратні можливості, а також і підтримка мікропроцесором наборів команд, необхідних для реалізації потрібного програмного забезпечення [6]. З цієї точки зору оптимальним вибором для автономних вимірювальних модулів розподілених діагностичних систем є мікроконтролери на основі ядра Cortex-M3 британської фірми Arm Holdings (ARM), які побудовані на основі 32-розрядної RISC-архітектури і характеризуються високою обчислювальною потужністю та низьким енергоспоживанням [7].

Споживання електроенергії автономним вимірювальним модулем відбувається нерівномірно. Більшість часу модуль знаходиться в режимі очікування, де середній рівень його енергоспоживання  $P_0$  відносно незначний. Через певні задані проміжки часу (номінальний період виконання діагностичних процедур)  $T_d$  він переходить в активний режим, коли здійснює вимірювання відрізків діагностичних сигналів і обробку отриманих даних. У цьому режимі середній рівень споживання  $P_a$  суттєво вищий. Якщо позначити тривалість активного режиму через  $T_a$ , то кількість енергії, що споживає модуль за один цикл в активному режимі, дорівнює добутку  $P_a \cdot T_a$ . Звідси очевидно, що досягти зменшення енергоспоживання вимірювальних модулів можна або за рахунок зменшення середнього рівня  $P_a$  споживання енергії в активному режимі, або зменшення тривалості  $T_a$  активного режиму [8].

У рамках даної роботи пропонується використовувати другу можливість, а саме, розробити оптимізовані за часом виконання математичні алгоритми, які реалізують необхідні для здійснення діагностування обчислення. При цьому виникають два різнопланових завдання: вдосконалення методів обчислень, тобто спрощення алгоритмів та виразів, за якими здійснюються обчислення, та оптимізація техніки обчислень, тобто отримання результатів з використанням мінімальної кількості процесорних команд.

Необхідно взяти до уваги, що результати вимірювань виражають у відповідних фізичних одиницях. Для цього використовуються дійсні числа, які в обчислювальних системах найчастіше представляються числами з плаваючою комою, що займають у пам'яті 4, 8 або 10 байтів. Разом з тим при виконанні вимірювання реалізації діагностичного процесу на виході АЦП отримуються коди, тобто цілі числа, що займають у пам'яті 2 байти (розрядність поширених АЦП складає 10 ... 16 бітів). У більшості систем перед статистичною обробкою даних виконується перетворення послідовності кодів із виходу АЦП у послідовність дійсних чисел у відповідному масштабі. При цьому жодної нової інформації не додається, а розмір пам'яті, що займають дані, зростає мінімум удвічі.

Сучасні мікроконтролери мають операції для роботи з цілими числами, і тільки деякі з них містять додатково блок роботи з дійсними числами. Тому для реалізації обчислень пропонується використовувати саме цілі числа – коди з виходу АЦП, а представляти в інженерних одиницях вже остаточний результат. Таким чином, досягається суттєве пришвидшення обчислень, зменшення кількості пам'яті, необхідної для зберігання даних і програм, підвищується енергоефективність апаратури.

**Оптимізація статистичного алгоритму перевірки вимірювальних даних на однорідність.** Розподілена багаторівнева система моніторингу стану та оперативного діагностування обладнання об'єктів електроенергетики базується на методах раннього виявлення дефектів із використанням різноманітних інструментальних засобів (сенсорів), які або входять у систему штатного контролю, або спеціально встановлені для даної системи. Вона в циклічному режимі контролює експлуатаційні параметри (як режимні, так і діагностичні) працюючого обладнання та визначає їхні відхилення від норми. На основі аналізу зібраної інформації система забезпечує виявлення дефектів, а також дає змогу прогнозувати їхній розвиток і видавати оцінку технічного стану обладнання і рекомендації щодо його подальшої експлуатації [9].

