

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет програмування та комп'ютерних і телекомунікаційних систем

Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та телекомунікації

ДИПЛОМНА РОБОТА

Другий (Магістерський)

Освітній рівень

Галузь знань 17 Електроніка та телекомунікації

Шифр і назва спеціальності

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

Шифр і назва спеціальності

на тему «Метод діагностування стану накопичувачів електроенергії»

ДРТР. 2015046.10.20.ПЗ

Виконав: студент 2 курсу, група ТР_м-19-2


підпис

Р.В. Тимошук
Ініціали, прізвище

Керівник: д-р техн. наук, проф.


підпис

В.В. Мартинюк
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри: д-р техн. наук, проф.


підпис

В.В. Мартинюк
Ініціали, прізвище

03 12 2020 р.

Хмельницький, 2020

Хмельницький національний університет

Факультет *програмування та комп'ютерних і телекомунікаційних систем*
Кафедра *автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та телекомунікацій*

Освітній рівень *другий (магістерський)*

Галузь знань *17 – Електроніка та телекомунікації*

Спеціальність *172 – Телекомунікації та радіотехніка*

Освітня-професійна програма *Телекомунікації та радіотехніка*

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою

AKIT:TK
Мартинюк В. В.

« 1 » 09 2020р.

ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Тимощуку Роману Валерійовичу

1 Тема роботи: *Метод діагностування стану накопичувачів електроенергії керівник роботи Мартинюк Валерій Володимирович, д.т.н., професор.*

Затверджено наказом по університету від «1» вересня 2020р. № 118.

2 Строк подання студентом роботи на кафедру: 05.12.2019р.

3 Вихідні дані (характеристика об'єкта, умов дослідження та ін.)

Мета роботи: підвищення достовірності методу діагностування стану накопичувачів електроенергії.

Об'єкт дослідження: процес діагностування стану накопичувачів електроенергії.

Предмет дослідження: удосконалення методу діагностування стану накопичувачів електроенергії.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)

Вступ. Огляд літературних джерел та патентних даних. Математична модель процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії. Удосконалений метод діагностування стану накопичувачів електроенергії. Експериментальне дослідження методу діагностування стану накопичувачів електроенергії. Висновки.

Завдання отримав
Науковий керівник

[Підпис]

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № п/п | Назва етапів (розділів) дипломної роботи | Строк виконання етапів дипломної роботи | Примітка |
|-------|---|---|----------|
| 1 | Вступ | 10.09.2020р. | Виконано |
| 2 | Огляд літературних джерел та патентних даних | 25.09.2020р. | Виконано |
| 3 | Математична модель процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії | 15.10.2020р. | Виконано |
| 4 | Удосконалений метод діагностування стану накопичувачів електроенергії | 30.10.2020р. | Виконано |
| 5 | Експериментальне дослідження методу діагностування стану накопичувачів електроенергії | 10.11.2020р. | Виконано |
| 6 | Висновки | 15.11.2020р. | Виконано |
| 6 | Оформлення пояснювальної записки до ДР | 20.11.2020р. | Виконано |
| 7 | Оформлення презентаційних матеріалів | 1.12.2020р. | Виконано |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

Студент



Підпис

Тимошук Р.В.

Ініціали, прізвище

Керівник роботи



Підпис

Мартецьких В.В.

Ініціали, прізвище

Зміст

| | |
|---|----|
| Вступ..... | 6 |
| 1 Огляд літературних джерел та патентних даних..... | 9 |
| 1.1 Огляд математичних моделей накопичувачів електроенергії..... | 9 |
| 1.2 Аналіз методів діагностування рівня заряду накопичувачів електроенергії..... | 12 |
| 1.3 Діагностування рівня працездатності накопичувачів електроенергії..... | 21 |
| Висновки до першого розділу..... | 24 |
| 2. Математична модель процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії..... | 26 |
| 2.1 Загальна структурна схема пристрою діагностування стану накопичувачів електроенергії..... | 26 |
| 2.2 Удосконалення математичної моделі процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії на змінному струмі..... | 37 |
| Висновки до другого розділу..... | 43 |
| 3 Удосконалений метод діагностування стану накопичувачів електроенергії..... | 45 |
| 3.1 Удосконалення математичної моделі процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії на постійному струмі..... | 45 |
| 3.2 Режими діагностування стану накопичувачів електроенергії на постійному струмі..... | 49 |
| 3.3 Удосконалений метод багатопараметричного діагностування стану накопичувачів електроенергії..... | 58 |
| Висновки до третього розділу..... | 62 |
| 4 Прилад і програмне забезпечення для удосконаленого методу діагностування стану накопичувачів електроенергії..... | 64 |
| 4.1. Прилад для удосконаленого методу діагностування стану накопичувачів електроенергії на змінному струмі..... | 64 |

| | |
|--|----|
| 4.2 Програмне забезпечення для удосконаленого методу діагностування стану накопичувачів електроенергії на постійному струмі..... | 68 |
| Висновки до четвертого розділу..... | 75 |
| ВИСНОВКИ..... | 77 |
| Перелік посилань..... | 79 |
| Додаток А Стаття у фаховому журналі..... | 85 |
| Додаток Б Презентація..... | 89 |

ВСТУП

Актуальність теми. Серед усіх вторинних (альтернативних) джерел енергії, доступних для електромобілів (ЕМ), гібридних електричних транспортних засобів (ГЕМ) та для портативних електронних пристроїв, таких як смартфон та ноутбуки, використання літій-іонних (Li-ion) батарей є найбільш перспективний. Порівняно з іншими альтернативними варіантами джерел енергії, літєві батареї мають деякі унікальні переваги [1] [2], наприклад ці батареї мають вищу питому енергію, мають мінімальний ефект пам'яті, забезпечують найкраще співвідношення енергії до ваги, а також мають низький саморозряд при простої [3]. На основі цих заявлених переваг стає зрозуміло, що літій-іонний акумулятор є провідним кандидатом для майбутнього покоління аерокосмічної та автомобільної галузей.

Актуальність роботи обумовлена проблемою діагностування стану накопичувачів електроенергії. Реальна фізична модель накопичувачів електроенергії базується на диференціальних рівняннях з частковими похідними, які містять всю необхідну інформацію щодо хімічних процесів, які протікають накопичувачах електроенергії. Ця електрохімічна модель базується на теорії концентрованого розчину. Однак ця електрохімічна модель занадто складна для використання у реальному часі. З цієї причини, скорочення моделі є варіантом подолання цієї проблеми.

Метою роботи є підвищення ефективності діагностування стану накопичувачів електроенергії.

Для досягнення цієї мети необхідно розв'язати такі **завдання**:

- розробити структурну схему пристрою діагностування стану накопичувачів електроенергії;
- розробити алгоритм роботи пристрою діагностування стану накопичувачів електроенергії;
- удосконалити метод діагностування стану накопичувачів електроенергії.

Об'єктом дослідження є процес діагностування стану накопичувачів електроенергії.

Предметом дослідження є метод та засіб підвищення достовірності діагностування стану накопичувачів електроенергії.

Методи досліджень. При вирішенні поставлених завдань у роботі були використані методи фізики, електроніки та теорії електричних кіл, методи обчислювальної математики, а також методи алгоритмізації та програмування.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Удосконалено метод діагностування стану накопичувачів електроенергії, який базується на багатопараметричному діагностуванні стану накопичувачів електроенергії і враховує вплив частотної дисперсії параметрів накопичувачів електроенергії, їх нелінійність та перехідні процеси, які виникають в процесі діагностування, що дозволяє підвищити достовірність діагностуванні стану накопичувачів електроенергії.

Практичне значення одержаних результатів:

Удосконалена структурна схема приладу діагностування стану накопичувачів електроенергії на змінному струмі складається із восьми діагностувальних каналів. Удосконалено алгоритм програмного забезпечення для удосконаленого методу діагностування стану накопичувачів електроенергії на змінному струмі, яке складається із трьох програм: програми роботи сигнального процесор; серверної програми та клієнтської програми діагностування.

Апробація результатів дослідження: Результати досліджень представлені у вигляді статті у фаховому журналі «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах» №2 2020р.

Дипломна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків до кожного розділу, висновків, списку використаних джерел, 2 додатків. Загальний обсяг роботи складає 104 сторінки комп'ютерного тексту, у тому числі: 33 рисунок та 1 таблиця, список використаних джерел вміщує 60 найменувань. У вступі обґрунтована актуальність наукової задачі, сформульовано мету та

задачі досліджень, відображено основні наукові результати та їх практичне значення.

У першому розділі магістерської роботи проаналізовано особливості накопичувачів електроенергії. Проведено огляд і аналіз існуючих математичних моделей накопичувачів електроенергії.

У другому розділі розглянуто математичну модель процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії. Удосконалено загальну структурну схему пристрою діагностування стану накопичувачів електроенергії.

У третьому розділі удосконалено метод діагностування стану накопичувачів електроенергії.

У четвертому розділі удосконалено прилад і програмне забезпечення для удосконаленого методу діагностування стану накопичувачів електроенергії.

У загальних висновків по дипломній роботі магістра висвітлені основні результати досліджень, які отримані в магістерській роботі.

1. Огляд літературних джерел та патентних даних

1.1. Огляд математичних моделей накопичувачів електроенергії

В літературних джерелах та патентних даних представлено два типи моделей накопичувачів електроенергії [7] - [9].

1. Математичні моделі у вигляді еквівалентної схеми заміщення накопичувачів електроенергії.

2. Математичні моделі у вигляді електрохімічних моделей накопичувачів електроенергії.

Еквівалентні схеми заміщення накопичувачів електроенергії використовують прості компоненти електричних кіл, такі як резистори та конденсатори. Еквівалентні схеми заміщення накопичувачів електроенергії відображають співвідношення між вхідним струмом та вихідною напругою на виводах накопичувачів електроенергії.

Прикладом математичної моделі накопичувачів електроенергії на основі еквівалентної схеми заміщення є RRC модель першого порядку, яка є відносно точною та простою для використання її процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії.

Моделі, які базуються на електрохімічних процесах, відображають внутрішні електрохімічні реакції, такі як дифузія літію. Отже, електрохімічні моделі мають кращу кореляцію з фізичними та хімічними процесами [10].

Розроблення математичної моделі накопичувачів електроенергії на основі електрохімічних процесів вимагає врахування великої кількості станів накопичувача електроенергії у порівнянні з моделями накопичувача електроенергії на основі еквівалентної схеми заміщення. Для математичної моделі накопичувачів електроенергії на основі еквівалентної схеми заміщення кількість станів лежить в межах від 2 до 5 [9].

Розроблення математичної моделі накопичувачів електроенергії на основі електрохімічних процесів є надзвичайно складним, тому на практиці використовуються моделі зменшеного порядку.

Є два способи зменшити порядок математичної моделі [11].

1. Використовувати усереднену модель електродів, яка не враховує розподіл концентрації твердої речовини разом, але враховує дифузію матеріалу.

2) Використовувати математичну модель значень станів. Математична модель значень станів описує рівняння процесу у вигляді аналітичної передавальної функції для опису електрохімічних процесів.

В роботі [12] наведено порівняння двох типів математичних моделей літій-іонних накопичувачів електроенергії зменшеного порядку. Аналізуючи ці два методи зменшення порядку було встановлено, що використання цих двох типів моделей літій-іонних накопичувачів електроенергії зменшеного порядку дають хороші оцінки напруги накопичувачів електроенергії.

Усереднена математична модель електродів та математична модель значень станів характеризуються своїми переваги та недоліки. Наприклад, усереднена математична модель електродів може точно оцінити стан заряду накопичувачів електроенергії та напругу на їх виводах.

Однак, використання середньої математична моделі електродів в процесів діагностування стану накопичувачів електроенергії є складним через значну нелінійність накопичувачів електроенергії.

Навпаки, математична модель значень станів характеризуються низькою точністю оцінки стану заряду накопичувачів електроенергії, але ця математична модель характеризується менш складною лінійною структурою, та є більш придатною для діагностування стану накопичувачів електроенергії.

Виходячи з цих міркувань, висока складність побудови електрохімічних математична моделей навіть для зменшених порядків ускладнює їх використанні в процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії.

Використання в процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії еквівалентних схем заміщення накопичувачів електроенергії є більш розумною альтернативою та дозволяє отримати задовільну точність у порівнянні із електрохімічними математична моделями.

В якості альтернативи для опису поведінки накопичувачів електроенергії використовуються математичні моделі, які базуються на емпіричних функціях. Прикладом є використання функції, яка описує напругу холостого ходу у вигляді поліноміальної функції n -го порядку для опису рівня заряду (англомовний термін state of charge (SOC)) накопичувачів електроенергії.

Недоліком таких математичних моделей є велика похибка моделювання від 5 до 20% [14], тому математичні моделі на основі еквівалентної схеми заміщення накопичувачів електроенергії частіше застосовуються в процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії.

Взаємозв'язок між входом і виходом накопичувачів електроенергії можна описати, використовуючи еквівалентну схему заміщення накопичувача електроенергії, яка складається з резисторів, конденсаторів та джерела напруги [15], [16]. На рисунку 1.1 показана RC еквівалентна схема заміщення накопичувача електроенергії другого порядку.

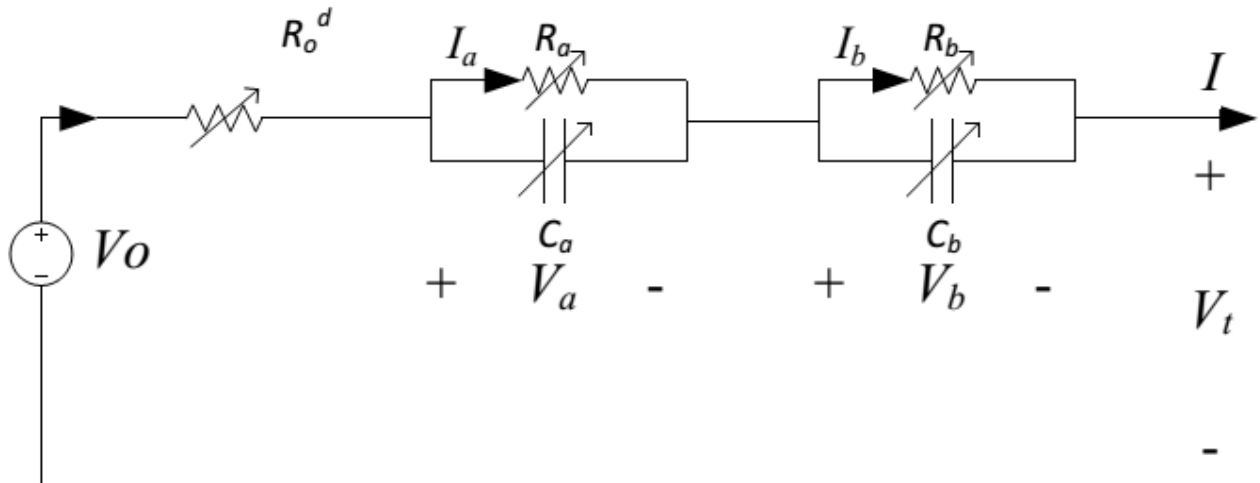


Рисунок 1.1 – Еквівалентна схема заміщення накопичувача електроенергії

Математичні RC моделі накопичувачів електроенергії вищого порядку містять більше RC пар і здатні більш точно представляти кінетичні аспекти поведінки внутрішнього імпедансу [17] та [8].

З метою підвищення точності еквівалентної схеми заміщення накопичувача електроенергії, багато дослідників пропонують ускладнені

еквівалентні схеми заміщення накопичувачів електроенергії, які враховують температурний ефект [18], а також поверхневий рівень заряду на основі електрохімічного аналізу [19] та ефекту перерозподілу заряду [20].

Вплив гістерезису на співвідношення напруги холостого ходу та рівня заряду спостерігався у багатьох накопичувачах електроенергії, таких як нікель-металгідридні батареї та літій-іонні батареї. Ефект гістерезису демонструє різну напругу холостого ходу, коли батареї перебувають у стаціонарному стані в залежності від величини зарядного або розрядного струму та історії циклічності заряду та розряду [21].

Іншими словами, в процесі заряду напруга холостого ходу є вищою, ніж напруга холостого ходу в процесі розряду до однакового рівня заряду. Було помічено, що цей ефект є суттєвим для нікель-металгідридних батарей [21]. З іншого боку, для літій-іонних батарей цей ефект порівняно невеликий [22].

1.2. Аналіз методів діагностування рівня заряду накопичувачів електроенергії

Рівень заряду накопичувачів електроенергії визначається як залишок заряду накопичувачів електроенергії порівняно з номінальною величиною заряду накопичувачів електроенергії, яку він може накопичувати [23].

На відміну від двигунів внутрішнього згорання, де рівень паливного баку може безпосередньо контролюватися датчиком, рівень заряду накопичувачів електроенергії батареї не можна безпосередньо виміряти [24].

Один з найпростіших методів розрахунку рівня заряду накопичувачів електроенергії є кулонівський підрахунок, при якому інтегрується струм для обчислення загального вхідного та вихідного заряду. Однак, оскільки кулонівський підрахунок включає процес інтегрування, помилка від датчиків струму накопичується.

C-рейтинг (англомовний термін C-rate) накопичувача електроенергії – це стандартний термін, який описує допустимий зарядний або розрядний струм

накопичувачів електроенергії і базується на величині їхньої ємності. Наприклад, якщо 1С- рейтинг накопичувача електроенергії дорівнює 40А, то це означає, що ємність накопичувача електроенергії дорівнює 40Агод. Іншими словами, для повного розрядження або заряджання накопичувачів електроенергії знадобиться 1 година.

Загальна ємність – це максимальна кількість ампер-годин, яку накопичувач електроенергії може видавати при температурі навколишнього середовища та при невеликій величині струму. В більшості випадків використовується С/30-рейтинг в процесі розряджування накопичувача електроенергії від 100% рівня його заряду до повного розряджування накопичувача електроенергії.

Доступна ємність – це максимальна кількість ампер-годин, яку накопичувач електроенергії може видати при температурі навколишнього середовища. Рівень заряду схожий на рівень палива у паливному баці автомобіля, тому його можна розглядати, як показник залишку вільної енергії. Рівень заряду накопичувача електроенергії визначається у відповідності із виразом (1.1).

$$SOC = \frac{E_D}{E_3} \cdot 100\% , \quad (1.1)$$

де E_D – доступна електрична енергія в накопичувачі електроенергії;

E_3 – загальна електрична енергія, яку може накопичувати накопичувач електроенергії.

Однак, рівень заряду накопичувача електроенергії не можна безпосередньо розрахувати за виразом (1.1), тому що доступна електрична енергія в накопичувачі електроенергії не може бути безпосередньо виміряна.

Крім того, точне визначення рівня заряду накопичувача електроенергії є важливою умовою діагностування стану накопичувачів електроенергії. Оцінка

рівня заряду накопичувача електроенергії є складною через нелінійність внутрішніх реакцій накопичувача електроенергії [27].

Ця нелінійна характеристика може бути спричинена або внутрішніми умовами, такими як втрата ємності та збільшення внутрішнього опору, або зовнішніми умовами, навколишньою температурою та низьким опором навантаження.

Незважаючи на те, що в процесі діагностування стану накопичувачів необхідно точно визначати їх рівень заряду, у більшості випадках рівень заряду накопичувача електроенергії не можна виміряти безпосередньо. В накопичувачі електроенергії можна проводити вимірювання напруги на виводах накопичувача електроенергії та струм, який проходить навантаження.

Накопичувач електроенергії можна сприймати як "чорну скриньку", а його рівень заряду можна оцінити за допомогою різних методів. Одним із методів визначення рівня заряду накопичувача електроенергії є метод кулонівського підрахунку, який описується виразом (1.2).

$$SOC = \frac{\int \eta \cdot i dt}{E_3} \cdot 100\% , \quad (1.2)$$

де η – коефіцієнт корисної дії в процесі розряджування накопичувача електроенергії;

i – струм розряджування накопичувача електроенергії;

E_3 – загальна електрична енергія, яку може накопичувати накопичувач електроенергії.

Метод кулонівського підрахунку є найбільш часто використовуваним методом наближеного розрахунку рівня заряду накопичувача електроенергії. Метод кулонівського підрахунку використовується, як еталонний метод розрахунку рівня заряду накопичувача електроенергії.

Метод кулонівського підрахунку використовується для порівняння з іншими методами розрахунку рівня заряду накопичувача електроенергії при моделюванні за умови, що ємність накопичувача електроенергії відома та використовується точний датчик струму.

На практиці метод кулонівського підрахунку майже не використовується для оцінки рівня заряду накопичувача електроенергії, тому що шум датчика струму має значний вплив на точність розрахунку. Існують наступні недоліки методу кулонівського підрахунку рівня заряду накопичувача електроенергії.

1. У виразі (1.2) використовується операція інтегрування, яка накопичуватиме похибку визначення рівня заряду накопичувача електроенергії.

2. Коефіцієнт корисної дії в процесі розряджування накопичувача електроенергії може змінюватися.

3. Загальна ємність накопичувача електроенергії буде зменшуватися в процесі старіння накопичувача електроенергії, замість того, щоб бути постійною.

Як результат, наведені вище недоліки можуть суттєво вплинути на точність оцінки рівня заряду накопичувача електроенергії.

Іншим методом визначення рівня заряду накопичувача електроенергії є графічний метод, який базується на побудові залежності напруги холостого ходу від рівня заряду накопичувача електроенергії.

Експериментально встановлено взаємозв'язок між напругою холостого ходу накопичувача електроенергії та його рівнем заряду [28]. З відси можна зробити висновок, що напруга холостого ходу накопичувача електроенергії - це нелінійна монотонна функція його рівня заряду. Отже, рівень заряду накопичувача електроенергії можна оцінити, відобразивши його напругу холостого ходу через взаємозв'язок із його рівнем заряду.

На рисунку 1.2 показано рівень заряду накопичувача електроенергії, який становить 60%, а його напруга холостого ходу відображається чорною пунктирною лінією.

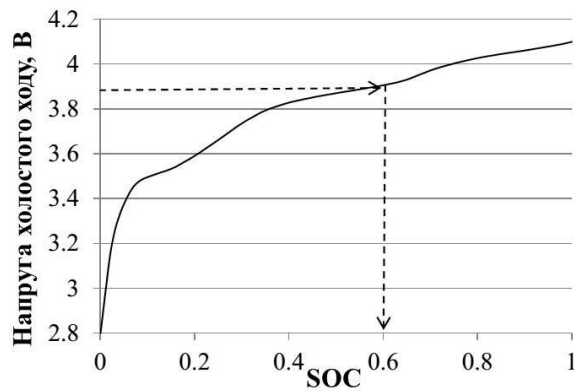


Рисунок 1.2 – Графік залежності між напругою холостого ходу накопичувача електроенергії та його рівнем заряду

Звідси можна зробити висновок, що відображення графіку залежності між напругою холостого ходу накопичувача електроенергії та його рівнем заряду є відносно точним методом отримання значення рівня заряду накопичувача електроенергії за допомогою точного вимірювання напруги холостого ходу.

Однак, напруга холостого ходу визначається, як напруга накопичувача електроенергії без під'єднання до нього навантаження, коли система знаходиться в рівноважному стані. Напругу холостого ходу можна отримати після так званого часу релаксації для кожного значення рівня заряду накопичувача електроенергії при відповідній температурі.

Протягом цього інтервалу часу процес дифузії всередині накопичувача електроенергії поступово завершується до стабільного стану рівноваги [29]. Отже, цей метод відображення не використовується зазвичай через те, що процес отримання кривої залежності між напругою холостого ходу накопичувача електроенергії та його рівнем заряду займає багато часу. Крім того, крива втрачає точність, оскільки напруга холостого ходу накопичувача електроенергії змінюється в процесі його старіння.

Наступний метод визначення рівня заряду накопичувача електроенергії базується на використанні моделі спостерігача. За допомогою вимірювання вхідних та вихідних параметрів, спостерігач стану може оцінити внутрішній стан накопичувача електроенергії. Структурна схема моделі спостерігача

показана на рисунку 1.3 і базується на матрицях простору станів, які описують реальну систему.

Підсилення зворотного зв'язку використовується для спонукання спостерігача для наближення до реального стану системи. Ця процедура виконується шляхом множення похибки між реальним вихідним сигналом та розрахунковим вихідним сигналом.

Як показано на рисунку 1.3, як реальна система, так і спостерігачі мають однакові матриці простору станів, які описуються системою рівнянь (1.3). Для усунення невизначеності моделювання в [30] розроблено модель спостерігача ковзного режиму.

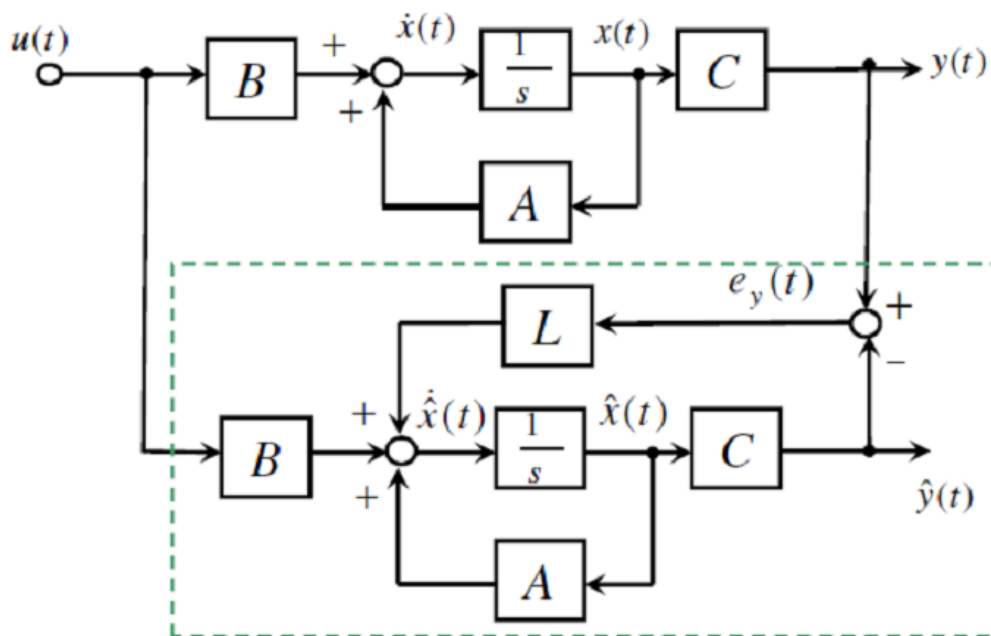


Рисунок 1.3 – Структурна схема спостерігача для визначення рівня заряду накопичувача електроенергії

Адаптивні алгоритми реалізовані для оцінки рівня заряду накопичувача електроенергії. Зменшуючи або усуваючи похибку між фактичним вихідним сигналом та розрахунковим вихідним сигналом, можна зменшити невизначеність моделі накопичувача електроенергії та шум вимірювання [30].

$$\begin{cases} x_k = A_{k-1}x_{k-1} + B_{k-1}u_{k-1} + w_{k-1}, \\ y_k = C_k x + Du + v_{k-1} \end{cases}, \quad (1.3)$$

де w та v – шум процесу та шум вимірювання відповідно.

Подібно до моделі спостерігача, фільтр Калмана (ФК) є одним із найбільш широко застосовуваних методів для оцінки рівня заряду накопичувача електроенергії та його параметрів, тому що він може забезпечити оптимальну оцінку для лінійних систем з білим гаусівським шумом.

Якщо система нелінійна або шум не гаусівський, тоді ФК не є оптимальними і може залежати від проблем розбіжності [31]. Моделювання накопичувача електроенергії характеризується нелінійністю, яка спостерігається між напругою холостого ходу накопичувача електроенергії та його рівнем заряду. Тому для визначення рівня заряду накопичувача електроенергії ФК не можна застосовувати безпосередньо.

Метод електрохімічної спектроскопії використовує взаємозв'язок між рівнем заряду накопичувача електроенергії та особливим значенням комплексного опору накопичувача електроенергії, як наведено в [36]. Автор спробував різні спеціальні значення комплексного опору накопичувача електроенергії, такі як перетин між кривою комплексного опору і реальною віссю (внутрішній опір R).

Недоліком такого методу визначення рівня заряду накопичувача електроенергії є незначні зміни комплексного опору в інтервалі від 20 до 100% рівня заряду накопичувача електроенергії. Однак, послідовна резонансна частота суттєво залежить від рівня заряду накопичувача електроенергії. Іншими словами, за цією кореляцією можна оцінити рівень заряду накопичувача електроенергії. Але це співвідношення було перевірено тільки для Ni-MH та Ni-Cd накопичувачів електроенергії.

Для обґрунтування цієї гіпотези потрібно протестувати широкий асортимент накопичувачів електроенергії. Для оцінки рівня заряду накопичувача електроенергії може використовуватися не тільки послідовна

резонансна частота, але й інші частини кривої комплексного опору. Однак, цей метод діагностування рівня заряду накопичувача електроенергії є досить складним через широкий діапазон частоти зондуючого сигналу від 0,1 мГц до 1 кГц.

Електрохімічний імпеданс відображає динамічні характеристики накопичувачів електроенергії. Іншими словами, це реакція після невеликої подачі сигналу напруги або струму. Отже, існує два режими.

1. Гальваностатичний режим.

У гальваностатичному режимі використовується постійний зарядний чи розрядний струм плюс синусоїдальний сигнал змінного струму.

$$\Delta I = I_{\max} \sin(2\pi ft), \quad (1.4)$$

де I_{\max} – амплітуда синусоїдального сигналу струму;

f – частота синусоїдального сигналу струму.

Відгук напруги описується рівнянням (1.5).

$$\Delta V = V_{\max} \sin(2\pi ft + \varphi), \quad (1.5)$$

де V_{\max} – амплітуда синусоїдального сигналу напруги;

f – частота синусоїдального сигналу напруги;

φ – фазовий зсув між синусоїдальним сигналом напруги та струму.

Потенціостатичний режим.

У потенціостатичному режимі використовується постійна зарядна напруга плюс синусоїдальний сигнал змінної напруги.

$$\Delta V = V_{\max} \sin(2\pi ft), \quad (1.6)$$

де V_{\max} – амплітуда синусоїдального сигналу напруги;

f – частота синусоїдального сигналу напруги.

Відгук струму описується рівнянням (1.6).

$$\Delta I = I_{\max} \sin(2\pi ft + \varphi), \quad (1.6)$$

де I_{\max} – амплітуда синусоїдального сигналу струму;

f – частота синусоїдального сигналу струму;

φ – фазовий зсув між синусоїдальним сигналом струму та напруги.

В обох випадках комплексний опір накопичувачів електроенергії визначається виразом (1.7).

$$Z = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V_{\max}}{I_{\max}} e^{j\varphi}. \quad (1.7)$$

На рисунку 1.4 зображено діаграму комплексного опору накопичувача електроенергії та її ділянки, які відповідають різним частинам еквівалентної схеми заміщення накопичувача електроенергії.

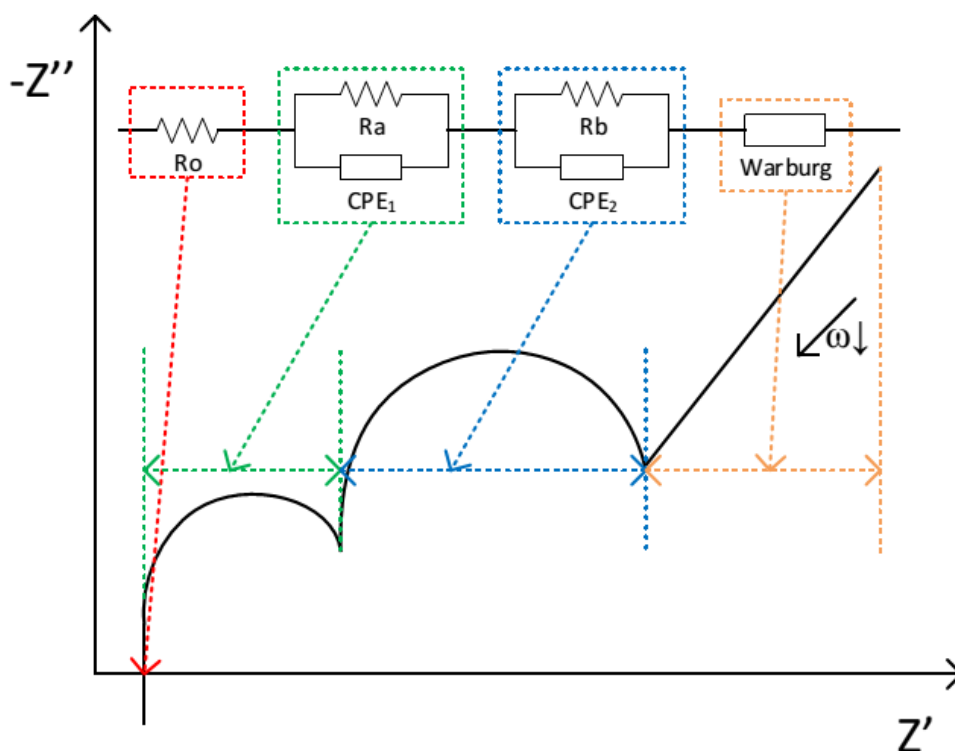


Рисунок 1.4 – Діаграма комплексного опору накопичувачів електроенергії

Аналізуючи діаграму комплексного опору накопичувача електроенергії можна зробити висновок, що точка перетину діаграми комплексного опору із віссю Z' визначається послідовним активним опором накопичувача електроенергії R_o .

Перше півколо діаграми комплексного опору накопичувача електроенергії відповідає першій ланці еквівалентної схеми заміщення $R_a CPE_1$, а друге півколо відповідає другій ланці еквівалентної схеми заміщення $R_b CPE_2$. Пряма ділянка діаграми комплексного опору накопичувача електроенергії відповідає імпедансу Варбурга.

1.3. Діагностування рівня працездатності накопичувачів електроенергії

Рівень працездатності (англомовний термін state of health (SOH)) накопичувачів електроенергії останнім часом стає все більш важливим, тому

що накопичувачі електроенергії із часом старіють, а їх параметри і характеристики погіршуються. Основними наслідками старіння накопичувачів електроенергії є зменшення з часом їх ємності та зростання їх внутрішнього опору.

Методи діагностування рівня заряду та рівня працездатності накопичувачів електроенергії є подібними. Різниця між діагностуванням рівня заряду та діагностуванням рівня працездатності накопичувачів електроенергії полягає в тому, що при зменшенні рівня заряду необхідно швидко реагувати і здійснювати заряджування накопичувача електроенергії.

Натомість процес старіння (деградації) накопичувачів є більш повільним, але незворотнім. Швидкість старіння (деградації) накопичувачів електроенергії залежить від різних факторів, таких як умови експлуатації, режими заряджування та розряджування, а також якості накопичувачів електроенергії.

В процесі діагностування рівня працездатності накопичувачів електроенергії проводяться вимірювання ємності та активного опору втрат накопичувачів електроенергії.

Методи вимірювання ємності та активного опору втрат накопичувачів електроенергії можна розділити на два типи: методи вимірювання у часовій області та методи вимірювання у частотній області.

Метод електрохімічної спектроскопії використовується в процесі діагностування рівня працездатності накопичувачів електроенергії у частотній області. Метод електрохімічної спектроскопії дозволяє визначити фактичне походження процесів деградації накопичувачів електроенергії та дати зрозуміти деякі ефекти старіння, які важко зрозуміти традиційними методами випробувань [44].

Взаємозв'язок між рівнями деградації та діаграмою комплексного опору накопичувачів електроенергії можна легко визначити, проаналізувавши дві діаграми, які зображені на рисунку 1.5 [45].

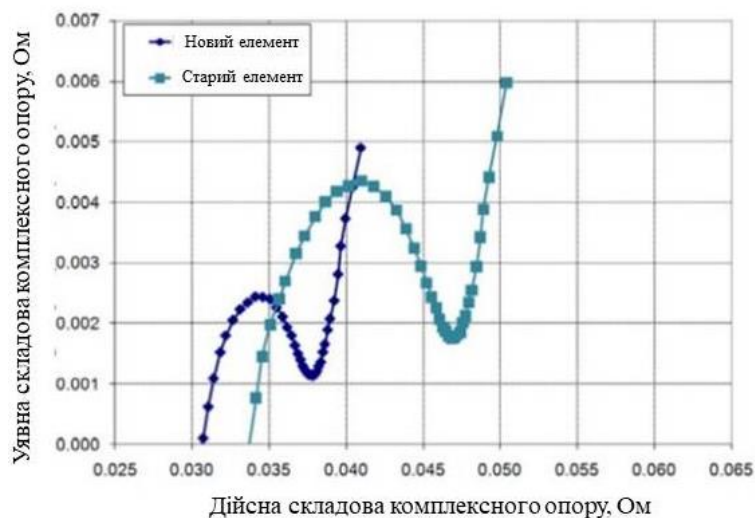


Рисунок 1.5 – Діаграми комплексних опорів нового (фіолетова крива) та старого (блакитна крива) накопичувачів електроенергії

Аналізуючи діаграми комплексних опорів нового (фіолетова крива) та старого (блакитна крива) накопичувачів електроенергії, які зображені на рисунку 1.5 можна зробити висновок, що точки перетину діаграм комплексного опору із дійсною віссю Z' суттєво відрізняються.

Точка перетину діаграми комплексного опору із дійсною віссю Z' визначається послідовним активним опором накопичувача електроенергії R_0 . Звідси можна зробити висновок, що новий накопичувач електроенергії характеризується меншим активним опором R_0 , а старий накопичувач електроенергії, навпаки, характеризується більшим активним опором R_0 .

Аналіз діаграм комплексних опорів нового (фіолетова крива) та старого (блакитна крива) накопичувачів електроенергії, які зображені на рисунку 1.5 також показує, що процес старіння (деградації) накопичувачів електроенергії має чіткий взаємозв'язок із параметрами елементів R_1 і C_2 еквівалентної схеми заміщення накопичувача електроенергії (рисунок 1.4).

Діагностування рівня заряду та рівня працездатності накопичувачів електроенергії можливе, якщо математично описати закони зміни параметрів елементів еквівалентної схеми заміщення накопичувачів електроенергії від їх рівня заряду та рівня працездатності. Для цього потрібно апроксимувати

діаграму комплексного опору накопичувачів електроенергії виразом, що описує залежність їх комплексного опору від рівня заряду та рівня працездатності.

Відомі різні методи апроксимації діаграми комплексного опору накопичувачів електроенергії, але найбільшого поширення отримав метод найменших квадратів (МНК) [52]. Особливістю методу найменших квадратів є мінімізація суми квадратів похибок.

Основними перевагами методу найменших квадратів є наступні переваги.

1. При використанні методу найменших квадратів оцінки параметрів елементів еквівалентної схеми заміщення накопичувачів електроенергії є незміщеними.

2. Отримані оцінки параметрів будуть розміщені за нормальним законом розподілу випадкових величин.

Висновки до першого розділу

1. Еквівалентні схеми заміщення накопичувачів електроенергії використовують прості компоненти електричних кіл, такі як резистори та конденсатори. Еквівалентні схеми заміщення накопичувачів електроенергії відображають співвідношення між вхідним струмом та вихідною напругою на виводах накопичувачів електроенергії.

2. Незважаючи на те, що в процесі діагностування стану накопичувачів необхідно точно визначати їх рівень заряду, у більшості випадках рівень заряду накопичувача електроенергії не можна виміряти безпосередньо. В накопичувачі електроенергії можна проводити вимірювання напруги на виводах накопичувача електроенергії та струм, який проходить навантаження.

3. Рівень працездатності накопичувачів електроенергії останнім часом стає все більш важливим, тому що накопичувачі електроенергії із часом старіють, а їх параметри і характеристики погіршуються. Основними

наслідками старіння накопичувачів електроенергії є зменшення з часом їх ємності та зростання їх внутрішнього опору.

4. Діагностування рівня заряду та рівня працездатності накопичувачів електроенергії можливе, якщо математично описати закони зміни параметрів елементів еквівалентної схеми заміщення накопичувачів електроенергії від їх рівня заряду та рівня працездатності. Для цього потрібно апроксимувати діаграму комплексного опору накопичувачів електроенергії виразом, що описує залежність їх комплексного опору від рівня заряду та рівня працездатності.

2. Математична модель процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії

2.1 Загальна структурна схема пристрою діагностування стану накопичувачів електроенергії

При побудові пристроїв діагностування стану накопичувачів електроенергії необхідно враховувати параметри, які відображують їх технічний стан. До номінальних показників технічного стану накопичувачів електроенергії відноситься їх ємність C та активний опір R .

В процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії необхідно враховувати частотної дисперсію та не лінійність їх ємності $C(\omega, u)$ та активного опору $R(\omega, u)$. Загальна структурна схема пристрою діагностування стану накопичувачів електроенергії зображена на рисунку 2.1.

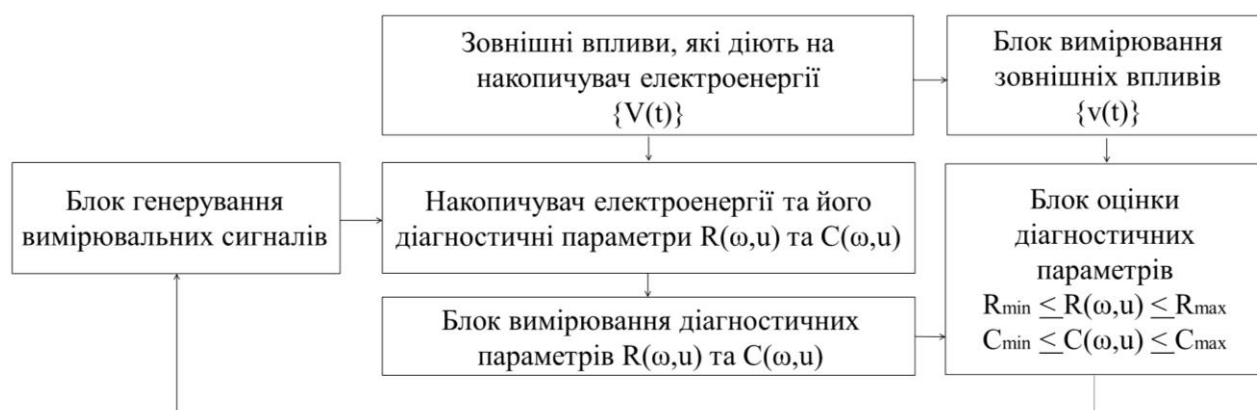


Рисунок 2.1 – Загальна структурна схема пристрою діагностування стану накопичувачів електроенергії

В процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії блок генерування вимірювальних сигналів подає на накопичувач електроенергії вимірювальну напругу $u_B(t)$ або вимірювальний струм $i_B(t)$. Оточуюче середовище впливає на накопичувач електроенергії через зовнішні впливи $\{V(t)\}$.

Блок вимірювання діагностичних параметрів вимірює параметри накопичувача електроенергії ємності $c(\omega, u)$ та активного опору $r(\omega, u)$ відповідно. Блок вимірювання зовнішніх впливів, які діють на накопичувача електроенергії, вимірює множину зовнішніх впливів $\{v(t)\}$.

Виміряні діагностичні параметри накопичувача електроенергії $c(\omega, u)$ та $r(\omega, u)$ та множина зовнішніх впливів $\{v(t)\}$ поступають на блок оцінки діагностичних параметрів, який визначає оцінку Q (накопичувач електроенергії є справним або несправним). Процес діагностування стану накопичувачів електроенергії може відбуватись у стаціонарному режимі діагностування або у нестаціонарному режимі діагностування накопичувачів електроенергії.

Найпростіша математична модель процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії у стаціонарному режимі діагностування побудована на вимірюванні ємності C та активного опору R накопичувача електроенергії один лише раз.

В процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії отримуємо вимірюванні ємності c та активного опору r .

В основі найпростішої математичної моделі процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії лежить дві гіпотези.

1. Першою гіпотезою H_0 є гіпотеза, що в процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії виявили його працездатний стан.

$$H_0: c \in [C_H, C_B] \cap r \in [R_H, R_B], \quad (2.1)$$

де C_H, C_B та R_H, R_B – нижня і верхня межі ємності та активного опору відповідно c і r .

2. Другою гіпотезою H_1 є гіпотеза, що в процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії виявили його непрацездатний стан.

$$H_1: c \notin [C_H, C_B] \cap r \notin [R_H, R_B]. \quad (2.2)$$

Достовірність процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії дорівнює добутку методичної достовірності процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії на інструментальну достовірність процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії.

Методична достовірність процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії дорівнює відношенню кількості показників технічного стану, які визначаються в процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії до загальної кількості показників діагностування стану накопичувачів електроенергії.

На основі аналізу найпростішої математичної моделі процесу діагностування технічного стану накопичувачів електроенергії у стаціонарному режимі можна зробити висновок, що вимірювання ємності C та активного опору R накопичувача електроенергії здійснюється один лише раз.

Тому найпростішої математичної моделі процесу діагностування технічного стану накопичувачів електроенергії характеризується низькою методичною достовірністю діагностування. Низька методична достовірністю діагностування технічного стану накопичувачів електроенергії пояснюється зміною ємності $C \neq \text{const}$ та активного опору $R \neq \text{const}$ в процесі експлуатації накопичувачів електроенергії.

Для найпростішої математичної моделі процесу діагностування технічного стану накопичувачів електроенергії у стаціонарному режимі діагностування кількість показників доівнює $N_1=2$ (ємність та активний опір).

В процесі експлуатації накопичувачів електроенергії частотна дисперсія та нелінійність ємності $C(\omega, u)$ та активного опору $R(\omega, u)$ накопичувачів електроенергії є аналогічним великій кількості параметрів, які характеризують технічний стан накопичувачів електроенергії.

В процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії отримуємо $N \neq N_1$ і $N \gg N_1$, тому методична достовірність діагностування стану накопичувачів електроенергії для найпростішої моделі діагностування стану

накопичувачів електроенергії у стаціонарному режимі буде набагато меншою ніж одиниця.

$$D_m = \frac{2}{N} \ll 1. \quad (2.3)$$

До складу інструментальної достовірності діагностування стану накопичувачів електроенергії у стаціонарному режимі входить ймовірність помилки першого α , а також ймовірність помилки другого роду β . Вирази для визначення ймовірності помилки першого α та ймовірності помилки другого роду β описуються рівняннями (2.4) та (2.5). Необхідно відмітити, що ймовірності помилки першого α та ймовірності помилки другого роду β потрібно розраховувати для ємності C та активного опору R накопичувачів електроенергії.

$$\alpha_c = \int_{C_H}^{C_B} f(c) \left(\int_{-\infty}^{C_H - c} f(\delta_c) d\delta_c \right) dc + \int_{C_H}^{C_B} f(c) \left(\int_{C_B - c}^{\infty} f(\delta_c) d\delta_c \right) dc; \quad (2.4)$$

$$\beta_c = \int_{-\infty}^{C_H} f(c) \left(\int_{C_H - c}^{C_B - c} f(\delta_c) d\delta_c \right) dc + \int_{C_B}^{\infty} f(c) \left(\int_{C_H - c}^{C_B - c} f(\delta_c) d\delta_c \right) dc, \quad (2.5)$$

де C_B , C_H – верхня та нижня межі для ємності C накопичувачів електроенергії;

$f(c)$ – вираз щільності ймовірності для ємності C накопичувачів електроенергії;

$f(\delta_c)$ – вираз щільності ймовірності похибки вимірювання ємності C накопичувачів електроенергії.