У більшості випадків поява дефектів у обладнанні, що діагностується, призводить до певної зміни характеристик фізичних процесів, які супроводжують роботу даного обладнання. У свою чергу це викликає зміни статистичних параметрів діагностичних сигналів, які вимірюються системою моні-

торингу стану та діагностування. Саме це припущення лежить в основі методів виявлення дефектів діагностованого обладнання за допомогою систем статистичного діагностування.

Взагалі процес визначення фактичного технічного стану об'єкта діагностування за допомогою статистичних діагностичних систем описується наступною схемою. Виконується діагностичний експеримент, який полягає у вимірюванні діагностичних сигналів, котрі генеруються об'єктом діагностування у відповідь на певні впливи – тестові або робочі – в залежності від того, які методи діагностики застосовуються. В результаті вимірювань отримують одну чи більше реалізацій діагностичних сигналів. На основі цих реалізацій система оцінює значення діагностичних параметрів, що характеризують фактичний технічний стан об'єкта діагностування. Використовуючи заздалегідь сформовані та обґрунтовані правила, за отриманими оцінками система приймає рішення про наявність чи відсутність дефектів об'єкта діагностування в даний момент, а також класифікацію виду дефекту.

Оцінювання початкових та центральних моментів розподілу діагностичних сигналів, а також пов'язаних з ними величин, таких, наприклад, як коефіцієнти асиметрії та ексцесу, параметри  $\beta_1$  та  $\beta_2$  Пірсона тощо, є початковим етапом статистичного опрацювання часових рядів, які представляють собою реалізації діагностичних сигналів. Разом з тим попередня оцінка стану обладнання може здійснюватися за допомогою порівняння між собою значень цих величин, отриманих у різні моменти часу, оскільки, як було зазначено вище, поява дефектів електротехнічного обладнання викликає раптові чи поступові зміни параметрів діагностичних сигналів. У математичній статистиці задача визначення відмінностей у статистичних характеристиках двох або більше часових рядів розв'язується за допомогою критеріїв перевірки на однорідність за одним або кількома параметрами. Точніше, статистичні критерії однорідності призначені для перевірки нульової гіпотези про те, що дві вибірки взято з одного й того самого розподілу, або їхні розподіли мають однакові значення математичного сподівання, дисперсії чи інших параметрів.

Відомі статистичні критерії перевірки однорідності поділяються на параметричні та непараметричні [10]. Критерії, які не беруть до уваги параметри розподілу ймовірностей, а засновані на оперуванні частотами чи рангами, називаються непараметричними:  $\chi^2$ -критерій Пірсона,  $Q$ -критерій Розенбаума,  $U$ -критерій Манна-Уїтні, критерії Вілкоксона, Колмогорова-Смірнова, Ансарі-Бредлі, Сіжела-Тьюкі, Кейпена, Клотца, Краскела-Уалліса, критерій знаків тощо.

У розрахункові вирази параметричних критеріїв безпосередньо входять статистичні оцінки параметрів розподілу ймовірностей. Такі критерії використовуються для перевірки однорідності за якимсь одним конкретним параметром: математичному сподіванню чи дисперсії. До цієї групи належать:  $t$ -критерій Стьюдента,  $F$ -критерій Фішера,  $Z$ -критерій Оверолла-Вудворда, критерії Бартлета, Кокрена, Хартлі, Левене, Романовського, відношення правдоподібності (Неймана-Пірсона) тощо.