Вирази для визначення ймовірності помилки першого α та ймовірності помилки другого роду β активного опору R накопичувачів електроенергії описуються рівняннями (2.6) та (2.7) відповідно.

$$\alpha_r = \int_{R_H}^{R_B} f(r) \left(\int_{-\infty}^{R_H-r} f(\delta_r) d\delta_r \right) dr + \int_{R_H}^{R_B} f(r) \left(\int_{R_B-r}^{\infty} f(\delta_r) d\delta_r \right) dr; \quad (2.6)$$

$$\beta_r = \int_{-\infty}^{R_H} f(r) \left(\int_{R_H-r}^{R_B-r} f(\delta_r) d\delta_r \right) dr + \int_{R_B}^{\infty} f(r) \left(\int_{R_H-r}^{R_B-r} f(\delta_r) d\delta_r \right) dr, \quad (2.7)$$

де R_B, R_H – верхня та нижня межі для активного опору R накопичувачів електроенергії;

$f(r)$ – вираз щільності ймовірності для активного опору R накопичувачів електроенергії;

$f(\delta_r)$ – вираз щільності ймовірності похибки вимірювання активного опору R накопичувачів електроенергії.

В процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії отримуємо вираз загальної достовірності діагностування стану накопичувачів електроенергії у стаціонарному режимі, який записується у вигляді (2.8)

$$D_3 = D_M \cdot D_I = \frac{2}{N} \cdot (1 - \alpha - \beta) \ll 1. \quad (2.8)$$

В процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії оцінку якості діагностування стану накопичувачів електроенергії у стаціонарному режимі визначимо, використовуючи вираз середнього ризику діагностування стану накопичувачів електроенергії, який записується у вигляді (2.9).

$$\Psi \approx W_{1c} \alpha_c + W_{2c} \beta_c + W_{1r} \alpha_r + W_{2r} \beta_r, \quad (2.9)$$

де W_{1c} , та W_{1r} – коефіцієнти втрат, що виникають в процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії та обумовлені помилками 1–го роду для ємності C та активного опору R накопичувачів електроенергії;

W_{2c} , та W_{2r} – коефіцієнти втрат, що виникають в процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії та обумовлені помилками 2–го роду для ємності C та активного опору R накопичувачів електроенергії;

α_c , та α_r – вирази імовірностей помилок 1–го роду для ємності C та активного опору R накопичувачів електроенергії;

β_c , та β_r – вирази імовірностей помилок 2–го роду для ємності C та активного опору R накопичувачів електроенергії;

Достовірність діагностування стану накопичувачів електроенергії можна підвищити, якщо використовувати їх частотні та часові характеристики. В процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії можна використовувати їх операторний опір $Z(p, u)$, який залежить від напруги на виводах накопичувачів електроенергії.

Також можна використовувати їх комплексний опір $Z(j\omega, u)$, який залежить від напруги на виводах накопичувачів електроенергії. Операторний опір $Z(p, u)$ та комплексний опір $Z(j\omega, u)$ є частотними характеристиками накопичувачів електроенергії.

Перехідний опір накопичувачів електроенергії $z(t, u)$ є їх часовою характеристикою. ЕК, Зв'язок між операторним опором $Z(p, u)$ накопичувачів електроенергії та їх перехідним опором $z(t, u)$ описується за допомогою перетвореннями Лапласа.

Якщо відомий перехідний опір накопичувача електроенергії $z(t, u)$, то його операторний опір $Z(p, u)$ можна визначити за допомогою оберненого перетвореннями Лапласа у відповідності до виразу (2.10).

$$Z(p, u) = L^{-1}[z(t, u)], \quad (2.10)$$

де $p = j\omega$ - комплексна частота.

Якщо ж, навпаки, відомий операторний опір накопичувача електроенергії $Z(p, u)$, то його перехідний опір $z(t, u)$ можна визначити за допомогою прямого перетворення Лапласа у відповідності до виразу (2.10).

$$z(t, u) = L[Z(p, u)]. \quad (2.11)$$

В процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії на них можна подавати напругу зонduючого впливу $u_3(t)$, або струм зонduючого впливу $i_3(t)$. У першому випадку в процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії вимірюється струм, який проходить через накопичувач електроенергії $i_g(t)$, а у другому випадку – напруга на їх виводах $u_g(t)$.

Зв'язок між напругою зонduючого впливу $u_3(t)$ та струмом, який проходить через накопичувач електроенергії $i_g(t)$ описує вираз (2.12).

$$i_g(t) = Z[u_3(t)]; \quad (2.12)$$

де Z - це математичний оператор, який застосовується до напруги зонduючого впливу $u_3(t)$, щоб отримати струмом, який проходить через накопичувач електроенергії $i_g(t)$.

По аналогії із виразом (2.12), можна записати вираз (2.13), що описує зв'язок між струмом, який проходить через накопичувач електроенергії $i_g(t)$, та напругою зонduючого впливу $u_3(t)$.

$$u_g(t) = Y[i_3(t)]. \quad (2.13)$$

де Y - це математичний оператор, який застосовується до струму зондуючого впливу $i_3(t)$, щоб отримати напруга на виводах накопичувача електроенергії $u_g(t)$.

З теорії вимірювань відомо, що в процесі вимірювань отримуємо значення фізичної величини із певною похибкою. Тому, в процесі вимірювання напруги на виводах накопичувача електроенергії $u_g(t)$, її вимірне значення описується виразом (2.14).

$$u_g^*(t) = u_g(t) + \Delta u_g(t). \quad (2.14)$$

де $\Delta u_g(t)$ - це випадковий стаціонарний процес похибки вимірювання напруги.

По аналогії можна записати вираз струму, який проходить через накопичувач електроенергії $i_g(t)$ (2.15).

$$i_g^*(t) = i_g(t) + \Delta i_g(t); \quad (2.15)$$

де $\Delta i_g(t)$ - це також випадковий стаціонарний процес похибки вимірювання, але уже струму.

В процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії потрібно визначити оператори Z_g та Y_g . Ці оператори наближаються до математичних операторів Z та Y . З теорії вимірювань відомо, що в процесі вимірювань істинні значення фізичних величин є невідомими, тому ми не знаємо точних виразів Z та Y .

Для опису характеристик накопичувачів електроенергії будемо використовувати їх математичні моделі, які описуються математичними операторами Z_m або Y_m .

Порівняти оператори Y_{ϵ} та Y_M , можна шляхом порівнювання напруги на виводах накопичувача електроенергії $u_{\epsilon}(t)$, яка вимірюється в процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії, із напругою на виводах математичної моделі $u_M(t)$ накопичувача електроенергії.

По аналогії із операторами Y_{ϵ} та Y_M , оператори Z_{ϵ} та Z_M можна порівняти можна шляхом порівнювання струму, який проходить через накопичувач електроенергії $i_{\epsilon}(t)$ в процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії, із струмом математичної моделі $i_M(t)$ накопичувача електроенергії.

Таке порівняння здійснюється для однакових значень напруги $u_{\epsilon}(t)$ та струму $i_{\epsilon}(t)$ зонduючого впливу для математичної моделі накопичувача електроенергії в процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії в процесі математичного моделювання накопичувачів електроенергії.

Якщо позначити функцію втрат або ризиків напруги, які виникають в процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії через $\eta_u[u_{\epsilon}(t), u_M(t)]$, тоді середні втрати або середні ризики напруги можна описати виразом (2.16).

$$\bar{\Psi}_u = M \{ \eta_u [u_{\epsilon}(t), u_M(t)] \}; \quad (2.16)$$

де $M\{\cdot\}$ – математичне сподівання функції втрат $\eta_u [u_{\epsilon}(t), u_M(t)]$.

По аналогії із функцією втрат або ризиків напруги, можна позначити функцію втрат або ризиків струму, які виникають в процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії через $\eta_i [i_{\epsilon}(t), i_M(t)]$. Тоді середні втрати або середні ризики струму можна описати виразом (2.17).

$$\bar{\Psi}_i = M \{ \eta_i [i_{\epsilon}(t), i_M(t)] \}. \quad (2.17)$$

де $M\{\cdot\}$ – математичне сподівання функції втрат $\eta_i[i_g(t), i_m(t)]$.

Середні втрати або середні ризики напруги, які виникають в процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії, можна також описати виразом (2.18).

$$\bar{\Psi}_u = \iint \eta_u(u_g, u_m) f_u(u_g, u_m) du_g du_m; \quad (2.18)$$

де $f_u(u_g, u_m)$ - густина імовірності напруг, які визначаються в процесі вимірювання та моделювання.

По аналогії із функцією втрат або ризиків напруги, середні втрати або середні ризики струму, які виникають в процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії, можна також описати виразом (2.19).

$$\bar{\Psi}_i = \iint \eta_i(i_g, i_m) f_i(i_g, i_m) di_g di_m, \quad (2.19)$$

де $f_i(i_g, i_m)$ - густина імовірності струмів, які визначаються в процесі вимірювання та моделювання.

Якщо провідність $y(t, i)$ та опір $z(t, u)$ накопичувачів електроенергії мають вигляд плавних функцій, при цьому напруга зондуючого впливу $u_3(t)$, або струм зондуючого впливу $i_3(t)$ виступають стаціонарними процесами, то вирази (2.18) та (2.19) можна записати у вигляді (2.20) та (2.21).

$$\bar{\Psi}_u = \int_{u \in U} \eta_u[z_g(t, u), z_m(t, u)] f_u(u) du; \quad (2.20)$$

$$\bar{\Psi}_i = \int_{i \in I} \eta_i[y_g(t, i), y_m(t, i)] f_i(i) di, \quad (2.21)$$

де U – множина значень u ;

I – множина значень i .

Розбіжність між вимірною перехідною провідністю $y_{\epsilon}(t,i)$ та перехідною провідністю математичної моделі $y_M(t,i)$ в процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії може бути оцінена коефіцієнтом максимального відхилення, який описується виразом (2.22).

$$m_i = \max_{i \in I} |y_{\epsilon}(t,i) - y_M(t,i)|. \quad (2.22)$$

По аналогії із розбіжністю між $y_{\epsilon}(t,i)$ та $y_M(t,i)$, розбіжність між вимірним перехідним опором $z_{\epsilon}(t,u)$ та перехідним опором математичної моделі $z_M(t,u)$ може бути оцінена коефіцієнтом максимального відхилення, який описується виразом (2.23).

$$m_u = \max_{u \in U} |z_{\epsilon}(t,u) - z_M(t,u)|. \quad (2.23)$$

Якщо вибрати вирази, що описують математичні моделі перехідного опору $z_M(t,u)$ та перехідної провідності $y_M(t,i)$ накопичувачів електроенергії, а також задовольняють коефіцієнтам максимального відхилення (2.22) та (2.23), то можна записати вирази середніх ризиків процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії.

$$\bar{\Psi}_u = \int_{u \in U} |z_{\epsilon}(t,u) - z_M(t,u)|^k f_u(u) du \leq \int_{u \in U} m_u^k f_u(u) du = m_u^k; \quad (2.24)$$

$$\bar{\Psi}_i = \int_{i \in I} |y_{\epsilon}(t,i) - y_M(t,i)|^k f_i(i) di \leq \int_{i \in I} m_i^k f_i(i) di = m_i^k. \quad (2.25)$$

де $\eta_u = |z_{\epsilon}(t,u) - z_M(t,u)|^k$ - функція втрат напруги в процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії;

$\eta_i = |y_{\epsilon}(t,i) - y_M(t,i)|^k$ - функція втрат струму в процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії.

Особливістю виразів середніх ризиків втрат в процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії (2.24) та (2.25) є визначення межі, для розрахунку якої не потрібно знати густину ймовірності напруги зондуючого впливу $f_u(u)$, а також густину ймовірності струму зондуючого впливу $f_i(i)$.

Звідси можна зробити висновок, що достовірність процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії буде максимальною, якщо математичні моделі перехідного опору $z_m(t,u)$ та перехідної провідності $y_m(t,i)$ накопичувачів електроенергії з високою описують їх вимірні характеристики перехідного опору $z_g(t,u)$ та перехідної провідності $y_g(t,i)$.

2.2 Удосконалення математичної моделі процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії на змінному струмі

Операторний опір $Z(p)$ та операторна провідність $Y(p)$ описують частотну характеристику опору та провідності накопичувачів електроенергії. В загальному вигляді операторний опір $Z(p)$ записується у вигляді відношення поліному чисельника $M(p)$ до поліному знаменника $N(p)$, а операторна провідність $Y(p)$ є оберненою залежністю, що випливає із виразу (2.26).

$$Z(p) = \frac{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0}{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0} = \frac{M(p)}{N(p)} = \frac{1}{Y(p)}, \quad (2.26)$$

де a_i - коефіцієнти чисельника;

b_i - коефіцієнти знаменника відповідно;

n - степінь поліному чисельника;

m - степінь поліному знаменника.

Відношення двох поліномів може бути записано для чисельника добутком сум полюсів чисельника z_i та змінної p , а для знаменника добутком сум нулів знаменника p_i та змінної p , що впливає із виразу (2.27).

$$Z(p) = \frac{(p + z_0)(p + z_1) \cdots (p + z_n)}{(p + p_0)(p + p_1) \cdots (p + p_m)}, \quad (2.27)$$

де z_0, z_1, \dots, z_n – нулі чисельника дробу $Z(p)$;

де p_0, p_1, \dots, p_m – полюси знаменника дробу $Z(p)$.

Вираз операторного опору накопичувачів електроенергії $Z(p)$ можна записати у вигляді дробових складових (2.28), які на еквівалентній схемі заміщення накопичувачів електроенергії мають паралельного з'єднання резисторів R_i та конденсаторів C_i .

$$Z(p) = \frac{k_0}{p} + \sum_{i=1,3,5,\dots}^m \frac{k_i}{p + \sigma_i} + H, \quad (2.28)$$

де k_0 - лишок в полюсі $p = 0$;

k_i - лишки в полюсах $p = \sigma_i$;

H - лишок в полюсі $p = \infty$.

Для виразу операторного опору накопичувачів електроенергії $Z(p)$ (2.28) еквівалентна схема заміщення накопичувачів електроенергії зображена на рисунок 2.2.

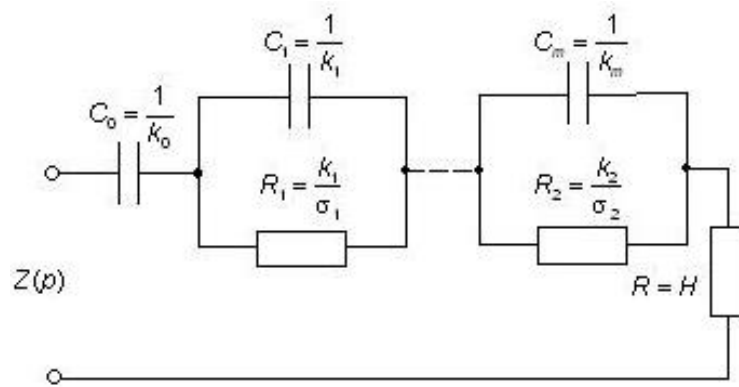


Рисунок 2.2 – Еквівалентна схема заміщення накопичувачів електроенергії у вигляді паралельного з’єднання резисторів R_i та конденсаторів C_i

Еквівалентна схема заміщення накопичувачів електроенергії у вигляді паралельного з’єднання резисторів R_i та конденсаторів C_i моделює лінійні двополюсники. На основі аналізу параметрів і характеристик накопичувачів електроенергії, який було проведено у першому розділі, можна зробити висновок, що накопичувачі електроенергії є нелінійними двополюсниками.

Нелінійні двополюсники залежать від рівня напруги, яка прикладена до їх виводів, або струму, який протікає через двополюсник. Тому в еквівалентній схемі заміщення накопичувачів електроенергії, яка наведена на рисунку (2.2), необхідно використовувати паралельне з’єднання нелінійних резисторів $R_i(u)$ та нелінійних конденсаторів $C_i(u)$. Тоді нелінійну еквівалентну схему заміщення накопичувачів електроенергії можна зобразити у вигляді, я наведено на рисунку 2.3.

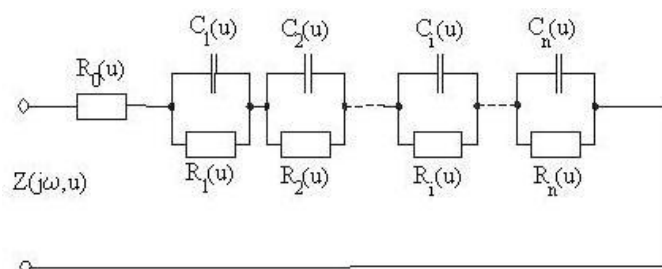


Рисунок 2.3 – Нелінійна еквівалентна схема заміщення накопичувачів електроенергії

У нелінійній еквівалентній схемі заміщення накопичувачів електроенергії, яка наведена на рисунку 2.3, вхідний послідовний конденсатор C_0 замінено на вхідний послідовний нелінійний резистор $R_0(u)$. Така заміна дозволяє моделювати нелінійний процес саморозряду накопичувачів електроенергії, який неможливо змоделювати в еквівалентній схемі заміщення, яка наведена на рисунку 2.2, тому що послідовний конденсатор C_0 не буде пропускати постійного струму саморозряду.

Для нелінійної еквівалентної схеми заміщення накопичувачів електроенергії, яка наведена на рисунку 2.3, нелінійний комплексний опір записується вигляді виразу (2.29).

$$Z(j\omega, u) = R_0(u) + \sum_{i=1}^n \frac{R_i(u)}{j\omega R_i(u) C_i(u)}. \quad (2.29)$$

На основі аналізу параметрів і характеристик накопичувачів електроенергії, який було проведено у першому розділі, можна зробити висновок, що нелінійний комплексний опір накопичувачів електроенергії, який описується виразом, (2.29) з недостатньою точністю описує параметри і характеристики накопичувачів електроенергії.

В процесі моделювання параметрів і характеристик накопичувачів електроенергії вищої точності апроксимації їх нелінійного комплексного опору можна досягти, що замість нелінійних конденсаторів, використовувати нелінійні дробові конденсатори $C_1(u)$ та $C_2(u)$. нелінійних дробових конденсаторів $C_1(u)$ та $C_2(u)$ від традиційних конденсаторів є те, що їх ємнісний опір, описується виразом дробового порядку (2.30).

$$X_C(j\omega, u) = \frac{1}{(j\omega)^a \cdot C(u)}, \quad (2.30)$$

де a – дробовий коефіцієнт $0 < a < 1$.

Важливою особливістю параметрів і характеристик накопичувачів електроенергії є пряма ділянка їх діаграми комплексного опору, що відповідає імпедансу Варбурга, як зображено на рисунку 1.4.

Комплексний опір імпедансу Варбурга описується виразом (2.31).

$$W(j\omega) = \frac{W}{\sqrt{\omega}}(1-j), \quad (2.31)$$

де W – коефіцієнт Варбурга $0 < W < 1$.

З урахуванням нелінійних дробових конденсаторів $C_1(u)$ та $C_2(u)$ та імпедансу Варбурга, нелінійна дробова еквівалентна схема заміщення накопичувачів електроенергії буде мати вигляд, як наведено на рисунку 2.4.

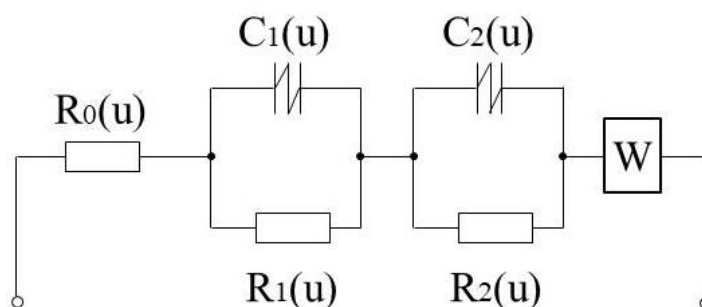


Рисунок 2.4 – Нелінійна дробова еквівалентна схема заміщення накопичувачів електроенергії

Для нелінійної дробової еквівалентної схеми заміщення накопичувачів електроенергії, яка наведена на рисунку 2.3, нелінійний дробовий комплексний опір записується в вигляді виразу (2.32).

$$Z(j\omega, u) = R_0(u) + \frac{1}{\frac{1}{R_1(u)} + (j\omega)^{a_1} \cdot C_1(u)} + \frac{1}{\frac{1}{R_2(u)} + (j\omega)^{a_2} \cdot C_2(u)} + \frac{W}{\sqrt{\omega}}(1-j). \quad (2.32)$$

Адекватність удосконаленої математичної моделі накопичувачів електроенергії підтверджується співпадінням експериментальних даних комплексного опору літій-іонного накопичувача електроенергії BionX ємністю 8,8 Агод і номінальною напругою 48 В із теоретичними даними, які отримані в результаті апроксимації експериментальних даних виразом нелінійного дробового комплексного опору (2.32), як зображено на рисунку 2.5.

В результаті апроксимації експериментальних даних виразом нелінійного дробового комплексного опору (2.32) в діапазоні частот від $f_{\min} = 1$ мГц до $f_{\max} = 1$ кГц отримані наступні параметри нелінійної дробової еквівалентної схеми заміщення накопичувачів електроенергії: $R_0 = 0,0096$ Ом, $R_1 = 0,0047$ Ом, $C_1 = 5,675$ Ф, $a_1 = 0,598$ $R_2 = 8,813$ Ом, $C_2 = 111,55$ Ф, $a_2 = 0,001$, $W = 0,0011$.

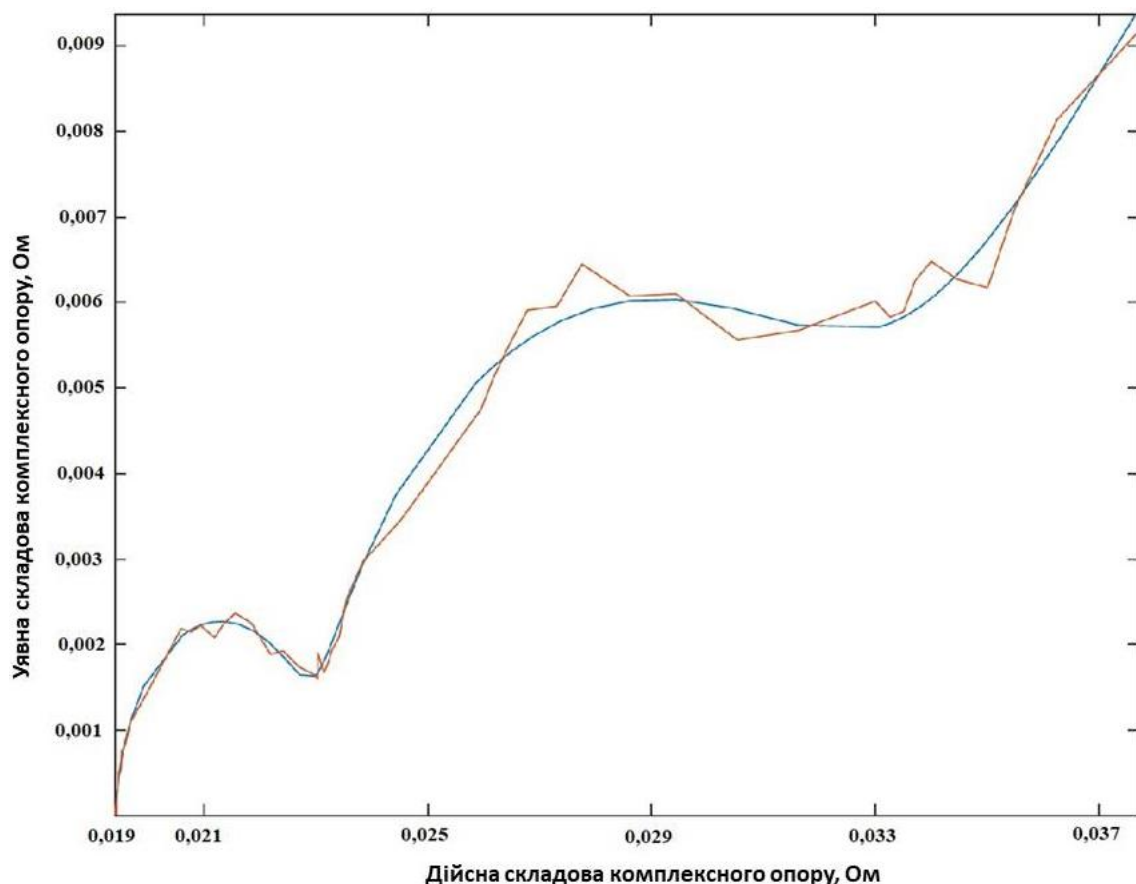


Рисунок 2.5 – Співпадіння експериментальних даних комплексного опору літій-іонного накопичувача електроенергії BionX ємністю 8,8 Агод і номінальною напругою 48 В із теоретичними даними

Експериментальні данні залежності комплексного опору літій-іонного накопичувача електроенергії BionX ємністю 8,8 Агод і номінальною напругою 48 В для різних рівнів заряду (SOC) накопичувача електроенергії зображено на рисунку 2.6.