Детальні дослідження особливостей застосування та потужності різних критеріїв однорідності проводилися різними авторами за допомогою комп'ютерного моделювання [11–16]. Основні висновки цих досліджень можна сформулювати наступним чином. Стандартним припущенням, яке обумовлює можливість застосування класичних параметричних критеріїв однорідності, є належність розподілів вибірок, що аналізуються, до нормального закону. Для застосування непараметричних критеріїв ця вимога не є обов'язковою. При достатній довжині вибірок параметричні критерії мають суттєву перевагу в потужності перед непараметричними навіть у тих випадках, коли досліджувані вибірки належать до законів розподілу, що відрізняються від нормального. Тому застосування непараметричних критеріїв для опрацювання даних вимірювань можна рекомендувати тільки для дуже коротких вибірок. При аналізі вибірок із нормального розподілу критерії Бартлета, Кокрена, Хартлі, Фішера, Неймана-Пірсона і  $Z$ -критерій Оверолла-Вудворда виявилися еквівалентними за потужністю і мають найвищу потужність серед усіх досліджених критеріїв для перевірки однорідності дисперсій. Цей самий результат справедливий при відхиленні розподілу вибірок від нормального за умови, що вони належать деякому симетричному закону [14]. Дослідження [15] підтвердили стійкість параметричних критеріїв перевірки однорідності математичного сподівання. Потужності  $z$ -критерію і  $t$ -критерію Стьюдента для вибірок довжиною 100 відліків практично не відрізняються і є найвищими для групи проаналізованих критеріїв.

У роботах [11–13] досліджували використання для перевірки однорідності вибірок комбінованого критерію, що ґрунтується на перевірці однорідності дисперсій за  $F$ -критерієм Фішера і наступній перевірці однорідності математичних сподівань за  $t$ -критерієм Стьюдента. Було проведено порівняльний аналіз потужності такого критерію для вибірок із різними законами розподілу: рівномірним, трикутним, гауссівським. Результати підтвердили, що потужність  $F$ -критерію Фішера залежить від

виду розподілу при коротких вибірках, але вже при довжині вибірки  $N > 30$  для досліджених негаусових розподілів вона не менша, ніж для гаусового. Потужність  $t$ -критерію Стьюдента залежить від дисперсії, але не залежить від форми розподілу.

Отже, можна зробити висновок, що при перевірці однорідності діагностичних сигналів за дисперсією доцільно використовувати критерій Фішера, оскільки інші критерії не дають переваг у потужності, але вирази для них мають складніший вигляд. Для перевірки однорідності за математичним сподіванням доцільно використовувати критерій Стьюдента, але перед цим необхідно переконатися в тому, що дисперсії двох вибірок не відрізняються.

Таким чином, для попереднього виявлення дефектів досліджуваних вузлів у вимірювальних модулях системи моніторингу стану та діагностування обладнання об'єктів електроенергетики пропонується застосувати саме комбінований критерій однорідності Фішера + Стьюдента. Розглянемо співвідношення для цих критеріїв та сформулюємо оптимізований алгоритм, який дає можливість розробити на його основі ефективне програмне забезпечення автономних вимірювальних модулів.

Нехай у результаті проведення діагностичних експериментів отримано дві вибірки  $X$  і  $Y$  одного й того самого діагностичного процесу, причому їхня довжина однакова і дорівнює  $N$

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_N), \quad Y = (y_1, y_2, \dots, y_N), \quad N \in \mathbf{Z}.$$

Класичний  $F$ -критерій Фішера застосовується для перевірки однорідності дисперсій двох вибірок при невідомих математичних сподіваннях [9]. При цьому основна гіпотеза  $H_{F0}$  полягає в тому, що дисперсії цих двох вибірок рівні

$$H_{F0} : \sigma_x = \sigma_y,$$

де  $\sigma_x$  і  $\sigma_y$  – дисперсії вибірок  $X$  і  $Y$  відповідно; альтернативна гіпотеза  $H_{F1} : \sigma_x \neq \sigma_y$ .

Статистика критерію має вигляд

$$F = s_x^2 / s_y^2, \quad (1)$$

де  $s_x^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (x_k - \bar{x})^2$ ,  $s_y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (y_k - \bar{y})^2$  – незміщені оцінки дисперсій, знайдені по вибірках  $X$

і  $Y$ ;  $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k$ ,  $\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N y_k$  – оцінки математичного сподівання.

За умови, що обидві вибірки належать нормальному закону розподілу і при справедливості гіпотези  $H_{F0}$ , статистика  $F$  має розподіл Фішера  $F_{N-1, N-1}$ , а правило критерію має вигляд [10]

$$\delta(X, Y) = \begin{cases} H_0, & f_{\alpha/2} \leq F \leq f_{1-\alpha/2}, \\ H_1, & \text{інакше,} \end{cases}$$

де  $f_{\alpha/2}$  і  $f_{1-\alpha/2}$  – квантилі розподілу Фішера  $F_{N-1, N-1}$ .