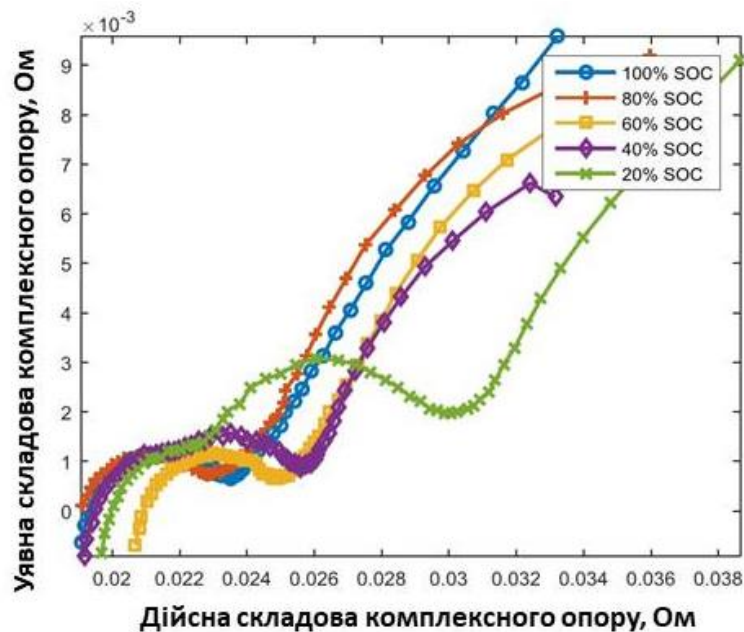


Рисунок 2.6 – Експериментальні данні залежності комплексного опору літій-іонного накопичувача електроенергії BionX ємністю 8,8 Агод і номінальною напругою 48 В для різних рівнів заряду (SOC) накопичувача електроенергії

Висновки до другого розділу

1. При побудові стрисроїв діагностування стану накопичувачів електроенергії необхідно враховувати параметри, які відображують їх технічний стан. До номінальних показників технічного стану накопичувачів електроенергії відноситься їх ємність C та активний опір R .

2. Тому найпростішої математичної моделі процесу діагностування технічного стану накопичувачів електроенергії характеризується низькою методичною достовірністю діагностування. Низька методична достовірністю діагностування технічного стану накопичувачів електроенергії пояснюється

змінною ємності $C \neq \text{const}$ та активного опору $R \neq \text{const}$ в процесі експлуатації накопичувачів електроенергії.

3. Достовірність діагностування стану накопичувачів електроенергії можна підвищити, якщо використовувати їх частотні та часові характеристики. В процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії можна використовувати їх операторний опір $Z(p, u)$, який залежить від напруги на виводах накопичувачів електроенергії.

4. Достовірність процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії буде максимальною, якщо математичні моделі перехідного опору $z_m(t, u)$ та перехідної провідності $y_m(t, i)$ накопичувачів електроенергії з високою описують їх виміряні характеристики перехідного опору $z_e(t, u)$ та перехідної провідності $y_e(t, i)$.

5. Адекватність удосконаленої математичної моделі накопичувачів електроенергії підтверджується співпадінням експериментальних даних комплексного опору літій-іонного накопичувача електроенергії BionX ємністю 8,8 Агод і номінальною напругою 48 В із теоретичними даними, які отримані в результаті апроксимації експериментальних даних виразом нелінійного дробового комплексного опору.

3 Удосконалений метод діагностування стану накопичувачів електроенергії

3.1 Удосконалення математичної моделі процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії на постійному струмі

В основі математичної моделі процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії на постійному струмі лежить процес розряду накопичувача електроенергії постійним струмом, постійною напругою або постійною потужністю.

Якщо процес розряду накопичувача електроенергії відбувається постійним струмом, то такий режим діагностування стану накопичувачів електроенергії на постійному струмі називається гальваностатичним.

Якщо процес розряду накопичувача електроенергії відбувається постійною напругою, то такий режим діагностування стану накопичувачів електроенергії на постійному струмі називається потенціостатичним.

Якщо процес розряду накопичувача електроенергії відбувається постійною потужністю, то такий режим діагностування стану накопичувачів електроенергії на постійному струмі називається режимом постійної потужності.

В усіх трьох режимах діагностування стану накопичувачів електроенергії визначаються два основних параметра накопичувачів електроенергії: ємність накопичувача електроенергії та активний опір накопичувача електроенергії.

В процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії на постійному струмі ємність накопичувача електроенергії визначається у відповідності до виразу (3.1).

$$C = \int_{t_1}^{t_2} \frac{SOC(t_1) - SOC(t_2)}{3600} idt, \quad (3.1)$$

де $SOC(t_1)$ - рівень заряду накопичувача електроенергії на початку процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії на постійному струмі;

$SOC(t_2)$ - рівень заряду накопичувача електроенергії в кінці процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії на постійному струмі;

i - постійний струм, який використовується в процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії на постійному струмі

t_1 - значення часу на початку процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії на постійному струмі;

t_2 - значення часу в кінці процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії на постійному струмі.

Проаналізуємо еквівалентну схему заміщення накопичувача електроенергії в процесі діагностування стану накопичувача електроенергії на постійному струмі, яка зображена на рисунку 3.1.

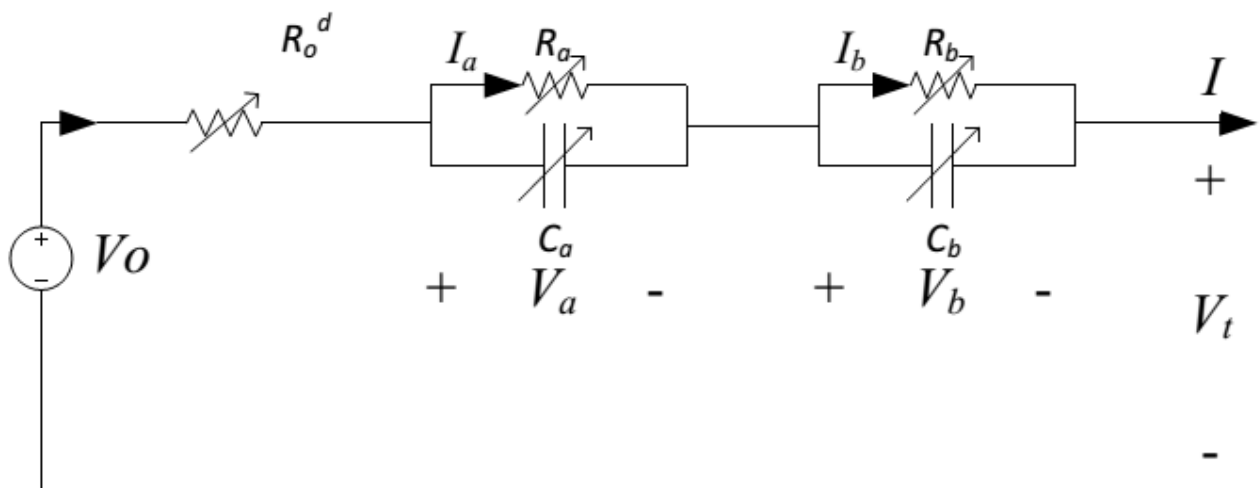


Рисунок 3.1 – Еквівалентна схема заміщення накопичувача електроенергії в процесі діагностування стану накопичувача електроенергії на постійному струмі

Залежність напруги на виході накопичувача електроенергії $V_i(t)$ від струму $I(t)$, який проходить через накопичувач електроенергії в процесі діагностування його стану, описується виразом (3.2).

$$V_i(t) = V_0 [SOC(t)] - I_{R_a}(t)R_a - I_{R_b}(t)R_b - I(t)R_0, \quad (3.2)$$

де V_0 - напруга холостого ходу накопичувача електроенергії;

$SOC(t)$ - рівень заряду накопичувача електроенергії на початку процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії на постійному струмі;

$I_{R_a}(t)$ - постійний струм, який проходить через опір R_a ;

$I_{R_b}(t)$ - постійний струм, який проходить через опір R_b ;

$I(t)$ - постійний струм, який проходить через опір R_0 .

Запишемо вирази диференційних рівнянь струмів $I_{R_a}(t)$ та $I_{R_b}(t)$, які проходять через опори R_a та R_b , відповідно. Вираз для струму $I_{R_a}(t)$ описується рівнянням (3.3), а вираз для струму $I_{R_b}(t)$ описується рівнянням (3.4), відповідно.

$$\frac{dI_{R_a}(t)}{dt} = -\frac{1}{C_a R_a} I_{R_a}(t) + \frac{1}{C_a R_a} I(t). \quad (3.3)$$

$$\frac{dI_{R_b}(t)}{dt} = -\frac{1}{C_b R_b} I_{R_b}(t) + \frac{1}{C_b R_b} I(t). \quad (3.4)$$

Перейдемо від неперервного часу t до дискретного часу k . Для дискретного часу k залежність напруги на виході накопичувача електроенергії $V_i(k)$ від струму $I(k)$, який проходить через накопичувач електроенергії в процесі діагностування його стану, описується виразом (3.5).

$$V_i(k) = V_0 [SOC(k)] - I_{R_a}(k) R_a - I_{R_b}(k) R_b - I(k) R_0. \quad (3.5)$$

Тоді розв'язок диференційних рівнянь струмів $I_{R_a}(t)$ та $I_{R_b}(t)$, які проходять через опори R_a та R_b , відповідно вирази (3.3) і (3.4), для дискретного часу k можна записати у вигляді (3.6) і (3.7).

$$I_{R_a}(k+1) = e^{-\frac{\Delta t}{C_a R_a}} I_{R_a}(k) + \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{C_a R_a}}\right) I(k). \quad (3.6)$$

$$I_{R_b}(k+1) = e^{-\frac{\Delta t}{C_b R_b}} I_{R_b}(k) + \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{C_b R_b}}\right) I(k). \quad (3.7)$$

Вираз рівня заряду накопичувача електроенергії в процесі діагностування його стану для дискретного часу k можна записати у вигляді (3.8).

$$SOC(k+1) = SOC(k) - \frac{\eta \Delta t}{C} I(k). \quad (3.8)$$

де η - коефіцієнт корисної дії;

C - номінальна ємність накопичувача електроенергії.

3.2 Режими діагностування стану накопичувачів електроенергії на постійному струмі

Один цикл - це два послідовних напівциклу заряду і розряду накопичувачів електроенергії на постійному струмі або навпаки. Першим напівцикл може бути як заряд, так і розряд накопичувачів електроенергії на постійному струмі. Початок і кінець кожного напівциклу (час напівциклу) визначається проходженням струму однієї полярності через накопичувач електроенергії на постійному струмі.

Гальваностатичний режим діагностування стану накопичувачів електроенергії на постійному струмі.

Заряд і розряд при постійних значеннях струму до заданих значень кінцевого напруги заряду і розряду накопичувачів електроенергії на постійному струмі. Автоматичне перемикання з заряду на розряд.

У гальваностатичного режимі використовується режим вимірювання опору накопичувачів електроенергії на постійному струмі при переході з заряду на розряд і навпаки.

Значення опору (R) накопичувачів електроенергії на постійному струмі отримують вимірюванням стрибка потенціалу $\Delta\phi = \Delta IR$ при перемиканні з заряду на розряд накопичувачів електроенергії на постійному струмі і навпаки ($\Delta\phi_{+/-}$ і $\Delta\phi_{-/+}$ - мають різні значення).

При вимірі стрибка потенціалу $\Delta\phi$ – різниця потенціалів між останнім виміром зарядної кривої і першим виміром розрядної кривої (або навпаки) час між двома послідовними вимірюваннями, період T автоматично зменшується до 1мс. В цьому випадку опір накопичувача електроенергії на постійному струмі дорівнює $R = \Delta\phi / (|I_1| + |I_2|)$.

В процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії на постійному струмі адаються загальні параметри вимірювань:

- діапазон струму (10, 100 А);
- верхнє і нижнє напругу циклування, В;

- загальне необхідне число циклів - N (після чого діагностування припиняється);

- період T , с - час між двома послідовними зчитування поточного значення потенціалу. Мінімальний час між двома послідовними зчитування поточного значення потенціалу складає 1мс , максимальний час - не обмежується.

Для кожного напівциклу встановлюються наступні параметри:

- полярність і значення струму - $I_1, I_2 [\pm \text{A}]$;

- верхнє і нижнє значення потенціалу - $\phi_1, \phi_2 [+ \text{V}]$.

Напрямок першого вимірювання визначається знаком струму, який встановлюється першим (для першого напівциклу).

Гальваностатичний режим діагностування стану накопичувачів електроенергії на постійному струмі з відключенням струму при досягненні кінцевих заданих значень напруги.

Гальваностатичний режим діагностування стану накопичувачів електроенергії на постійному струмі з відключенням струму при досягненні кінцевих заданих значень напруги призначений для отримання даних про саморозряд накопичувачів електроенергії.

Протягом кожного напівциклу проводиться заряд в гальваностатичному режимі до заданої кінцевої напруги, при її досягненні відбувається перехід в

режим саморазряду до заданого значення залишкової напруги і автоматичне перемикаання на наступний напівцикл.

Задаються загальні параметри вимірювань:

- діапазон струму (10, 100 А);
- загальне необхідне число циклів - N (після чого вимірювання припиняється);
- період T, с - час між двома послідовними зчитування поточного значення потенціалу.

Для кожного напівцикл встановлюються наступні параметри:

- значення струму - I [\pm А];
- значення кінцевого потенціалу - ϕ_1 [+ В];
- значення залишкового потенціалу - ϕ_2 [+ В].

Порядок зміни параметрів діагностування.

При спостереженні поточної графічної інформації реалізується можливість зупинити діагностування в будь-який момент часу.

Зміна параметрів діагностування для даного зразка проводиться після зупинки випробувань, зміни параметрів і повторного запуску програми.

Ємність накопичувачів електроенергії на постійному струмі в процесі діагностування їх стану розраховують з розрядної частини кривої циклу за допомогою рівняння, яке описується виразом (3.9).

$$C = \frac{I \cdot \Delta t}{\Delta U} \quad (3.9)$$

де I – розрядний струм;

Δt – розрядний час;

ΔU – різниця напруги, яка розраховується за допомогою виразу (3.10).

$$\Delta U = 0,9(U_{max} - U_{drop}) - 0,7(U_{max} - U_{drop}). \quad (3.10)$$

Внутрішній опір накопичувачів електроенергії на постійному струмі в процесі діагностування їх стану поділяють на: еквівалентний послідовний опір (equivalent series resistance – ESR) та еквівалентний розподілений опір (equivalent distributed resistance – EDR). Еквівалентний послідовний опір (equivalent series resistance – ESR) та еквівалентний розподілений опір (equivalent distributed resistance – EDR) визначають із розрядної кривої накопичувачів електроенергії на постійному струмі в процесі діагностування їх стану постійним струмом I (рисунок 3.2).

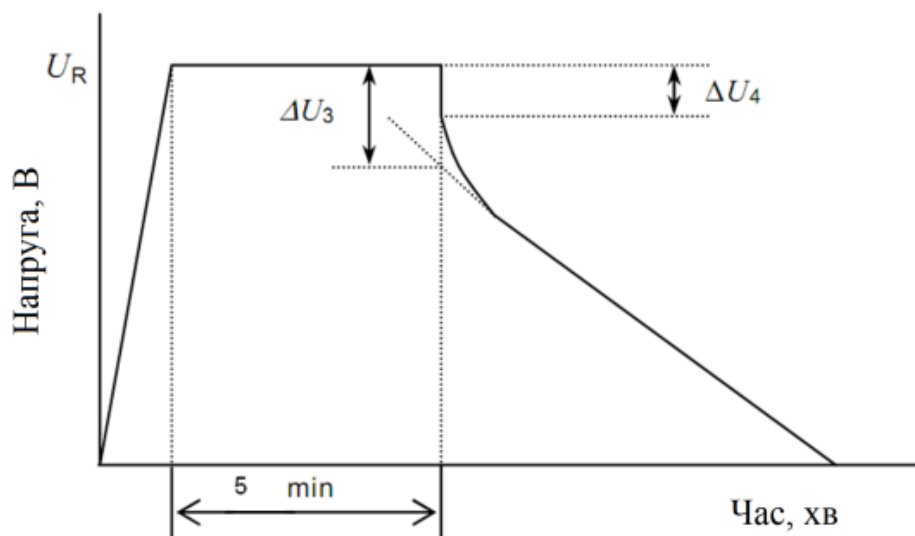


Рисунок 3.2 – Розрядна крива накопичувачів електроенергії на постійному струмі в процесі діагностування їх стану постійним струмом I

Еквівалентний послідовний опір (equivalent series resistance – ESR) накопичувачів електроенергії на постійному струмі в процесі діагностування їх стану постійним струмом I визначають при зарядженні та розрядженні

накопичувача електроенергії постійним струмом I в мілісекундному діапазоні часу, у відповідності до виразу (3.11).

$$R_{\text{ESR}} = \frac{\Delta U_4}{\Delta I} \quad (3.11)$$

де ΔI – відстань між зарядним і розрядним струмами до і після зміни напрямку (заряд/розряд);

ΔU_4 – спад напруги на активному внутрішньому опорі (час між двома значеннями вимірюваннями напруги не перевищує 10 мс).

Еквівалентний розподілений опір (equivalent distributed resistance – EDR) накопичувачів електроенергії на постійному струмі в процесі діагностування їх стану постійним струмом I визначають у відповідності до виразу (3.12).

$$R_{\text{EDR}} = \frac{\Delta U_3}{\Delta I} \quad (3.12)$$

де ΔU_3 – значення спаду напруги, яке отримали перетині лінії екстраполяції, що відповідає лінійній ділянці розрядної кривої та перпендикуляру напруги при переході до розряду.

Максимальний струм накопичувачів електроенергії на постійному струмі в процесі діагностування їх стану постійним струмом I визначають у відповідності до виразу (3.13).

$$I_{\text{max}} = \frac{CU_R}{2(\Delta t + CR_{\text{ESR}})} \quad (3.13)$$

де Δt – розрядний час;

U_R – робоча напруга;

C – ємність;

R_{ESR} – еквівалентний послідовний опір (equivalent series resistance – ESR).

Максимальним струмом накопичувача електроенергії називають струм, який необхідний для розрядки накопичувачів електроенергії від напруги U_R до $U_R/2$ за 2 с.

Максимальною енергією накопичувача електроенергії називають енергію, яку накопичувача електроенергії може зберігати при заряді до робочої напруги.

Максимальну енергію накопичувача електроенергії можна обчислити у відповідності до виразу (3.14).

$$E_{\max} = \frac{CU_R^2}{2 \times 3600}. \quad (3.14)$$

Енергія, яку можна отримати при розряді від робочої напруги U_R до $U_R/2$ визначається виразом (3.15).

$$E_{\max} = \frac{3CU_R^2}{8 \times 3600}. \quad (3.15)$$

Максимальною потужністю накопичувача електроенергії, яка може бути передана на навантаження від повністю зарядженого накопичувача електроенергії називають максимальну потужність, яка використовує значення R_{EDR} у відповідності до виразу (3.16).

$$P_{\max} = \frac{0.25U_R^2}{R_{EDR}}, \quad (3.16)$$

де P_{\max} – максимальна потужність;

U_R – робоча напруга;

R_{EDR} – еквівалентний розподілений опір (equivalent distributed resistance – EDR).

Метод розрахунку, який отримав назву метод збіжності імпедансу потужності.

Якщо потрібно розрахувати вихідну потужність, тоді використовують інше рівняння, яке відповідає певній ефективності та розряду накопичувача електроенергії від номінальної напруги U_R до $U_R/2$.

$$P_{\eta} = \frac{9(1-\eta)U_R^2}{16R_{EDR}}. \quad (3.16)$$

де P_{η} – вихідна потужність накопичувача електроенергії, яку визначають при заданій ефективності η ;

U_R – номінальна напруга (В);

R_{EDR} – еквівалентний розподілений опір (equivalent distributed resistance – EDR).

Часову залежність саморозряду накопичувача електроенергії, а саме швидкість внутрішніх процесів, що викликають процес розряду накопичувача електроенергії, коли накопичувач електроенергії не підключений до навантаження.

Основна ціль діагностування полягає в наступних двох завданнях.

1. Вимірювання енергії, яка була втрачена протягом інтервалу діагностування.

2. Визначення зниження напруги накопичувача електроенергії під час випробування. Ця напруга дозволяє визначити зваємо зв'язок між втратами енергії та виразити її через функцію часу роботи.

Криві саморозряду наведено на рисунку 3.3.

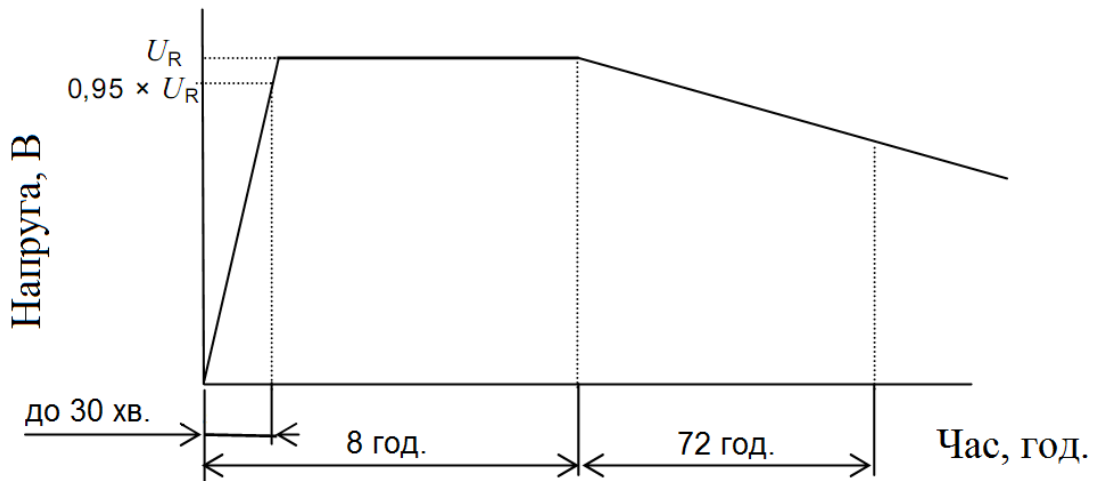


Рисунок 3.24 – Діаграма тесту саморозряду СК

Рівень підтримки напруги, це вимірювальний параметр, який розраховується у відповідності до виразу (3.17).

$$B = \frac{U_{end}}{U_R} \times 100\% . \quad (3.17)$$

де B – рівень підтримки напруги (%);

U_{end} – напруга між «відкритими» клеммами накопичувача електроенергії через 72 години;

U_R – номінальна напруга.

Тест циклічності.

Тест циклічності спрямований на визначення стабільності характеристик накопичувача електроенергії в процесі циклічного заряду/розряду в гальваностатичному режимі від U_R до $U_R/2$.

Під час проходження тесту циклічності величина струму становить 100 С (а величина 1 С відповідає струму, який необхідно забезпечити для розрядження накопичувача електроенергії від U_R до $U_R/2$ протягом 1 години. Струм 100 С забезпечує тривалість розряду 36 секунд).

Випробування на тест циклічності закінчується коли досягнуто 100 000 циклів або коли виникає деградація характеристик накопичувача

електроенергії: ємність зменшується на 30 % від стартового значення, або коли внутрішній опір зростає в два рази.

3.3 Удосконалений метод багатопараметричного діагностування стану накопичувачів електроенергії

Частотна дисперсія параметрів накопичувачів електроенергії, їх нелінійність та перехідні процеси, які виникають у вимірювальних колах приладів в процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії, призводять до зменшення достовірності діагностування стану накопичувачів електроенергії.

Процес діагностування стану накопичувачів електроенергії суттєво відрізняється від процесу діагностування стану конденсаторів, тому для підвищення достовірності діагностування стану накопичувачів електроенергії необхідно враховувати вплив частотної дисперсії параметрів накопичувачів електроенергії, їх нелінійність та перехідні процеси.

Основними засадами багатопараметричного діагностування стану накопичувачів електроенергії є врахування впливу частотної дисперсії параметрів накопичувачів електроенергії, їх нелінійність та перехідні процеси, які виникають в процесі діагностування. Дотримання цих засад дозволить значно підвищити достовірність та швидкодію діагностування стану накопичувачів електроенергії.

В основі багатопараметричного діагностування стану накопичувачів електроенергії лежить багаточастотне діагностування стану накопичувачів електроенергії. Суть багаточастотного діагностування стану накопичувачів електроенергії полягає у тому, що процес діагностування стану накопичувачів електроенергії проводиться в широкому діапазоні частот.

Врахування частотної дисперсії параметрів накопичувачів електроенергії, а не проведення процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії на одній частоті, як у конденсаторах.

Другою важливою особливістю проведення процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії є багатонапругове діагностування стану накопичувачів електроенергії.

Багатонапругове діагностування стану накопичувачів електроенергії полягає у проведенні процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії на різних частотах для різних значень напруги заряду накопичувачів електроенергії, які відповідають діапазону їх напруг роботи. Ця особливість дозволяє врахувати нелінійність параметрів накопичувачів електроенергії в процесі їх діагностування стану.

Третьою особливістю проведення процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії є проведення процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії з використанням різних зарядних і розрядних струмів.

Ця особливість полягає у тому, що процес діагностування стану накопичувачів електроенергії на постійному струмі проводиться із використанням різних значень зарядних струмів накопичувачів електроенергії в

межах діапазону їх робочого діапазону. Ця особливість дозволяє врахувати нелінійність параметрів накопичувачів електроенергії в процесі їх діагностування стану.

Четвертою особливістю процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії є проведення цього процесу у стаціонарному режимі. Це означає, що процес діагностування стану накопичувачів електроенергії проведеться лише в усталеному режимі. Дотримання цієї принципу особливості дозволяє мінімізувати вплив перехідних процесів на достовірність процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії.

Дотримання усіх цих чотирьох сформульованих особливостей проведення процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії дозволить отримати максимальну достовірність діагностування, але вимагає великого часу для проведення процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії.

Це є наслідком протиріччя між високою достовірністю процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії та його високою швидкістю.

Виконаємо більш детальний аналіз сформульованих особливостей процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії з метою визначення оптимального співвідношення між достовірністю та швидкістю процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії.

Особливість багаточастотного процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії полягає у тому, що чим більше частот використовуються в процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії, тим достовірність процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії вища.

В наслідок збільшення кількості частот буде збільшуватися час процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії, але цей час є обмежений.

Широкий частотний діапазон процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії від 1мГц до 1кГц потребує розв'язання задачі формування множини частот.

У випадку, коли задано кількість частот діагностування N у діапазоні частот від f_{min} до f_{max} із рівномірним законом розподілу частот у цьому діапазоні, тоді необхідно застосовувати логарифмічний закон розподілу множини частот.

У відповідності із логарифмічний закон розподілу множини частот i -та частота визначається у відповідності до виразу

$$f_i = f_{min} \cdot 10^{\frac{\lg\left(\frac{f_{max}}{f_{min}}\right)}{N} \cdot i}, \quad (3.18)$$

де $i = 0 \dots N$.

Значний вплив на достовірність і час процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії має особливість проведення багатонапругового процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії.

Характерною рисою цієї особливості процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії є те, що вона вимагає виконання багаточастотного процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії для різних значень зарядної напруги накопичувачів електроенергії.

Складність дотримання цієї особливості процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії полягає у наступному.

1. Коли завершиться багаточастотний процес діагностування стану накопичувачів електроенергії на одній напрузі заряду накопичувачів електроенергії, необхідно здійснити процес діагностування стану накопичувачів електроенергії на другій зарядній напрузі, а далі на третій і т.д.

2. Для виконання цієї умови накопичувач електроенергії потрібно заряджати або розряджувати до нової напруги на його виводах.

3. Далі необхідно дотримуватись принципу стаціонарності режиму процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії. А це можна виконати тільки в усталеному режимі. Усталений режим настане, коли закінчиться перехідний процес, який обумовлений процесом перерозподілу носіїв заряду в накопичувачі електроенергії.

Сучасні накопичувачі електроенергії характеризуються великими ємностями, тому перехідний процес складає години і більше. Велика тривалість пререхідного процесу значно збільшує час проведення процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії для одного зразка.

Висновки до третього розділу

1. В основі математичної моделі процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії на постійному струмі лежить процес розряду накопичувача електроенергії постійним струмом, постійною напругою або постійною потужністю.

2. В усіх трьох режимах діагностування стану накопичувачів електроенергії визначаються два основних параметра накопичувачів електроенергії: ємність накопичувача електроенергії та активний опір накопичувача електроенергії.

3. Гальваностатичний режим діагностування стану накопичувачів електроенергії на постійному струмі з відключенням струму при досягненні кінцевих заданих значень напруги призначений для отримання даних про саморозряд накопичувачів електроенергії.

4. Процес діагностування стану накопичувачів електроенергії суттєво відрізняється від процесу діагностування стану конденсаторів, тому для підвищення достовірності діагностування стану накопичувачів електроенергії

необхідно враховувати вплив частотної дисперсії параметрів накопичувачів електроенергії, їх нелінійність та перехідні процеси.

4. Прилади і програмне забезпечення для удосконаленого методу діагностування стану накопичувачів електроенергії

4.1. Прилад для удосконаленого методу діагностування стану накопичувачів електроенергії на змінному струмі

Прилад для удосконаленого методу діагностування стану накопичувачів електроенергії на змінному струмі дозволяє вимірювати комплексний опір накопичувачів електроенергії у діапазоні частот від $f_{min} = 1$ мГц до $f_{max} = 1$ кГц із логарифмічним розподілом частот.

На основі отриманих значень комплексного накопичувачів електроенергії на змінному струмі, прилад визначає значення ємності в діапазоні від 0,1 Агод до 1000 Агод. Прилад також визначає значення комплексного опору накопичувачів електроенергії на змінному струмі від 0,1 мОм до 100 кОм.

В основу роботи приладу для удосконаленого методу діагностування стану накопичувачів електроенергії на змінному струмі покладено удосконалений метод діагностування стану накопичувачів електроенергії на змінному струмі. Фотографія приладу для удосконаленого методу діагностування стану накопичувачів електроенергії на змінному струмі зображена на рисунку 4.1.

Структурна схема приладу для удосконаленого методу діагностування стану накопичувачів електроенергії на змінному струмі складається із восьми діагностувальних каналів рисунок 4.2.

Конструктивно прилад для удосконаленого методу діагностування стану накопичувачів електроенергії на змінному струмі виготовлений у прямокутному корпусі.

До складу приладу для удосконаленого методу діагностування стану накопичувачів електроенергії на змінному струмі ходять 8-м діагностичних каналів. Кожний діагностичний канал реалізовано у вигляді окремої друкованої плати. Фотографія діагностичного каналу показана на рисунку 4.3.



Рисунок 4.1 – Прилад для удосконаленого методу діагностування стану накопичувачів електроенергії на змінному струмі

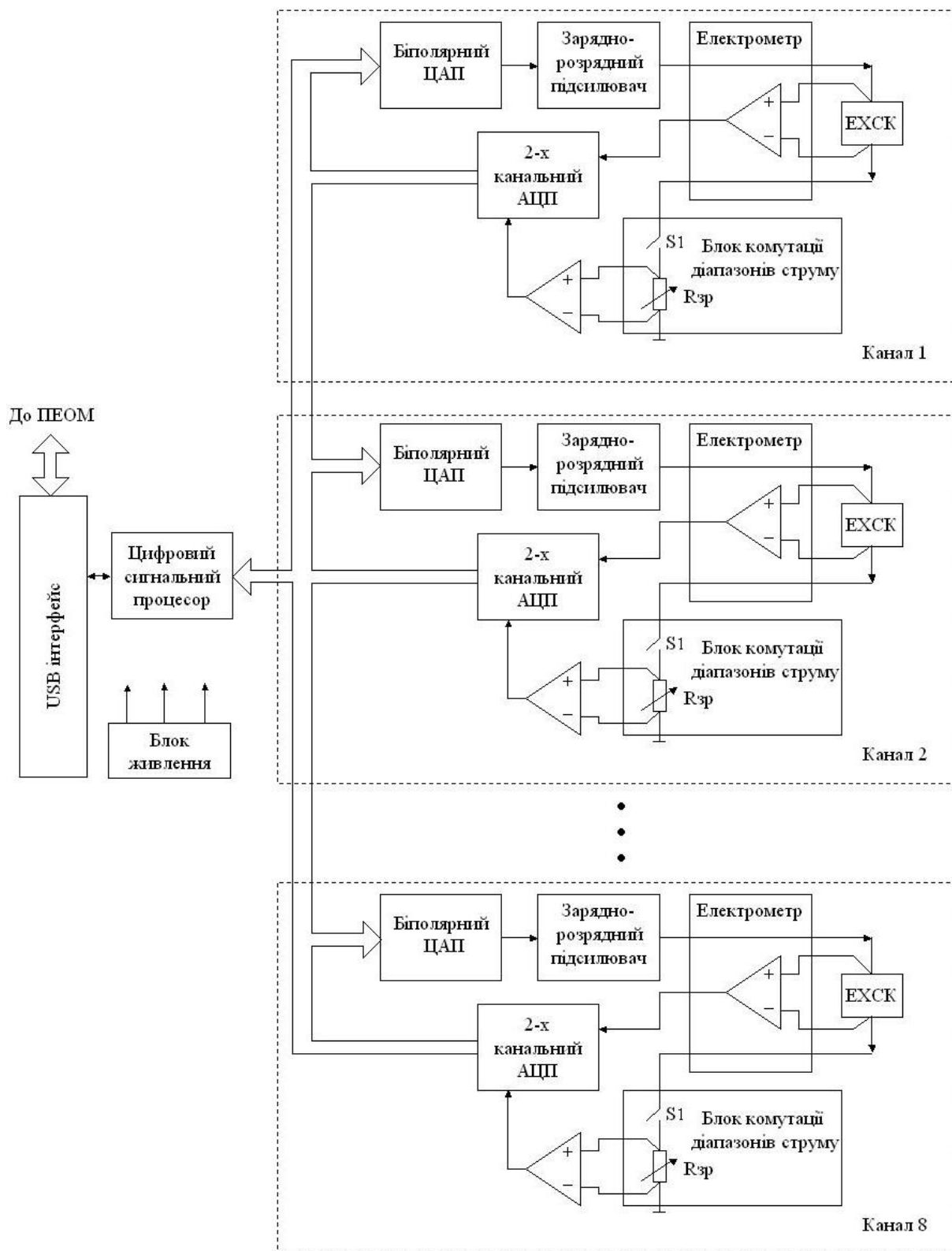


Рисунок 4.2 – Структурна схема приладу для удосконаленого методу діагностування стану накопичувачів електроенергії на змінному струмі

Керування приладом для удосконаленого методу діагностування стану накопичувачів електроенергії на змінному струмі здійснюється за допомогою

сигнального процесора типу TMS320VC5509A, виробник – американська компанія Texas Instruments. Сигнальний процесор розміщений на окремій платі керування. На платі керування приладу для удосконаленого методу діагностування стану накопичувачів електроенергії на змінному струмі розміщений також USB порт. Фотографія плати керування приладу для удосконаленого методу діагностування стану накопичувачів електроенергії на змінному струмі зображена на рисунку 4.4.

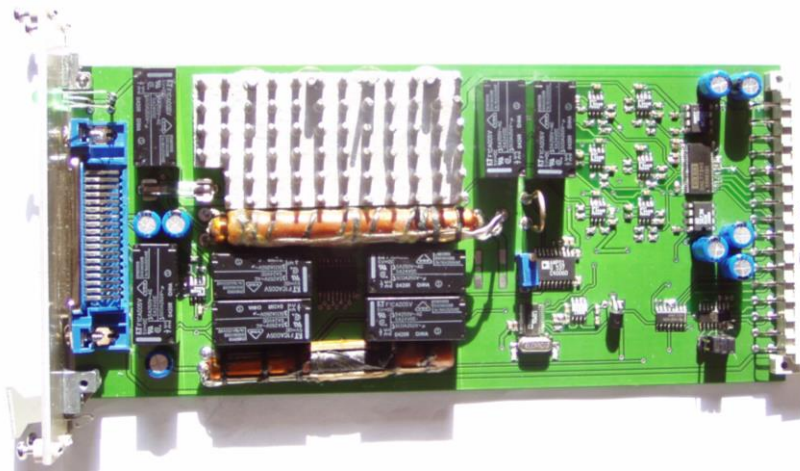


Рисунок 4.3 – Плата вимірювального каналу приладу для удосконаленого методу діагностування стану накопичувачів електроенергії на змінному струмі

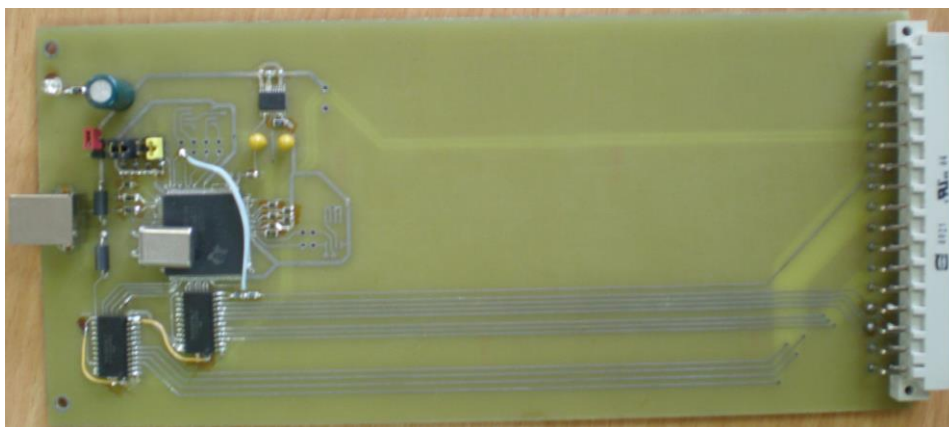


Рисунок 4.4 – Плата керування приладу для удосконаленого методу діагностування стану накопичувачів електроенергії на змінному струмі

Узгодження низького внутрішнього опору накопичувачів електроенергії із високим входним опором 2-х каналного АЦП використовується плата

узгодження опору. Плата узгодження опору побудована у вигляді повторювача напруги накопичувачів електроенергії. Фотографія плати узгодження опору показана на рисунку 4.5.

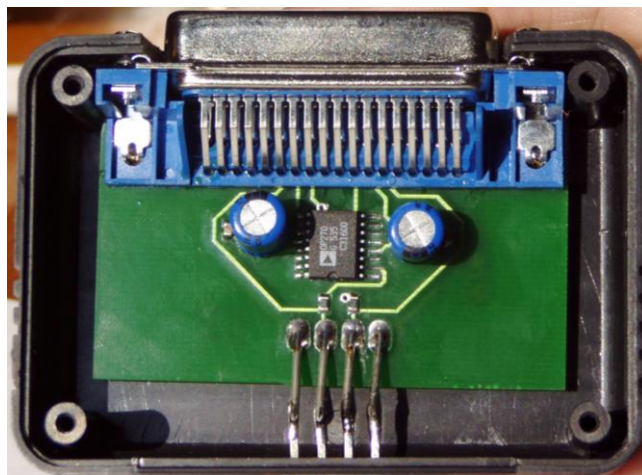


Рисунок 4.5 – Плата узгодження опору приладу для удосконаленого методу діагностування стану накопичувачів електроенергії на змінному струмі

4.2 Програмне забезпечення для удосконаленого методу діагностування стану накопичувачів електроенергії

Програмне забезпечення приладу для удосконаленого методу діагностування стану накопичувачів електроенергії на змінному струмі складається із трьох програм. Перша програма призначена для сигнального процесора. Ця програма виконується сигнальним процесором, а блок схема алгоритму зображена на рисунку 4.6. Програма для сигнального процесора виконує обробку даних, які отримуються від діагностуючих каналів у режимі реального часу.

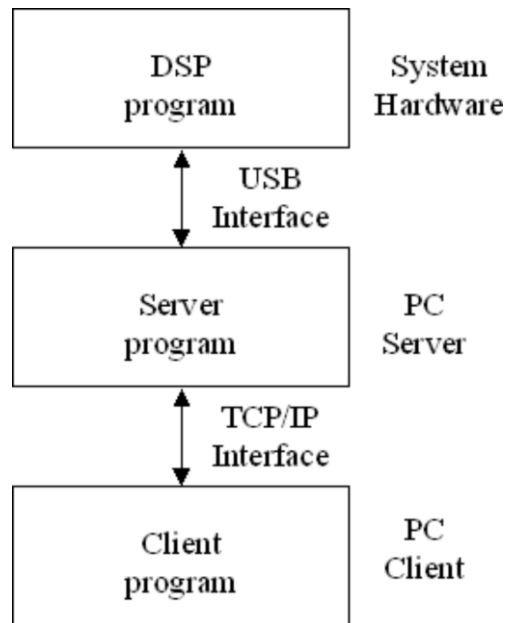


Рисунок 4.6 – Компоненти програмного забезпечення для удосконаленого методу діагностування стану накопичувачів електроенергії на змінному струмі

Друга програма виконує роль серверної програми. Ця програма дозволяє віддалене керування для багатьох користувачів через клієнтські програми, які здійснюють діагностування за допомогою незалежних каналів. Діагностуючі канали працюють незалежно і можуть керуватися за допомогою одного користувача.

Прилад для удосконаленого методу діагностування стану накопичувачів електроенергії на змінному струмі з'єднується із ПК за допомогою USB порту. Комп'ютери, де розташовані програми клієнтів, можуть знаходитися в різних кімнатах. Ці комп'ютери з'єднуються з комп'ютером, де встановлений сервер, через TCP/IP іпротокол, використовуючи мережу Інтернет. Користувацький інтерфейс для клієнтської програми зображено на рисунках 4.7 - 4.8.

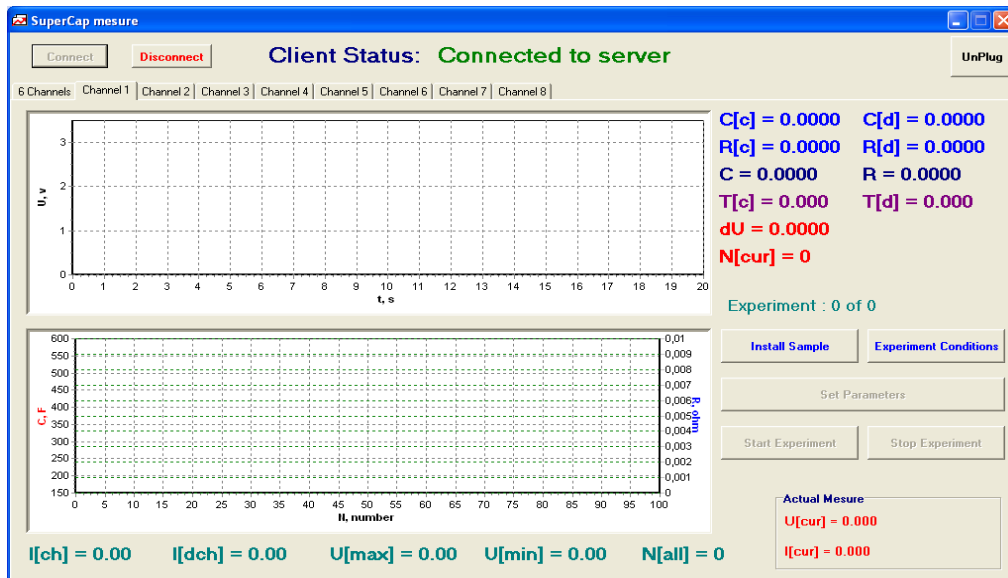


Рисунок 4.7 – Користувачський інтерфейс для клієнтської програми (показано лише один канал)

Прилад для удосконаленого методу діагностування стану накопичувачів електроенергії на змінному струмі може працювати або в повністю автоматичному або лише напівавтоматичному режимах. У повністю автоматичному режимі модуль діагностуючих параметрів накопичувачів електроенергії на змінному струмі виконує обробку даних без додаткових сигналів керування. Отримана в процесі роботи інформація зберігається на вінчестеру персонального комп'ютера в окремих файлах. Ці файли містять дані без додаткової обробки.

У напівавтоматичному режимі прилад для удосконаленого методу діагностування стану накопичувачів електроенергії на змінному струмі здійснює цифрову обробку інформації під керівництвом оператора. Оператор приладу для удосконаленого методу діагностування стану накопичувачів електроенергії на змінному струмі може запускати або зупиняти незалежний діагностуючий канал.

У напівавтоматичному режимі можна перейти до наступного етапу програмного алгоритму процесу діагностування, використовуючи ручний режим роботи. Діагностувальний незалежний канал, який було вибрано,

відображується окремо програмному вікні. Вигляд програмного вікна показано на рисунку 4.7. Усі діагностувальні незалежні канали відображуються у вікні одночасно. Вигляд усіх діагностувальних незалежних каналів показано на рисунку 4.8.