Критерій Стьюдента – традиційний метод перевірки однорідності двох вибірок за математичним сподіванням. Статистика критерію для розглянутих вище вибірок  $X$  та  $Y$  згідно з [10]

$$t = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{s_x^2 + s_y^2}} \sqrt{N}, \quad (2)$$

де  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  – оцінки математичного сподівання вибірок  $X$  і  $Y$ ;  $s_x^2$ ,  $s_y^2$  – незміщені оцінки їхніх дисперсій.

Класичні умови застосування критерію Стьюдента наступні:  $x_1, x_2, \dots, x_N$  розглядаються як результати  $N$  незалежних спостережень деякої випадкової величини  $X$  із невідомою функцією розподілу  $F(x)$ , а  $y_1, y_2, \dots, y_N$  – як результати  $N$  незалежних спостережень іншої випадкової величини  $Y$  з невідомою функцією розподілу  $G(x)$ . При цьому обидві функції розподілу повинні належати до класу нормальних розподілів:  $F(x) = N(x; m_x, \sigma_x^2)$ ,  $G(x) = N(x; m_y, \sigma_y^2)$ , та, крім того, їхні дисперсії мають співпадати  $\sigma_x^2 = \sigma_y^2$ . Припускається також, що спостереження в одній вибірці не залежать від спостережень в іншій, тобто вибірки незалежні. Тоді статистика  $t$  при справедливості нульової гіпотези  $H_{t0} : m_x = m_y$  має розподіл Стьюдента з  $2(N-1)$  ступенями вільності. Якщо ж хоча б одна з наведених вище умов не виконується, то не існує достатніх підстав вважати, що статистика  $t$  має розподіл Стьюдента, тому застосування даного критерію, строго кажучи, не обґрунтоване. Проте при справедливості  $H_{t0}$  і одна-

кових та достатньо великих розмірах  $N$  двох вибірок розподіл статистики  $t$  наближається до нормального [17]. Як було показано в [11], для поширених симетричних розподілів достатньо, щоб розміри вибірок  $N$  були не менше 30.

Для обчислення виразів (1) та (2) необхідно використовувати операції ділення, а для (2) – додатково і операцію обчислення квадратного кореня, що неминуче призводить до необхідності застосування дійсних чисел. Однак ці вирази можна перетворити у форму, яка допускає обчислення на основі тільки цілих чисел.

Для  $F$ -критерію Фішера отримаємо

$$F = \frac{N \cdot S_{2x} - S_{1x} \cdot S_{1x}}{N \cdot S_{2y} - S_{1y} \cdot S_{1y}}, \quad (3)$$

де  $S_{1x} = \sum_{i=1}^N x_i$ ,  $S_{2x} = \sum_{i=1}^N x_i^2$ ,  $S_{1y} = \sum_{i=1}^N y_i$ ,  $S_{2y} = \sum_{i=1}^N y_i^2$ , а гіпотеза  $H_{F0}$  про рівність дисперсій відхиляється з рівнем значимості  $\alpha$ , якщо виконується хоча б одна з наступних умов:

$$(NS_{2x} - S_{1x}^2) < (f_{\alpha/2} \cdot 2^{10}) \cdot (NS_{2y} - S_{1y}^2) \cdot 2^{-10} \text{ або } (NS_{2y} - S_{1y}^2) < (f_{\alpha/2} \cdot 2^{10}) \cdot (NS_{2x} - S_{1x}^2) \cdot 2^{-10}. \quad (4)$$

В останньому виразі враховується властивість  $f_{1-\alpha} = f_{\alpha}^{-1}$ .

Для  $t$ -критерію Стьюдента отримаємо

$$t^2 = \frac{(N-1)(S_{1x} - S_{1y})^2}{(NS_{2x} - S_{1x}^2) + (NS_{2y} - S_{1y}^2)}, \quad (5)$$

де  $S_{1x}$ ,  $S_{2x}$ ,  $S_{1y}$ ,  $S_{2y}$  – такі самі, як у виразі (3), а умова для перевірки гіпотези  $H_{t0}$ , яка полягає в тому, що математичні сподівання двох вибірок співпадають, проти альтернативи  $H_{t1}: m_x \neq m_y$ , із заданим рівнем значимості  $\alpha$  набуває вигляду

$$(S_{1x} - S_{1y})^2 \leq \frac{(t_{кр})^2 \cdot 2^{10}}{(N-1)} \left( (NS_{2x} - S_{1x}^2) + (NS_{2y} - S_{1y}^2) \right) \cdot 2^{-10}, \quad (6)$$

де  $t_{кр}$  – критичне значення, яке знаходять із таблиць розподілу Стьюдента для рівня значимості  $\alpha$  та числа ступенів вільності  $2(N-1)$ .

При створенні програмного забезпечення для мікроконтролера множники  $(f_{\alpha/2} \cdot 2^{10})$  у виразі (4) та  $((t_{кр})^2 \cdot 2^{10}) / (N-1)$  у виразі (6) замінюються на найближчі цілі числа, а операція множення на  $2^{-10}$  реалізується методом порозрядного зсуву на 10 розрядів вправо.

Визначимо необхідну розрядність регістрів процесора. Прийmemo, що кількість розрядів АЦП  $p = 12$ , а  $N \leq 2^7 = 128$ . Тоді суми виду  $S_{1x} \leq 2^{12} \cdot 2^7 = 2^{19}$ , а суми виду  $S_{2x} \leq 2^{12} \cdot 2^{12} \cdot 2^7 = 2^{31}$ . Тобто всі ці суми можна представити без переповнення 32-розрядним словом. Для обчислення виразів (4) і (6) необхідно використовувати 64-розрядні регістри, оскільки величина виду  $S_{1x}^2 \leq 2^{38}$ , і вже не може бути представлена 32 розрядами. Отже, мікроконтролер повинен мати команди для множення 32-розрядних слів із 64-розрядним результатом, наприклад, на основі ядра типу Cortex-M3.

### Висновок.

Розроблено обчислювальний метод та оптимізований за часом виконання алгоритм, що дає можливість перевірки двох вибірок на однорідність за дисперсією та математичним сподіванням з використанням тільки цілочисельних операцій додавання, множення, порозрядного зсуву та порівняння. На його основі було розроблено програму статистичного аналізу діагностичних сигналів для мікроконтролерів типу Cortex-M3, які використовуються у автономних вимірювальних модулях багаторівневої розподіленої системи моніторингу стану та діагностування електротехнічного обладнання об'єктів електроенергетики.

1. Myslovych M., Sysak R. Design peculiarities of multi-level systems for technical diagnostics of electrical machines. *Computational Problems of Electrical Engineering*. 2014. Vol. 4. No1. Pp. 47–50.

2. Мислович М.В., Сисак Р.М. Про деякі особливості побудови інтелектуальних багаторівневих систем технічної діагностики електроенергетичних об'єктів. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 1. С. 78–85.