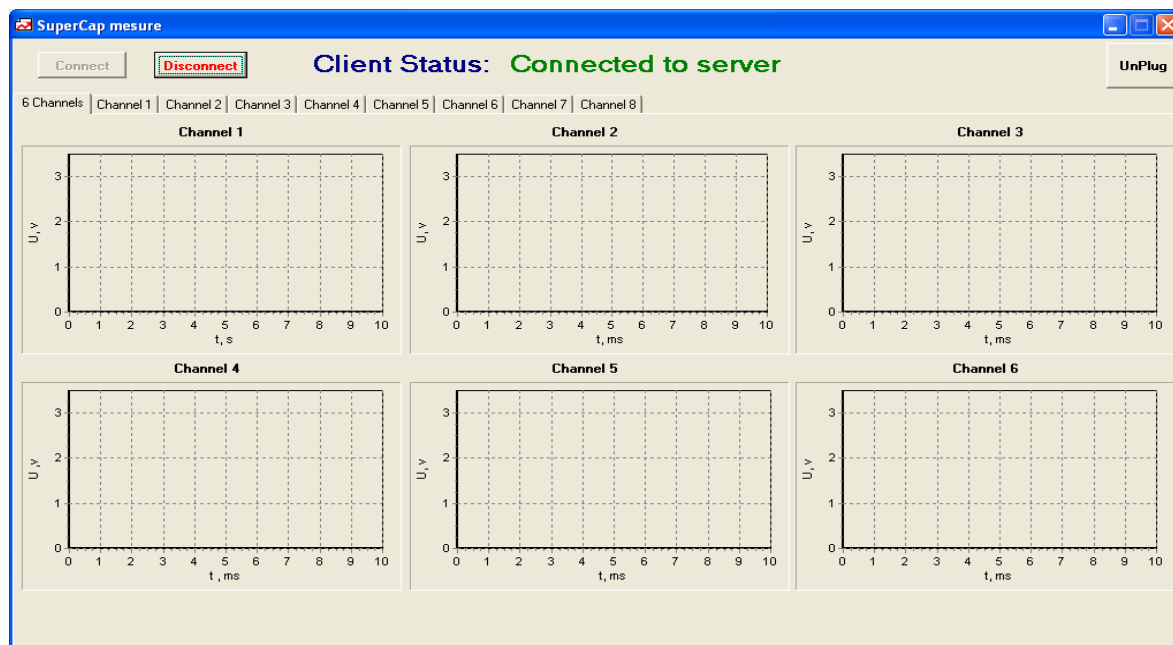


Рисунок 4.8 – Шість діагностувальних каналів, які відображуються одночасно

Блок схема алгоритму програми для виконання діагностування складається з наступних кроків. На першому кроці проводиться початкове встановлення процесора. Далі здійснюється визначення всіх параметрів системи. На цьому етапі здійснюється встановлення параметрів сигналу. Цей сигнал буде формуватися процесором.

Після цього буде здійснено вибір режиму роботи процесора. Під вибором режиму роботи процесора розуміють вибір діагностувального сигналу, який потрібно отримати. Також на цьому етапі здійснюється визначення імен для математичної моделі сигналу.

Далі відбувається запуск вибраного режиму роботи. Після запуску вибраного режиму роботи відбувається вихід з цього режиму. На наступному кроці здійснюється математична обробка для вибраних моделей сигналу, а також встановлюються їх параметри.

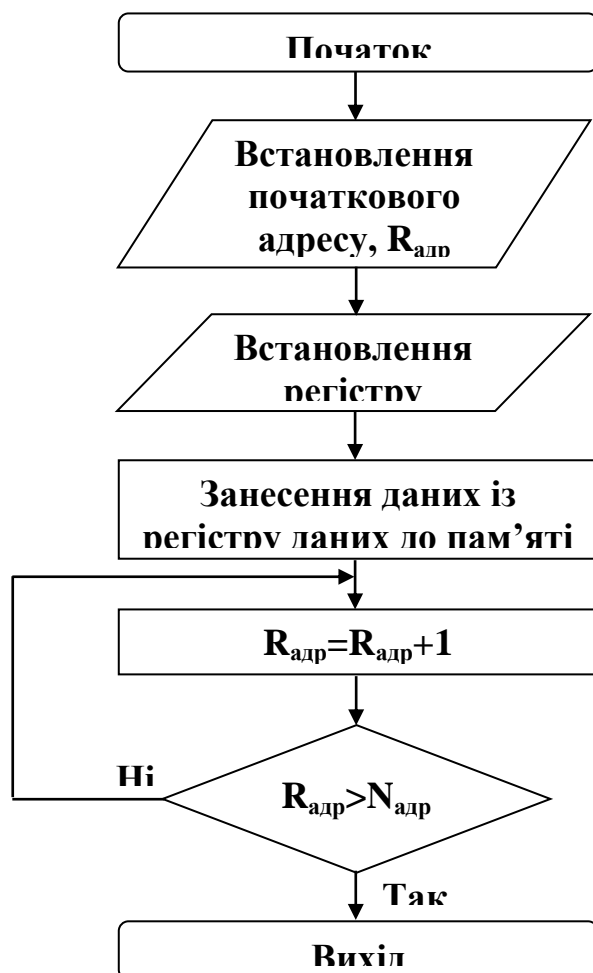


Рисунок 4.9 – Блок-схема виконання основного етапу програми

У відповідності до алгоритму роботи програми, під математичною обробкою моделі сигналу розуміють наступне.

1. На першому кроці вибирається із масиву даних сигнал з вибраними параметрами. Цей сигнал наперед записується у пам'ять даних, а сам сигнал знаходиться у визначеному файлі. В процесі діагностування масив даних має вигляд таблиці сигналів, яка записана у шістнадцятковій системі числення. Приклад виконання цієї операції показано на рисунку 4.9 у вигляді блок-схеми алгоритму роботи.

Аналізуючи рисунок 4.9, можна зробити висновок, що на початку виконується встановлення початкової адреси масиву даних і ця адреса записується в реєстр адрес. На наступному кроці відбувається встановлення реєстру даних. Викристовуючи цей реєстр даних, проводиться зчитування даних із масиву даних. Після цього, відбувається занесення масиву даних, які розміщені у реєстрі даних та перенесення їх до пам'яті даних.

На наступному кроці відбувається збільшення початкової адреси на одиницю. Іншими словами, відбувається зміщення починаючи від початкової адреси до наступної адреси в пам'яті комп'ютера. На наступному кроці перевіряється умова: у випадку, якщо номер першої адреси більший за номер кінцевої комірки, тоді здійснюється вихід і завершення цієї операції.

У випадку, якщо умова не виконується, тоді відбувається знову збільшення першої адреси комірки пам'яті на одиницю. Ця операція виконується для того, щоб записати масив даних сигналів у пам'ять даних сигнального процесора.

На наступному кроці сигнальний процесор зчитує дані із пам'яті даних процесора після математичної обробки сигналу. Для цього сигналу встановлено відповідні параметри, яким відповідає необхідна модель сигналу із пам'яті даних. На рисунку 4.10 наведено процес генерування сигналу, який зображено у вигляді блок-схеми.

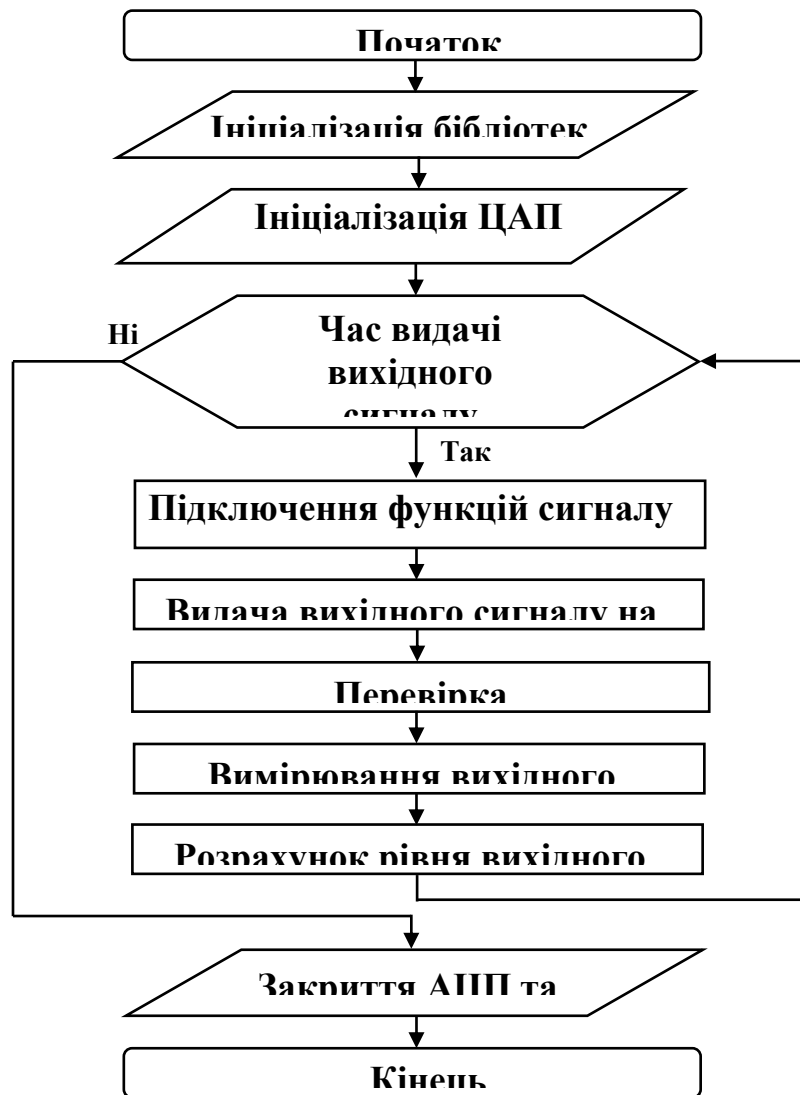


Рисунок 4.10 – Блок-схема алгоритму програми генерування діагностичного сигналу

На наступному кроці цифровий сигнал здійснює цифро-аналогове перетворення. На виході ЦАП сигнал підсилюється по амплітуді у відповідності до заданого рівня. Тоді на виході підсилювача отримуємо сигнал із заданими параметрами. Задані користувачем параметри сигналу записуються до математичної моделі, яка відповідає цьому сигналу.

Під математичною моделлю сигналу розуміють функцію, яка описує сигнал у заданому часовому діапазоні, а цьому сигналу відповідають задані

параметри. У відповідності до алгоритму роботи, вибрана функція визначає напругу діагностичного сигналу для кожного моменту часу.

Генерований сигнал є рівномірним та не містить змін у своїй формі. На наступному кроці можна створити програмний цикл, у якому сигнал буде постійно повторювати. Таке повторення буде відбуватися у встановленому проміжку часу.

Звідси можна зробити висновок, що сигнали, які були створені на певному проміжку часу, будуть записані у цифровій формі до масиву даних.

На наступному кроці, задаються параметри сигналу, а також задаються аргументи для математичної функції. Ця математична функція описує сигнал. Тому, кожному виду сигналу відповідають свої параметри.

Для усіх сигналів спільним параметром є амплітуда сигналу. Амплітуда діагностичного сигналу задається програмним чином. Це відбувається шляхом зміни коефіцієнтів підсилення для вибраного сигналу. Після цього сигнал поступає на вихід.

Висновки до четвертого розділу

1. Прилад для удосконаленого методу діагностування стану накопичувачів електроенергії на змінному струмі дозволяє вимірювати комплексний опір накопичувачів електроенергії у діапазоні частот від $f_{min} = 1$ мГц до $f_{max} = 1$ кГц із логарифмічним розподілом частот.

2. На основі отриманих значень комплексного накопичувачів електроенергії на змінному струмі, прилад визначає значення ємності в діапазоні від 0,1 Агод до 1000 Агод. Прилад також визначає значення комплексного опору накопичувачів електроенергії на змінному струмі від 0,1 мОм до 100 кОм.

3. Удосконалена структурна схема приладу для удосконаленого методу діагностування стану накопичувачів електроенергії на змінному струмі складається із восьми діагностувальних каналів.

4. Удосконалено програмне забезпечення приладу для удосконаленого методу діагностування стану накопичувачів електроенергії на змінному струмі складається із трьох програм. Перша програма призначена для сигнального процесора.

5. Друга програма виконує роль серверної програми. Ця програма дозволяє віддалене керування для багатьох користувачів через клієнтські програми, які здійснюють діагностування за допомогою незалежних каналів. Діагностуючі канали працюють незалежно і можуть керуватися за допомогою одного користувача.

6. Третя програма вибирає режим роботи приладу або в повністю автоматичному або лише напівавтоматичному режимах. У повністю автоматичному режимі модуль діагностуючих параметрів накопичувачів електроенергії на змінному струмі виконує обробку даних без додаткових сигналів керування. Отримана в процесі роботи інформація зберігається на вінчестеру персонального комп'ютера в окремих файлах. Ці файли містять дані без додаткової обробки.

ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано та досліджено еквівалентні схеми заміщення накопичувачів електроенергії та встановлено, що вони використовують прості компоненти електричних кіл, такі як резистори та конденсатори. Еквівалентні схеми заміщення накопичувачів електроенергії відображають співвідношення між вхідним струмом та вихідною напругою на виводах накопичувачів електроенергії.

2. Діагностування рівня заряду та рівня працездатності накопичувачів електроенергії можливе, якщо математично описати закони зміни параметрів елементів еквівалентної схеми заміщення накопичувачів електроенергії від їх рівня заряду та рівня працездатності. Для цього потрібно апроксимувати діаграму комплексного опору накопичувачів електроенергії виразом, що описує залежність їх комплексного опору від рівня заряду та рівня працездатності.

3. Встановлено, що при побудові стрисроїв діагностування стану накопичувачів електроенергії необхідно враховувати параметри, які відображують їх технічний стан. До номінальних показників технічного стану накопичувачів електроенергії відноситься їх ємність C та активний опір R .

4. Встановлено, що достовірність діагностування стану накопичувачів електроенергії можна підвищити, якщо використовувати їх частотні та часові характеристики. В процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії можна використовувати їх операторний опір $Z(p, u)$, який залежить від напруги на виводах накопичувачів електроенергії.

5 Доведено, що адекватність удосконаленої математичної моделі накопичувачів електроенергії підтверджується співпадінням експериментальних даних комплексного опору літій-іонного накопичувача електроенергії BionX ємністю 8,8 Агод і номінальною напругою 48 В із теоретичними даними, які отримані в результаті апроксимації експериментальних даних виразом нелінійного дробового комплексного опору.

6. Удосконалено метод діагностування стану накопичувачів електроенергії, який базується на багатопараметричному діагностуванні стану накопичувачів електроенергії і враховує вплив частотної дисперсії параметрів накопичувачів електроенергії, їх нелінійність та перехідні процеси, які виникають в процесі діагностування, що дозволяє підвищити достовірність діагностуванні стану накопичувачів електроенергії.

7. Удосконалена структурна схема приладу для удосконаленого методу діагностування стану накопичувачів електроенергії на змінному струмі складається із восьми діагностувальних каналів.

8. Удосконалено алгоритм програмного забезпечення для удосконаленого методу діагностування стану накопичувачів електроенергії на змінному струмі, яке складається із трьох програм: програми роботи сигнального процесора; серверної програми та клієнтської програми діагностування.

Перелік посилань

1. B. Bilgin, P. Magne, P. Malysz, Y. Yang, V. Pantelic, M. Preindl, A. Korobkine, W. Jiang, S. Member, M. Lawford, S. Member, and A. Emadi, "Making the Case for Electrified Transportation," *IEEE Trans. Transp. Electrif.*, vol. 1, no. 1, pp. 4–17, 2015.
2. S. M. Lukic and A. Emadi, "Charging ahead," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 2, no. 4, pp. 22–31, 2008.
- 3 J. Cao and A. Emadi, "Batteries need electronics," *Ind. Electron. Mag. IEEE*, vol. 5, no. 1, pp. 27–35, 2011.
- 4 A. Emadi, "Transportation 2.0," *Power Energy Mag. IEEE*, vol. 9, no. 4, pp. 18–29, 2011.
- 5 "Navigant Research." [Online]. Available: <https://www.navigantresearch.com/>.
- 6 D. Fregosi, S. Bhattacharya, and S. Atcitty, "Empirical battery model characterizing a utility-scale carbon-enhanced VRLA battery," 2011 *IEEE Energy Convers. Congr. Expo.*, pp. 3541–3548, 2011.
- 7 X. Hu, S. Li, and H. Peng, "A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries," *J. Power Sources*, vol. 198, pp. 359–367, 2012.
- 8 K. a. Smith, C. D. Rahn, and C. Y. Wang, "Model-based electrochemical estimation of lithium-ion batteries," *Proc. IEEE Int. Conf. Control Appl.*, no. 1, pp. 714–719, 2008.
9. R. Ahmed, M. El Sayed, I. Arasaratnam, J. Tjong, and S. Habibi, "Reduced-Order Electrochemical Model Parameters Identification and SOC Estimation for Healthy and Aged Li-Ion Batteries. Part I: Parameterization Model Development for Healthy Batteryies," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 2, no. 3, pp. 659–677, 2014.
10. C. Speltino, "Experimental validation of a lithium-ion battery state of charge estimation with an extended kalman filter," *Control Conf. (ECC)*, 2009 *Eur. Budapest*, pp. 4828–4833, 2009.
11. C. Speltino, D. Di Domenico, G. Fiengo, and a. Stefanopoulou, "Comparison of

- reduced order lithium-ion battery models for control applications,” Proc. 48th IEEE Conf. Decis. Control held jointly with 2009 28th Chinese Control Conf., pp. 3276–3281, 2009.
12. R. Gu, P. Malysz, H. Yang, and A. Emadi, “On the Suitability of Electrochemical-Based Modeling for Lithium-ion Batteries,” IEEE Trans. Transp. Electrification, vol. 7782, no. c, pp. 1–1, 2016.
 13. M. Chen and G. a. Rincón-Mora, “Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance,” IEEE Trans. Energy Convers., vol. 21, no. 2, pp. 504–511, 2006.
 14. R. Xiong, H. He, H. Guo, and Y. Ding, “Modeling for lithium-ion battery used in electric vehicles,” Procedia Eng., vol. 15, no. 1, pp. 2869–2874, 2011.
 15. P. Malysz, L. Gauchia, and H. Yang, “Fundamentals of Electric Energy Storage Systems,” Adv. Electr. Drive Veh., pp. 237–281, 2014.
 16. B. Y. Liaw, G. Nagasubramanian, R. G. Jungst, and D. H. Doughty, “Modeling of lithium ion cells - A simple equivalent-circuit model approach,” Solid State Ionics, vol. 175, no. 1–4, pp. 835–839, 2004.
 17. N. Lin, S. Ci, and H. Li, “An enhanced circuit-based battery model with considerations of temperature effect,” 2014 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2014, pp. 3985–3989, 2014.
 18. G. Liu, L. Lu, H. Fu, J. Hua, J. Li, M. Ouyang, and Y. Wang, “A comparative study of equivalent circuit models and enhanced equivalent circuit models of lithium-ion batteries with different model structures,” pp. 1–6, 2014.
 19. M. Bahramipour, D. Torregrossa, R. Cherkaoui, and M. Paolone, “Enhanced electrical model of Lithium-based batteries accounting the charge redistribution effect,” Proc. -2014 Power Syst. Comput. Conf. PSCC 2014, 2014.
 20. M. a. Roscher, O. Bohlen, and J. Vetter, “OCV Hysteresis in Li-Ion Batteries including Two-Phase Transition Materials,” Int. J. Electrochem., vol. 2011, pp. 1–6, 2011.
 21. H. Rahimi Eichi and M. Y. Chow, “Modeling and analysis of battery hysteresis effects,” 2012 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2012, pp. 4479–4486,

2012.

22. B. Pattipati, C. Sankavaram, and K. R. Pattipati, "System identification and estimation framework for pivotal automotive battery management system characteristics," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part C Appl. Rev.*, vol. 41, no. 6, pp. 869–884, 2011.
23. H. He, X. Zhang, R. Xiong, Y. Xu, and H. Guo, "Online model-based estimation of state-of-charge and open-circuit voltage of lithium-ion batteries in electric vehicles," *Energy*, vol. 39, no. 1, pp. 310–318, 2012.
24. K. S. Ng, C. S. Moo, Y. P. Chen, and Y. C. Hsieh, "Enhanced coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries," *Appl. Energy*, vol. 86, no. 9, pp. 1506–1511, 2009.
25. W. Waag, C. Fleischer, and D. U. Sauer, "Critical review of the methods for monitoring of lithium-ion batteries in electric and hybrid vehicles," *J. Power Sources*, vol. 258, pp. 321–339, 2014.
26. S. Lee, J. Kim, J. Lee, and B. H. Cho, "State-of-charge and capacity estimation of lithiumion battery using a new open-circuit voltage versus state-of-charge," *J. Power Sources*, vol. 185, pp. 1367–1373, 2008.
27. L. W. Juang, "Online Battery Monitoring for State-of-Charge and Power Capability Prediction by University of Wisconsin – Madison O nline Battery Monitoring for State-ofCharge and Power Capability Prediction by," 2010.
- 28 I. Kim, "Nonlinear State of Charge Estimator for Hybrid Electric Vehicle Battery," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, no. 4, pp. 2027–2034, 2008.
28. G. L. Plett, "Sigma-point Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs. Part 2: Simultaneous state and parameter estimation," *J. Power Sources*, vol. 161, no. 2, pp. 1369–1384, 2006.
29. I. Arasaratnam and S. Haykin, "Cubature kalman filters," *Autom. Control. IEEE Trans.* no. 7, pp. 1–16, 2009.
30. D. Sun and X. Chen, "Adaptive parameter identification method and state of charge estimation of Lithium Ion battery," *Electr. Mach. Syst. (ICEMS)*, 2014 17th Int. Conf., pp. 855–860, 2014.

31. S. Habibi, "The smooth variable structure filter," *Proc. IEEE*, vol. 95, no. 5, pp. 1026–1059, 2007.
32. D. Di Domenico, G. Fiengo, and A. Stefanopoulou, "Lithium-ion battery state of charge estimation with a Kalman Filter based on a electrochemical model," *Control Appl. 2008. CCA 2008. IEEE Int. Conf.*, pp. 702–707, 2008.
33. A. Hammouche, E. Karden, and R. W. De Doncker, "Monitoring state-of-charge of Ni–MH and Ni–Cd batteries using impedance spectroscopy," *J. Power Sources*, vol. 127, no. 1–2, pp. 105–111, Mar. 2004.
34. W. Choi and J. Lee, "Development of the low-cost impedance spectroscopy system for modeling the electrochemical power sources," in *7th International Conference on Power Electronics, ICPE'07*, 2008, pp. 113–118.
35. J. Lee and W. Choi, "Novel State-of-Charge Estimation Method for Lithium Polymer Batteries Using Electrochemical Impedance Spectroscopy," *J. Power Electron.*, pp. 237–243, 2011.
36. G. L. Plett, "Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs. Part 2: Modeling and identification," *J. Power Sources*, vol. 134, pp. 262–276, 2004.
37. G. Plett, "Dual and Joint EKF for Simultaneous SOC and SOH Estimation," *Proc. 21st Electr. Veh. Symp. (EVS21)*, Monaco, pp. 1–12, 2005.
38. C. Hu, B. D. Youn, and J. Chung, "A multiscale framework with extended Kalman filter for lithium-ion battery SOC and capacity estimation," *Appl. Energy*, vol. 92, pp. 694–704, 2012.
39. P. Malysz, R. Gu, J. Ye, H. Yang, and A. Emadi, "State-of-charge and state-of-health estimation with state constraints and current sensor bias correction for electrified powertrain vehicle batteries," *IET Electr. Syst. Transp.*, vol. 6 (2), pp. 136–144, 2016.
40. J. Vetter, P. Novák, M. R. Wagner, C. Veit, K. C. Möller, J. O. Besenhard, M. Winter, M. Wohlfahrt-Mehrens, C. Vogler, and a. Hammouche, "Ageing mechanisms in lithium-ion batteries," *J. Power Sources*, vol. 147, pp. 269–281, 2005.
41. J. P. Christophersen, J. Morrison, W. Morrison, and C. Motloch, "Rapid

Impedance Spectrum Measurements for State-of-Health Assessment of Energy Storage Devices,” pp. 246–256, 2012.