3. Стогній Б.С., Кириленко О.В., Денисюк С.П. Интеллектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення. *Технічна електродинаміка*. 2010. № 6. С. 44–50.
4. Мислович М.В., Сисак Р.М., Остапчук Л.Б., Гижко Ю.І., Герцик С.М. Алгоритми функціонування та програмне забезпечення багаторівневої системи моніторингу стану та технічного діагностування об'єктів електроенергетики. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 4. С. 86–88.
5. Сисак Р.М. Особливості структури та функціонування багаторівневих систем діагностування обладнання вітроелектричних станцій. XVIII міжнародна науково-практична конф. *Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті*. Київ, 27–29 вересня 2017. С. 513–516.
6. Walls C. CPU selection in embedded systems. URL: <https://www.embedded.com/design/mcus-processors-and-socs/4442264/CPU-selection-in-embedded-systems>. (Дата звернення: 04.01.2018).
7. ARM Processors Cortex-M Series. URL: <https://www.arm.com/products/processors/cortex-m>. (Дата звернення: 04.01.2018).
8. Кондрашова К. Оптимизация энергопотребления устройств на базе микроконтроллеров EFM32 Wonder Gecko с ядром Cortex-M4F. *Компоненты и технологии*. 2013. № 9. С. 48–52.
9. Бабак С.В., Мислович М.В., Сысак Р.М. Статистическая диагностика электротехнического оборудования. Киев: Институт электродинамики НАН Украины, 2015. 456 с.
10. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. Москва: Физматлит, 2006. 816 с.
11. Еременко В.С., Куц Ю.В., Мокийчук В.М. Оценка однородности выборок малого объема. *Системы обработки информации*. 2006. Вип. 7(56). С. 26–29.
12. Еременко В.С., Мокийчук В.М., Самойличенко О.В. Исследование мощности критерия Кохрена при ограниченном числе наблюдений. *Системы обработки информации*. 2007. Вип. 6 (64). С. 35–39.
13. Еременко В.С., Мокийчук В.М., Самойличенко О.В. Определение статистических оценок мощности критериев однородности на выборках малого объема. *Системы обработки информации*. Харьков: Харьковский национальный университет Повітряних Сил, 2008. Вип. 4 (71). С. 30–33.
14. Лемешко Б.Ю., Лемешко С.Б., Горбунова А.А. О применении и мощности критериев проверки однородности дисперсий. Ч. I. Параметрические критерии. *Измерительная техника*. 2010. № 3. С. 10–16.
15. Лемешко Б.Ю., Лемешко С.Б. Об устойчивости и мощности критериев проверки однородности средних. *Измерительная техника*. 2008. № 9. С. 23–28.
16. Лемешко Б.Ю. Критерии проверки гипотез об однородности. Руководство по применению. Москва: ИНФРА-М, 2017. 208 с.
17. Орлов А.И. Эконометрика. Москва: Экзамен, 2002. 576 с.

УДК 681.518.5:621.313

## ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМИЧЕСКИ-ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОНОМНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Сысак Р.М., канд. техн. наук  
 Институт электродинамики НАН Украины,  
 пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина,  
 e-mail: [rsysak@ied.org.ua](mailto:rsysak@ied.org.ua)

*Рассмотрены вопросы повышения энергоэффективности автономных модулей распределенных многоуровневых систем мониторинга состояния и технического диагностирования оборудования объектов электроэнергетики за счет использования оптимизированных алгоритмов и программ статистической обработки данных измерений. Разработан усовершенствованный алгоритм проверки реализаций диагностических сигналов на однородность, который используется для предварительного обнаружения дефектов элементов электротехнического оборудования объектов электроэнергетики. Уменьшение времени выполнения программ и соответствующее снижение уровня энергопотребления автономных измерительных модулей достигается благодаря использованию вычислений с целыми числами, которые реализуются современными 32-разрядными микроконтроллерами. Библ. 17.*

**Ключевые слова:** статистическая диагностика, оборудование объектов электроэнергетики, цифровая обработка сигналов, проверка однородности данных, алгоритм.

## OPTIMIZATION OF SOFTWARE FOR AUTONOMOUS MEASURING MODULES OF DISTRIBUTED DIAGNOSTIC SYSTEMS

R.M. Sysak

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,  
Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine,

e-mail: [rsysak@ied.org.ua](mailto:rsysak@ied.org.ua)

*The problem of energy consumption reducing in autonomous modules of distributed multi-level systems for monitoring and technical diagnostics of the equipment of electric power objects due to the use of optimized algorithms and programs for statistical processing of measurements data is considered. Improved algorithm for testing of diagnostic signals for homogeneity, which is used for the preliminary detection of defects in the elements of electrical equipment, is developed. Minimization of program execution time and consequently the reducing of power consumption in autonomous measuring modules are achieved through the use of computations with integers which are supported by modern 32-bit microcontrollers. References 17.*

**Key words:** statistical diagnostics, power objects equipment, digital signal processing, data homogeneity test, algorithm.

1. Myslovych M., Sysak R. Design peculiarities of multi-level systems for technical diagnostics of electrical machines. *Computational Problems of Electrical Engineering*. 2014. Vol. 4. No 1. Pp. 47–50.
2. Myslovych M.V., Sysak R.M. On some peculiarities of design of intelligent multi-level systems for technical diagnostics of electric power facilities. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2015. No 1. Pp. 78–85. (Ukr)
3. Stognii B.S., Kyrylenko O.V., Denysiuk S.P. Intelligent electrical networks of power systems and their technological components. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2010. No 6. Pp. 44–50. (Ukr)
4. Myslovych M.V., Sysak R.M., Ostapchuk L.B., Gyzhko Yu.I., Hertsyk S.M. Algorithms of operation and software of multilevel system for monitoring and technical diagnostics of electrical power facilities equipment. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 4. Pp. 86–88. (Ukr)
5. Sysak R.M. Peculiarities of the structure and functioning of multilevel systems for diagnostics of wind power plants equipment. Proc. XVIII International Conference *Renewable power engineering and power efficiency in XXI century*. Kyiv, 27–29 September 2017. Pp. 513–516. (Ukr)
6. Walls C. CPU selection in embedded systems. URL: <https://www.embedded.com/design/mcus-processors-and-socs/4442264/CPU-selection-in-embedded-systems>. (Accessed at 04.01.2018).
7. APM Processors Cortex-M Series. URL: <https://www.arm.com/products/processors/cortex-m>. (Accessed at 04.01.2018).
8. Kondrashova K. Optimization of energy consumption of devices based on EFM32 Wonder Gecko microcontrollers with Cortex-M4F core. *Componenty i tekhnologii*. 2013. No 9. Pp. 48–52. (Rus)
9. Babak S.V., Myslovych M.V., Sysak R.M. Statistical diagnostics of electrical equipment Kiev: Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine, 2015. 456 p. (Rus)
10. Kobzar A.I. Applied mathematical statistics. For engineers and researches. Moskva: Fizmatlit, 2006. 816 p. (Rus)
11. Eremenko V.S., Kuts Yu.V., Mokiiuchuk V.M. Estimation of homogeneity of samples of small volume. *Systemy obrobky informatsii*. 2006. Vol. 7 (56). Pp. 26–29. (Rus)
12. Eremenko V.S., Mokiiuchuk V.M., Samoilenko O.V. A study of the power of the Cochran test with a limited number of observations. *Systemy obrobky informatsii*. 2007. Vol. 6 (64). Pp. 35–39. (Rus)
13. Eremenko V.S., Mokiiuchuk V.M., Samoilenko O.V. Determination of statistical estimates of the power of the homogeneity criteria on samples of small volume. *Systemy obrobky informatsii*. 2008. Vol. 4 (71). Pp. 30–33. (Rus)
14. Lemeshko B.Y., Lemeshko S.B., Gorbunova A.A. On the application and power of criteria for verifying the homogeneity of variances. Part I. Parametric criteria. *Izmeritelnaia tekhnika*. 2010. No 3. Pp. 10–16. (Rus)
15. Lemeshko B.Y., Lemeshko S.B. On the stability and power of criteria for checking the homogeneity of averages. *Izmeritelnaia tekhnika*. 2008. No 9. Pp. 23–28. (Rus)
16. Lemeshko B.Y. Criteria for testing hypotheses about homogeneity. Application guide: monograph. Moskva: INFRA-M, 2017. 208 p. (Rus)
17. Orlov A.I. Econometrics. Moskva: Ekzamen, 2002. 576 p. (Rus)

Надійшла 09.01.2018

Остаточний варіант 05.02.2018