42. W. Waag, S. Käbitz, and D. U. Sauer, “Experimental investigation of the lithium-ion battery impedance characteristic at various conditions and aging states and its influence on the application,” *Appl. Energy*, vol. 102, pp. 885–897, 2013.

44. D. V. Do, C. Forgez, K. El Kadri Benkara, and G. Friedrich, “Impedance observer for a Li-ion battery using Kalman filter,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 8, pp. 3930–3937, 2009.

45. G. S. Popkirov and R. N. Schindler, “A new impedance spectrometer for the investigation of electrochemical systems,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 63, no. 11, pp. 5366–5372, 1992.

46. J. Schoukens, R. Pintelon, E. van der Ouderaa, and J. Renneboog, “Survey of excitation signals for FFT based signal analyzers,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 37, no. 3, pp. 342–352, 1988.

47. E. Barsoukov and J. R. Macdonald, *Impedance Spectroscopy*. 2005.

48. H. Zhang and M. Y. Chow, “Comprehensive dynamic battery modeling for PHEV applications,” 2010 IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet., pp. 1–6, 2010.

49. D. I. Stroe, M. Swierczynski, A. I. Stan, V. Knap, R. Teodorescu, and S. J. Andreasen, “Diagnosis of Lithium-Ion Batteries State-of-Health based on Electrochemical Impedance Spectroscopy Technique,” pp. 4576–4582, 2014.

50. H. Wang, G. Li, Z. Yu, and X. Wang, “Study on Genetic Algorithm in Estimating the Initial Value of EIS Equivalent Circuit,” 2009 WRI World Congr. Softw. Eng., pp. 507–510, 2009.

51. P. a Lindahl, M. a Cornachione, and S. R. Shaw, “A Time-Domain Least Squares Approach to Electrochemical Impedance Spectroscopy,” *Ieee Trans. Instrum. Meas.*, vol. 61, no. 12, pp. 3303–3311, 2012.

52. H. Wang, K. Dong, G. Li, and F. Wu, “Research on the consistency of the power battery based on multi-points impedance spectrum,” 2010 Int. Forum Strateg. Technol. IFOST 2010, pp. 1–4, 2010.

53. P.-C. Wu, W.-C. Hsu, and J.-F. Chen, “Detection on SOC of VRLA battery with

EIS,” 2013 1st Int. Futur. Energy Electron. Conf., pp. 897–902, 2013.

54. Z. Chen, C. C. Mi, Y. Fu, J. Xu, and X. Gong, “Online battery state of health estimation based on Genetic Algorithm for electric and hybrid vehicle applications,” *J. Power Sources*, vol. 240, pp. 184–192, 2013.

Додаток А

Стаття у фаховому журналі

УДК 620.91

В.В. МАРТИНЮК, Г.І. РАДЕЛЬЧУК, А.С. КАШТАЛЬЯН, Р.В. ТИМОЩУК
Хмельницький національний університет

ПІДВИЩЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ АВТОМАТИЗОВАНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ СТАНУ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

У роботі запропонована автоматизована система діагностування стану накопичувачів електроенергії. Запропоновано підвищити достовірність діагностування стану накопичувачів електроенергії шляхом використання частотних та часових характеристик накопичувачів електроенергії. Встановлено, що достовірність процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії буде максимальною, якщо математичні моделі перехідного опору та перехідної провідності накопичувачів електроенергії з високою описують їх виміряні характеристики перехідного опору та перехідної провідності.

Keywords: система діагностування стану накопичувачів електроенергії, частотні та часові характеристики, достовірність процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії.

V.V. MARTYNYUK, G.I. RADELCHUK, R.V. TYMOSCHUK
Khmelnytsky national university

INCREASING THE RELIABILITY OF AUTOMATED DIAGNOSIS OF ELECTRICITY ACCUMULATORS

An automated system for diagnosing the state of electricity storage devices is proposed in the work. It is proposed to increase the reliability of diagnosing the state of electricity storage devices by using the frequency and time characteristics of electricity storage devices. It is established that the reliability of the process of diagnosing the state of electricity storage will be maximum if the mathematical models of transient resistance and transient conductivity of high energy storage describe their measured characteristics of transient resistance and transient conductivity.

Keywords: system for diagnosing the state of electric storage, frequency and time characteristics, the reliability of the process of diagnosing the state of electric storage.

1. Вступ

Серед усіх вторинних джерел енергії, доступних для електромобілів (ЕМ), гібридних електричних транспортних засобів (ГЕТЗ) та для портативних електронних пристроїв, таких як смартфони та ноутбуки, використання літій-іонних (Li-ion) батарей є найбільш перспективним. Порівняно з іншими варіантами джерел енергії, літійові батареї мають деякі унікальні переваги [1] [2], наприклад ці батареї мають вищу питому енергію, мають мінімальний ефект пам'яті, забезпечують найкраще співвідношення енергії до ваги, а також мають низький саморозряд при простій [3].

Рівень працездатності (англ. *state of health* (SOH)) накопичувачів електроенергії останнім часом стає все більш важливим, тому що накопичувачі електроенергії із часом старіють, а їх параметри і характеристики погіршуються. Основними наслідками старіння накопичувачів електроенергії є зменшення з часом їх ємності та зростання їх внутрішнього опору.

Методи діагностування рівня заряду та рівня працездатності накопичувачів електроенергії є подібними. Різниця між діагностуванням рівня заряду та діагностуванням рівня працездатності накопичувачів електроенергії полягає в тому, що при зменшенні рівня заряду необхідно швидко реагувати і здійснювати заряджування накопичувача електроенергії.

Натомість процес старіння (деградації) накопичувачів є більш повільним, але незворотнім. Швидкість старіння (деградації) накопичувачів електроенергії залежить від різних факторів, таких як умови експлуатації, режими заряджування та розряджування, а також якості накопичувачів електроенергії.

В процесі діагностування рівня працездатності накопичувачів електроенергії проводяться вимірювання ємності та активного опору втрат накопичувачів електроенергії. При побудові системи діагностування стану накопичувачів електроенергії необхідно враховувати параметри, які відображують їх технічний стан. До номінальних показників технічного стану накопичувачів електроенергії відноситься їх ємність C та активний опір R .

2. Загальна структурна схема автоматизованої системи діагностування стану накопичувачів електроенергії

В процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії необхідно враховувати частотної дисперсію та не лінійність їх ємності $C(\omega, u)$ та активного опору $R(\omega, u)$. Загальна структурна схема системи діагностування стану накопичувачів електроенергії зображена на рисунку 1.

В процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії блок генерування вимірювальних сигналів подає на накопичувач електроенергії вимірювальну напругу $u_B(t)$ або вимірювальний струм $i_B(t)$. Оточуюче середовище впливає на накопичувач електроенергії через зовнішні впливи $\{V(t)\}$.

Блок вимірювання діагностичних параметрів вимірює параметри накопичувача електроенергії ємності $c(\omega, u)$ та активного опору $r(\omega, u)$ відповідно. Блок вимірювання зовнішніх впливів, які діють на накопичувача електроенергії, вимірює множину зовнішніх впливів $\{v(t)\}$.

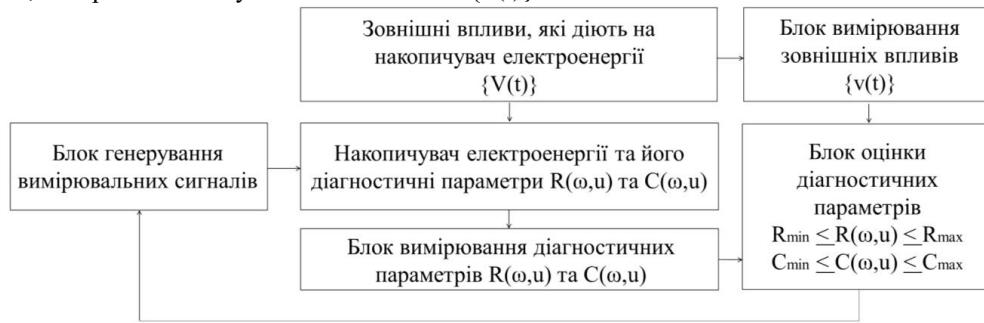


Рисунок 1 – Загальна структурна схема автоматизованої системи діагностування стану накопичувачів електроенергії

Виміряні діагностичні параметри накопичувача електроенергії $c(\omega, u)$ та $r(\omega, u)$ та множина зовнішніх впливів $\{v(t)\}$ поступають на блок оцінки діагностичних параметрів, який визначає оцінку Q (накопичувач електроенергії є справним або несправним). Процес діагностування стану накопичувачів електроенергії може відбуватись у стаціонарному режимі діагностування або у нестаціонарному режимі діагностування накопичувачів електроенергії.

Найпростіша математична модель процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії у стаціонарному режимі діагностування побудована на вимірюванні ємності C та активного опору R накопичувача електроенергії один лише раз.

В процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії отримуємо вимірюванні ємності c та активного опору r .

В основі найпростішої математичної моделі процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії лежить дві гіпотези.

1. Першою гіпотезою H_0 є гіпотеза, що в процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії виявили його працездатний стан.

$$H_0: c \in [C_H, C_B] \cap r \in [R_H, R_B], \quad (1)$$

де C_H, C_B та R_H, R_B – нижня і верхня межі ємності та активного опору відповідно c і r .

2. Другою гіпотезою H_1 є гіпотеза, що в процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії виявили його непрацездатний стан.

$$H_1: c \notin [C_H, C_B] \cap r \notin [R_H, R_B]. \quad (2)$$

Достовірність процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії дорівнює добутку методичної достовірності процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії на інструментальну достовірність процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії.

Методична достовірність процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії дорівнює відношенню кількості показників технічного стану, які визначаються в процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії до загальної кількості показників діагностування стану накопичувачів електроенергії.

На основі аналізу найпростішої математичної моделі процесу діагностування технічного стану накопичувачів електроенергії у стаціонарному режимі можна зробити висновок, що вимірювання ємності C та активного опору R накопичувача електроенергії здійснюється один лише раз.

Тому найпростішої математичної моделі процесу діагностування технічного стану накопичувачів електроенергії характеризується низькою методичною достовірністю діагностування. Низька методична достовірністю діагностування технічного стану накопичувачів електроенергії пояснюється зміною ємності $C \neq \text{const}$ та активного опору $R \neq \text{const}$ в процесі експлуатації накопичувачів електроенергії.

Для найпростішої математичної моделі процесу діагностування технічного стану накопичувачів електроенергії у стаціонарному режимі діагностування кількість показників довівною $N_1=2$ (ємність та активний опір).

В процесі експлуатації накопичувачів електроенергії частотна дисперсія та нелінійність ємності $C(\omega, u)$ та активного опору $R(\omega, u)$ накопичувачів електроенергії є аналогічним великій кількості параметрів, які характеризують технічний стан накопичувачів електроенергії.

В процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії отримуємо $N \neq N_1$ і $N \gg N_1$, тому методична достовірність діагностування стану накопичувачів електроенергії для найпростішої моделі діагностування стану накопичувачів електроенергії у стаціонарному режимі буде набагато меншою ніж одиниця.

$$D_M = \frac{2}{N} \ll 1. \quad (3)$$

До складу інструментальної достовірності діагностування стану накопичувачів електроенергії у стаціонарному режимі входить ймовірність помилки першого α , а також ймовірність помилки другого роду β . Вирази для визначення ймовірності помилки першого α та ймовірності помилки другого роду β описуються рівняннями (4) та (5). Необхідно відмітити, що ймовірності помилки першого α та ймовірності помилки другого роду β потрібно розраховувати для ємності C та активного опору R накопичувачів електроенергії.

$$\alpha_c = \int_{C_H}^{C_B} f(c) \left(\int_{-\infty}^{C_H-c} f(\delta_c) d\delta_c \right) dc + \int_{C_H}^{C_B} f(c) \left(\int_{C_B-c}^{\infty} f(\delta_c) d\delta_c \right) dc ; \quad (4)$$

$$\beta_c = \int_{-\infty}^{C_H} f(c) \left(\int_{C_H-c}^{C_B-c} f(\delta_c) d\delta_c \right) dc + \int_{C_B}^{\infty} f(c) \left(\int_{C_H-c}^{C_B-c} f(\delta_c) d\delta_c \right) dc , \quad (5)$$

де C_B, C_H – верхня та нижня межі для ємності C накопичувачів електроенергії;

$f(c)$ – вираз щільності ймовірності для ємності C накопичувачів електроенергії;

$f(\delta_c)$ – вираз щільності ймовірності похибки вимірювання ємності C накопичувачів електроенергії.

Вирази для визначення ймовірності помилки першого α та ймовірності помилки другого роду β активного опору R накопичувачів електроенергії описуються рівняннями (6) та (7) відповідно.

$$\alpha_r = \int_{R_H}^{R_B} f(r) \left(\int_{-\infty}^{R_H-r} f(\delta_r) d\delta_r \right) dr + \int_{R_H}^{R_B} f(r) \left(\int_{R_B-r}^{\infty} f(\delta_r) d\delta_r \right) dr ; \quad (6)$$

$$\beta_r = \int_{-\infty}^{R_H} f(r) \left(\int_{R_H-r}^{R_B-r} f(\delta_r) d\delta_r \right) dr + \int_{R_B}^{\infty} f(r) \left(\int_{R_H-r}^{R_B-r} f(\delta_r) d\delta_r \right) dr , \quad (7)$$

де R_B, R_H – верхня та нижня межі для активного опору R накопичувачів електроенергії;

$f(r)$ – вираз щільності ймовірності для активного опору R накопичувачів електроенергії;

$f(\delta_r)$ – вираз щільності ймовірності похибки вимірювання активного опору R накопичувачів електроенергії.

В процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії отримуємо вираз загальної достовірності діагностування стану накопичувачів електроенергії у стаціонарному режимі, який записується у вигляді (8)

$$D_3 = D_M \cdot D_I = \frac{2}{N} \cdot (1 - \alpha - \beta) \ll 1. \quad (8)$$

В процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії оцінку якості діагностування стану накопичувачів електроенергії у стаціонарному режимі визначимо, використовуючи вираз середнього ризику діагностування стану накопичувачів електроенергії, який записується у вигляді (2.9).

$$\Psi \approx W_{1c} \alpha_c + W_{2c} \beta_c + W_{1r} \alpha_r + W_{2r} \beta_r , \quad (9)$$

де W_{1c} , та W_{1r} – коефіцієнти втрат, що виникають в процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії та обумовлені помилками 1-го роду для ємності C та активного опору R накопичувачів електроенергії;

W_{2c} , та W_{2r} – коефіцієнти втрат, що виникають в процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії та обумовлені помилками 2-го роду для ємності C та активного опору R накопичувачів електроенергії;

α_c , та α_r – вирази імовірностей помилок 1-го роду для ємності C та активного опору R накопичувачів електроенергії;

β_c , та β_r – вирази імовірностей помилок 2-го роду для ємності C та активного опору R накопичувачів електроенергії;

Достовірність діагностування стану накопичувачів електроенергії можна підвищити, якщо використовувати їх частотні та часові характеристики.

3. Програмне забезпечення автоматизованої системи діагностування стану накопичувачів електроенергії

Програмне забезпечення автоматизованої системи діагностування стану накопичувачів електроенергії складається із трьох програм. Перша програма призначена для сигнального процесора. Структура програмного забезпечення автоматизованої системи діагностування стану накопичувачів електроенергії зображена на рисунку 2. Програма для сигнального процесора виконує обробку даних, які отримуються від діагностуючих каналів у режимі реального часу.

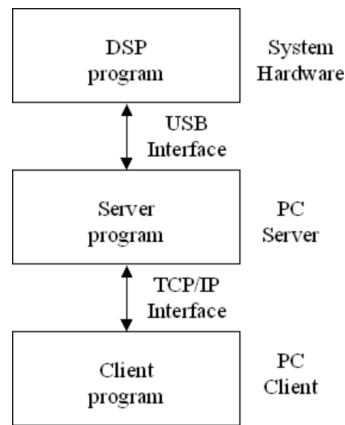


Рисунок 2 – Структура програмного забезпечення автоматизованої системи діагностування стану накопичувачів електроенергії

Друга програма виконує роль серверної програми. Ця програма дозволяє віддалене керування для багатьох користувачів через клієнтські програми, які здійснюють діагностування за допомогою незалежних каналів. Діагностуючі канали працюють незалежно і можуть керуватися за допомогою одного користувача.

Третя програма виконує роль клієнтської програми. Діагностування стану накопичувачів електроенергії виконується в автоматичному або в напівавтоматичному режимах. В автоматичному режимі модуль діагностуючих параметрів накопичувачів електроенергії виконує обробку даних без додаткових сигналів керування.

У напівавтоматичному режимі діагностування стану накопичувачів електроенергії програма здійснює цифрову обробку інформації під керівництвом оператора. Оператор системи може запускати або зупиняти незалежний діагностуючий канал.

У напівавтоматичному режимі можна перейти до наступного кроку програмного алгоритму процесу діагностування, використовуючи ручний режим роботи.

4. Висновки

В роботі запропоновано загальну структурну схему автоматизованої системи діагностування стану накопичувачів електроенергії, характеризується наступними перевагами:

- а) в процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії проводяться вимірювання ємності та активного опору втрат накопичувачів електроенергії;
- б) діагностування стану накопичувачів електроенергії виконується в автоматичному або у напівавтоматичному режимах;
- в) у автоматичному режимі модуль діагностуючих параметрів накопичувачів електроенергії виконує обробку даних без додаткових сигналів керування;
- г) у напівавтоматичному режимі діагностування стану накопичувачів електроенергії програма здійснює цифрову обробку інформації під керівництвом оператора.

Література

1. B. Bilgin, P. Magne, P. Malysz, Y. Yang, V. Pantelic, M. Preindl, A. Korobkine, W. Jiang, S. Member, M. Lawford, S. Member, and A. Emadi, "Making the Case for Electrified Transportation," *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 1, no. 1, pp. 4–17, 2015.
2. S. M. Lukic and A. Emadi, "Charging ahead," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 2, no. 4, pp. 22–31, 2008.
3. J. Cao and A. Emadi, "Batteries need electronics," *Ind. Electron. Mag. IEEE*, vol. 5, no. 1, pp. 27–35, 2011.
4. A. Emadi, "Transportation 2.0," *Power Energy Mag. IEEE*, vol. 9, no. 4, pp. 18–29, 2011.
5. D. Fregosi, S. Bhattacharya, and S. Atcitty, "Empirical battery model characterizing a utility-scale carbon-enhanced VRLA battery," 2011 *IEEE Energy Convers. Congr. Expo.*, pp. 3541–3548, 2011.
6. X. Hu, S. Li, and H. Peng, "A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries," *J. Power Sources*, vol. 198, pp. 359–367, 2012.
7. R. Ahmed, M. El Sayed, I. Arasaratnam, J. Tjong, and S. Habibi, "Reduced-Order Electrochemical Model Parameters Identification and SOC Estimation for Healthy and Aged Li-Ion Batteries. Part I: Parameterization Model Development for Healthy Batteries," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 2, no. 3, pp. 659–677, 2014.
8. W. Waag, C. Fleischer, and D. U. Sauer, "Critical review of the methods for monitoring of lithium-ion batteries in electric and hybrid vehicles," *J. Power Sources*, vol. 258, pp. 321–339, 2014.

Додаток Б
Презентація

1

ДИПЛОМНА РОБОТА НА ТЕМУ:

Метод діагностування стану накопичувачів електроенергії

Виконав
ст. гр. ТРМ-19-2
Р.В. Тимошук

Науковий керівник
д.т.н., проф.
Мартинюк В. В.

Актуальність теми. Актуальність роботи обумовлена проблемою діагностування стану накопичувачів електроенергії. Реальна фізична модель накопичувачів електроенергії базується на диференціальних рівняннях з частковими похідними, які містять всю необхідну інформацію щодо хімічних процесів, які протікають у накопичувачах електроенергії. Ця електрохімічна модель базується на теорії концентрованого розчину. Однак ця електрохімічна модель занадто складна для використання у реальному часі. З цієї причини, скорочення моделі є варіантом подолання цієї проблеми.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення ефективності діагностування стану накопичувачів електроенергії.

Для досягнення цієї мети необхідно розв'язати такі завдання:

- розробити структурну схему пристрою діагностування стану накопичувачів електроенергії;
- розробити алгоритм роботи пристрою діагностування стану накопичувачів електроенергії;
- удосконалити метод діагностування стану накопичувачів електроенергії.

•**Об'єкт дослідження** – процес діагностування стану накопичувачів електроенергії.

•**Предмет дослідження** – метод та засіб підвищення достовірності діагностування стану накопичувачів електроенергії.

•**Методи досліджень.** При вирішенні поставлених завдань у роботі були використані методи фізики, електроніки та теорії електричних кіл, методи обчислювальної математики, а також методи алгоритмізації та програмування.

•**Наукова новизна одержаних результатів.** У результаті проведеного дослідження:

- 1. Удосконалено метод діагностування стану накопичувачів електроенергії, який базується на багатопараметричному діагностуванні стану накопичувачів електроенергії і враховує вплив частотної дисперсії параметрів накопичувачів електроенергії, їх нелінійність та перехідні процеси, які виникають в процесі діагностування, що дозволяє підвищити достовірність діагностуванні стану накопичувачів електроенергії..

•**Практичне значення.** Удосконалена структурна схема та алгоритм програмного забезпечення приладу діагностування стану накопичувачів електроенергії на змінному струмі. Прилад діагностування стану накопичувачів електроенергії складається із восьми діагностувальних каналів. Програмне забезпечення складається із трьох програм: програми роботи сигнального процесора, серверної програми та клієнтської програми діагностування.

Узагальнена структурна схема автономної сонячної електростанції

3

- Взаємозв'язок між входом і виходом накопичувачів електроенергії можна описати, використовуючи еквівалентну схему заміщення накопичувача електроенергії, яка складається з резисторів, конденсаторів та джерела напруги.

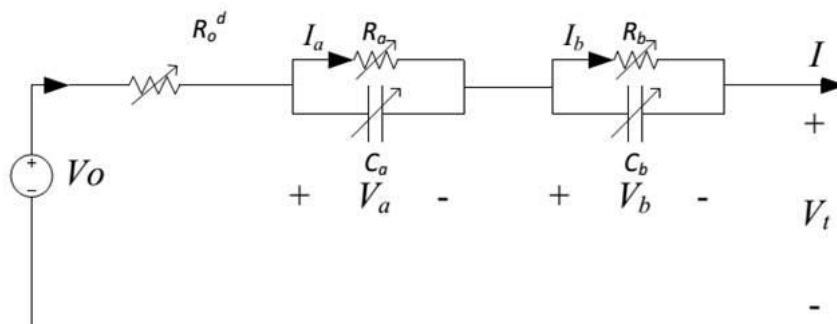


Рисунок 1 – Еквівалентна схема заміщення накопичувача електроенергії

- Рівень заряду накопичувачів електроенергії визначається як залишок заряду накопичувачів електроенергії порівняно з номінальною величиною заряду накопичувачів електроенергії, яку він може накопичувати.

$$SOC = \frac{E_d}{E_3} \cdot 100\% \quad (1)$$

де E_d – доступна електрична енергія в накопичувачі електроенергії;

E_3 – загальна електрична енергія, яку може накопичувати накопичувач електроенергії.

Графік залежності між напругою холостого ходу накопичувача електроенергії та його рівнем заряду

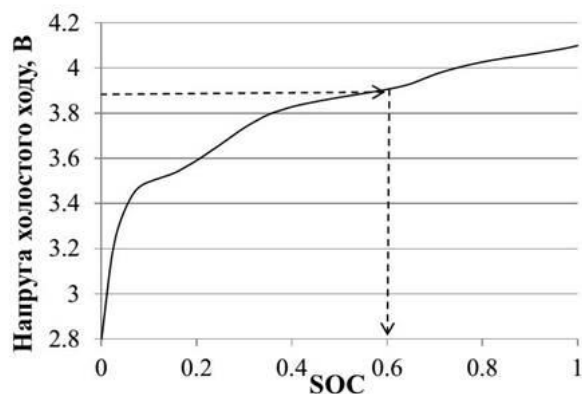


Рисунок 2 - Графік залежності між напругою холостого ходу накопичувача електроенергії та його рівнем заряду

- Звідси можна зробити висновок, що відображення графіку залежності між напругою холостого ходу накопичувача електроенергії та його рівнем заряду є відносно точним методом отримання значення рівня заряду накопичувача електроенергії за допомогою точного вимірювання напруги холостого ходу.
- Однак, напруга холостого ходу визначається, як напруга накопичувача електроенергії без під'єднання до нього навантаження, коли система знаходиться в рівноважному стані. Напругу холостого ходу можна отримати тільки після так званого часу релаксації для кожного значення рівня заряду накопичувача електроенергії при відповідній температурі.

Діаграма комплексного опору накопичувачів електроенергії ⁵

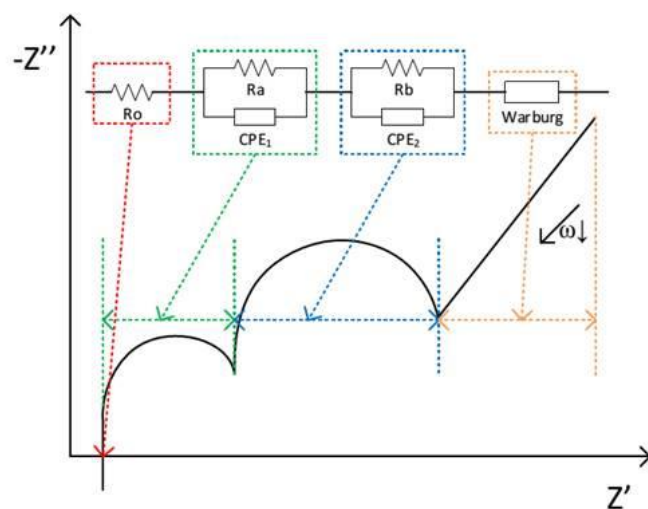


Рисунок 3 - Діаграма комплексного опору накопичувачів електроенергії

Метод електрохімічної спектроскопії використовує взаємозв'язок між рівнем заряду накопичувача електроенергії та значенням комплексного опору накопичувача електроенергії. Електрохімічний імпеданс відображає динамічні характеристики накопичувачів електроенергії. Іншими словами, це реакція після невеликої подачі сигналу напруги або струму.

Діагностування рівня працездатності накопичувачів електроенергії ⁶

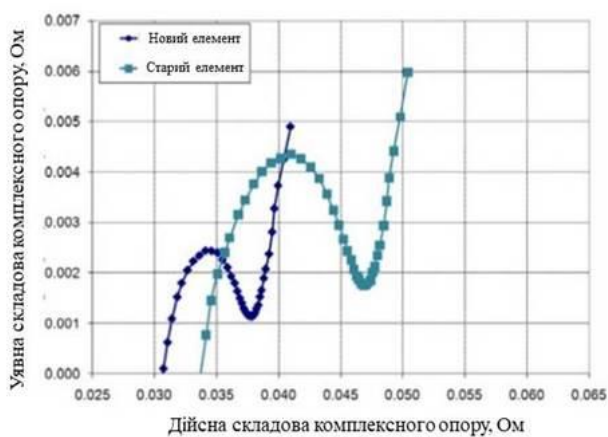


Рисунок 4 – Діаграми комплексних опорів нового (фіолетова крива) та старого (блакитна крива) накопичувачів електроенергії

Аналізуючи діаграми комплексних опорів нового (фіолетова крива) та старого (блакитна крива) накопичувачів електроенергії, які зображені на рисунку 4 можна зробити висновок, що точки перетину діаграм комплексного опору із дісною віссю Z' суттєво відрізняються.

Загальна структурна схема пристрою діагностування стану накопичувачів електроенергії 7

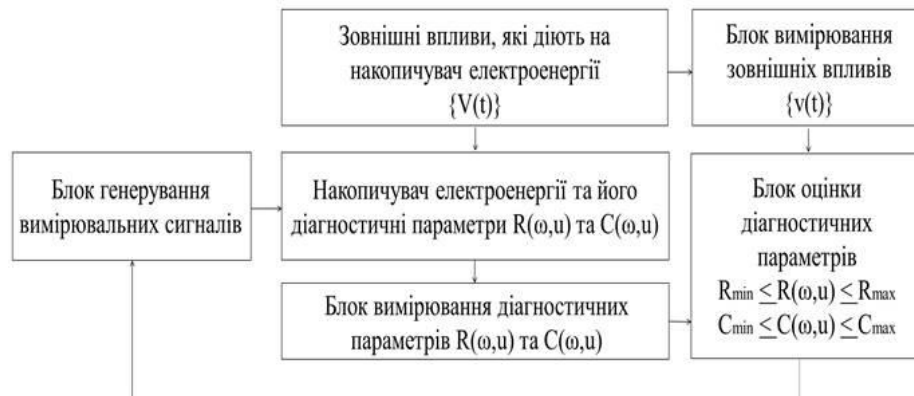


Рисунок 5 - Загальна структурна схема пристрою діагностування стану накопичувачів електроенергії

Висуваються дві гіпотези.

1. Основна гіпотеза H_0 (накопичувач електроенергії придатний)

$$H_0: c \in [C_H, C_B] \cap r \in [R_H, R_B] \quad (2)$$

2. Альтернативна гіпотеза H_1 (накопичувач електроенергії непридатний)

$$H_1: c \notin [C_H, C_B] \cap r \notin [R_H, R_B] \quad (3)$$

Підвищення достовірності діагностування стану накопичувачів електроенергії

8

Якщо вибрати вирази, що описують математичні моделі перехідного опору $z_M(t, u)$ та перехідної провідності $y_M(t, i)$ накопичувачів електроенергії, а також задовольняють коефіцієнтам максимального відхилення (4) та (5), то можна записати вирази середніх ризиків процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії.

$$\bar{\Psi}_u = \int_{u \in U} |z_\varepsilon(t, u) - z_M(t, u)|^k f_u(u) du \leq \int_{u \in U} m_u^k f_u(u) du = m_u^k; \quad (4)$$

$$\bar{\Psi}_i = \int_{i \in I} |y_\varepsilon(t, i) - y_M(t, i)|^k f_i(i) di \leq \int_{i \in I} m_i^k f_i(i) di = m_i^k. \quad (5)$$

де $\eta_u = |z_\varepsilon(t, u) - z_M(t, u)|^k$ - функція втрат напруги в процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії;

$\eta_i = |y_\varepsilon(t, i) - y_M(t, i)|^k$ - функція втрат струму в процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії.

Підвищення достовірності діагностування стану накопичувачів електроенергії

9

Звідси можна зробити висновок, що достовірність процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії буде максимальною, якщо математичні моделі перехідного опору $z_M(t, u)$ та перехідної провідності $y_M(t, i)$ накопичувачів електроенергії з високою описують їх вимірні характеристики перехідного опору $z_e(t, u)$ та перехідної провідності $y_e(t, i)$.

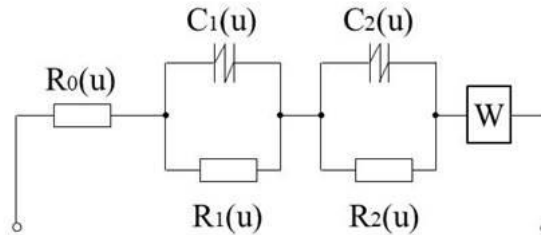


Рисунок 6 – Нелінійна дробова еквівалентна схема заміщення накопичувачів електроенергії

Для нелінійної дробової еквівалентної схеми заміщення накопичувачів електроенергії, яка наведена на рисунку 6, нелінійний дробовий комплексний опір записується вигляді виразу (6).

$$Z(j\omega, u) = R_0(u) + \frac{1}{\frac{1}{R_1(u)} + (j\omega)^{\alpha_1} \cdot C_1(u)} + \frac{1}{\frac{1}{R_2(u)} + (j\omega)^{\alpha_2} \cdot C_2(u)} + \frac{W}{\sqrt{\omega}}(1-j) \quad (6)$$

Отримані наступні параметри нелінійної дробової еквівалентної схеми заміщення накопичувачів електроенергії: $R_0 = 0,0096$ Ом, $R_1 = 0,0047$ Ом, $C_1 = 5,675$ Ф, $a_1 = 0,598$, $R_2 = 8,813$ Ом, $C_2 = 111,55$ Ф, $a_2 = 0,001$, $W = 0,0011$

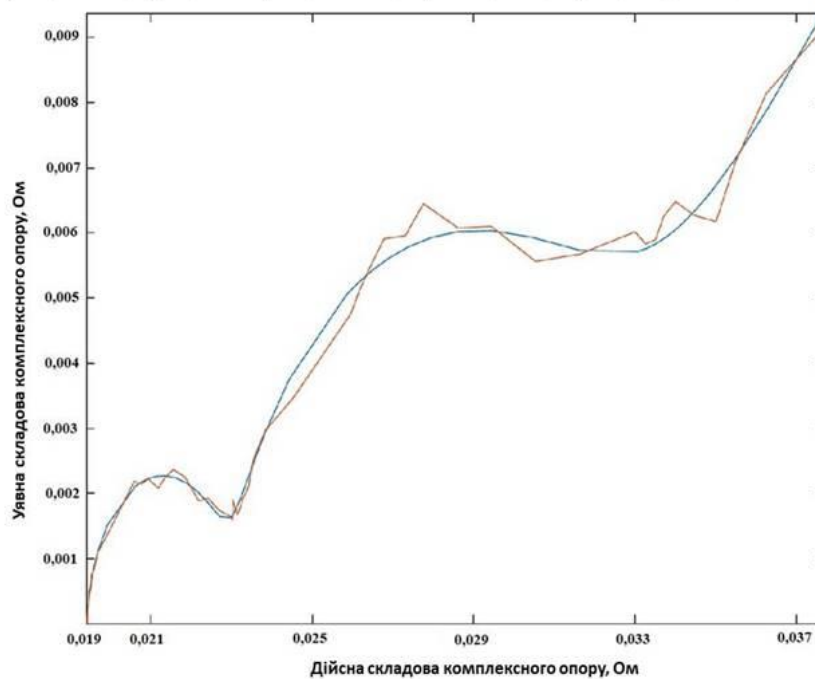


Рисунок 7 – Співпадіння експериментальних даних комплексного опору літій-іонного накопичувача електроенергії VionX ємністю 8,8 Агод і номінальною напругою 48 В із теоретичними даними

Експериментальні данні залежності комплексного опору літій-іонного накопичувача електроенергії VionX ємністю 8,8 Агод і номінальною напругою 48 В для різних рівнів заряду (SOC) накопичувача електроенергії

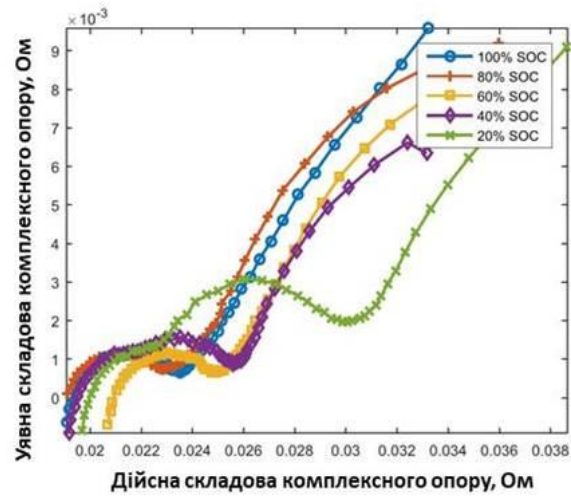


Рисунок 8 – Експериментальні данні залежності комплексного опору літій-іонного накопичувача електроенергії VionX ємністю 8,8 Агод і номінальною напругою 48 В для різних рівнів заряду (SOC) накопичувача електроенергії

Структурна схема приладу для удосконаленого методу діагностування стану накопичувачів електроенергії на змінному струмі

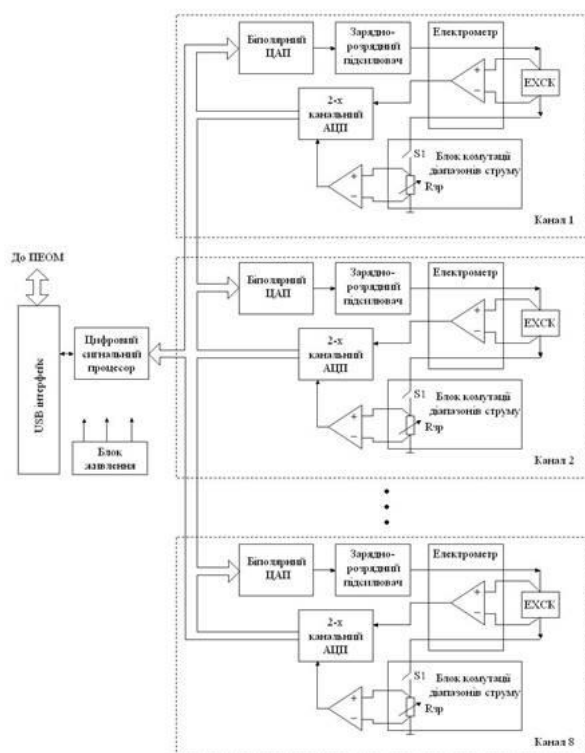


Рисунок 9 – Структурна схема приладу для удосконаленого методу діагностування стану накопичувачів електроенергії на змінному струмі

Фотографія приладу для діагностування стану накопичувачів електроенергії на змінному струмі

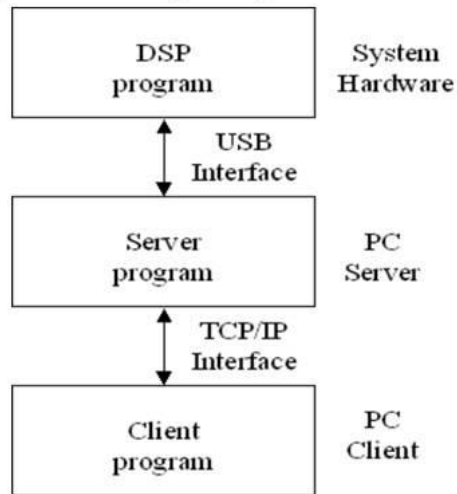
13



13

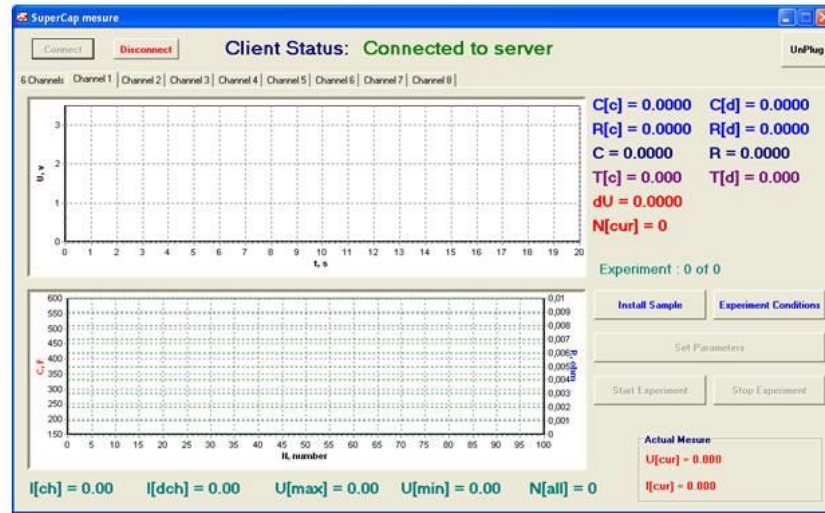
**Компоненти програмного забезпечення для діагностування стану
накопичувачів електроенергії на змінному струмі**

14



14

Користувачький інтерфейс для клієнтської програми (показано лише один канал) ¹⁵
один канал)



1. Проаналізовано та досліджено еквівалентні схеми заміщення накопичувачів електроенергії та встановлено, що вони використовують прості компоненти електричних кіл, такі як резистори та конденсатори. Еквівалентні схеми заміщення накопичувачів електроенергії відображають співвідношення між вхідним струмом та вихідною напругою на виводах накопичувачів електроенергії.
2. Діагностування рівня заряду та рівня працездатності накопичувачів електроенергії можливе, якщо математично описати закони зміни параметрів елементів еквівалентної схеми заміщення накопичувачів електроенергії від їх рівня заряду та рівня працездатності. Для цього потрібно апроксимувати діаграму комплексного опору накопичувачів електроенергії виразом, що описує залежність їх комплексного опору від рівня заряду та рівня працездатності.
3. Встановлено, що при побудові пристроїв діагностування стану накопичувачів електроенергії необхідно враховувати параметри, які відображають їх технічний стан. До номінальних показників технічного стану накопичувачів електроенергії відноситься їх ємність C та активний опір R .
4. Встановлено, що достовірність діагностування стану накопичувачів електроенергії можна підвищити, якщо використовувати їх частотні та часові характеристики. В процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії можна використовувати їх операторний опір, який залежить від напруги на виводах накопичувачів електроенергії.
5. Доведено, що адекватність удосконаленої математичної моделі накопичувачів електроенергії підтверджується співпадінням експериментальних даних комплексного опору літій-іонного накопичувача електроенергії BionX ємністю 8,8 Агод і номінальною напругою 48 В із теоретичними даними, які отримані в результаті апроксимації експериментальних даних виразом нелінійного дробового комплексного опору.
6. Удосконалено метод діагностування стану накопичувачів електроенергії, який базується на багатопараметричному діагностуванні стану накопичувачів електроенергії і враховує вплив частотної дисперсії параметрів накопичувачів електроенергії, їх нелінійність та перехідні процеси, які виникають в процесі діагностування, що дозволяє підвищити достовірність діагностування стану накопичувачів електроенергії.

ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!

Anti-Plagiarism v-15.257**Максимальне співпадіння з одним документом 1.0%****Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. Помилки в документах: 10%**

| | | | | |
|--|----------|---------|-----------------------------|---------|
| ID: 83513 Назва: Метод діагностування стану накопичувачів електроенергії Додано в БД: 2020-12-10 Автора: Р.В. Тимошук Керівники: В.В. Мартинюк Консультанти: Опоненти: О.В. Бармак | Документ | | Сумарний збіг по Базі Даних | |
| | Символи | Лексеми | Символи | Лексеми |
| | 88447 | 589 | 894 (1%) | 11 (2%) |

Джерело плагіату

| ID | Опис | Наявність плагіату в документі | |
|----|------|--------------------------------|---------|
| | | Символи | Лексеми |
| | | | |



Ім'я користувача:
Кафедра АКІТІТК

ID перевірки:
1005419830

Дата перевірки:
10.12.2020 11:40:44 EET

Тип перевірки:
Doc vs Internet

Дата звіту:
10.12.2020 11:50:26 EET

ID користувача:
100005862

Назва документа: Tymoschuk_R_V_Na_Antyplagiat

Кількість сторінок: 84 Кількість слів: 13136 Кількість символів: 102396 Розмір файлу: 2.44 MB ID файлу: 1005711637

7.81%

Схожість

Найбільша схожість: 2.01% з Інтернет-джерелом (<https://macsphere.mcmaster.ca/bitstream/11375/16436/1/AHMED%20..>)

7.81% Джерела з Інтернету

350

Сторінка 86

Пошук збігів з Бібліотекою не проводився

0% Цитат

Вилучення цитат вимкнене

Вилучення списку бібліографічних посилань вимкнене

0%

Вилучень

Немає вилучених джерел

Модифікації

Виявлено модифікації тексту. Детальна інформація доступна в онлайн-звіті.

Замінені символи

52

РЕЦЕНЗІЯ
на дипломну роботу магістранта Тимощука Романа Валерійовича
на тему: “Метод діагностування стану накопичувачів електроенергії”

Дипломну роботу присвячено розробці методу діагностування стану накопичувачів електроенергії. В ній на основі математичної моделі накопичувача електроенергії розроблено удосконалений метод діагностування стану накопичувачів електроенергії, який базується на багатопараметричному діагностуванні стану накопичувачів електроенергії і враховує вплив частотної дисперсії параметрів накопичувачів електроенергії, їх нелінійність та перехідні процеси, які виникають в процесі діагностування, що дозволяє підвищити достовірність діагностуванні стану накопичувачів електроенергії.

В процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії запропоновано враховувати вплив частотної дисперсії параметрів накопичувачів електроенергії, їх нелінійність та перехідні процеси, які виникають в процесі діагностування, що дозволяє підвищити достовірність діагностуванні стану накопичувачів електроенергії.

Удосконалена структурна схема приладу для удосконаленого методу діагностування стану накопичувачів електроенергії на змінному струмі складається із восьми діагностувальних каналів.

Удосконалено алгоритм програмного забезпечення для удосконаленого методу діагностування стану накопичувачів електроенергії на змінному струмі, яке складається із трьох програм: програми роботи сигнального процесора; серверної програми та клієнтської програми діагностування.

До недоліків роботи можна віднести неповний аналіз впливу температури на апаратне та програмне забезпечення приладу для удосконаленого методу діагностування стану накопичувачів електроенергії, але вказаний недолік не зменшує наукового рівня магістерської роботи.

Вважаю, що дипломна робота магістранта Тимощука Романа Валерійовича заслуговує оцінки «відмінно», а магістрант заслуговує присвоєння кваліфікації магістра з телекомунікацій і радіотехніки.

Опонент:

д.т.н., професор, завідувач
кафедрою комп'ютерних науки та
інформаційних технологій



Бармак О.В.

Завідувачу кафедри
автоматизації, комп'ютерно-
інтегрованих технологій і
телекомунікацій
проф. Мартинюку В.В.
здобувача вищої освіти
Тимощука Р.В.,
факультету ПКТС, 2 курс,
група ТРМ-19-2

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про дотримання академічної доброчесності в Хмельницькому національному університеті» від 26.09.2020 (зі змінами від 26.11.2020), згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщений (а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Unicheck та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

03.12.2020р

дата


підпис

РІШЕННЯ КАФЕДРИ
**АВТОМАТИЗАЦІЇ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ**

ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Метод діагностування стану накопичувачів електроенергії

Автор: **Тимошук Роман Валерійович**

Спеціальність: **172 Телекомунікації та радіотехніка**

Освітня програма: Телекомунікації та радіотехніка

Науковий керівник: **д.т.н, проф. Мартинюк Валерій Володимирович**

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

| № | Висновок | Позначка про відповідність |
|---|---|----------------------------|
| 1 | Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту. | <u>Відповідає</u> |
| 2 | Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи | |
| 3 | Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат. | |
| 4 | Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укріплення запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту. | |
| 5 | Інше: | |

Підтвердження: Запозичення у розмірі 9,52%, виявлені в роботі відповідають тексту стандартних бланків та списку літератури, решта запозичень є випадковими, тому ці запозичення не є плагіатом, бо вони не стосуються наукової новизни і практичної значущості роботи.

11.12.2020р.

Науковий керівник роботи:

Зав. каф. АКІТіТК

Мартинюк В.В.

Мартинюк В.В.