

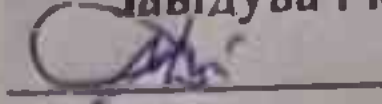
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Український державний університет науки і технологій

Кафедра Інтелектуальні системи енергопостачання

«ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри



/Дмитро БОСИЙ/

« 20 » 12 2021 р.

**ДИПЛОМНА РОБОТА**

на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141  
електромеханіка

Електроенергетика, електротехніка та

Освітньо-професійна програма Електротехнічні системи  
електроспоживання

Тема Дослідження ефективності застосування накопичувачів  
електроенергії в системах тягового електропостачання постійного струму

Theme Efficiency investigation of electricity storage in DC traction power  
supply systems

Керівник дипломної роботи

доцент  Дмитро БОСИЙ

Нормоконтролер

доцент  Віталій ПЕРЦЕВИЙ

Студентка групи ЕС2021



Каріна МІНЕНКО

Student

Minenko Karina

Дніпро – 2021

Український державний університет науки і технологій  
Факультет «Управління енергетичними процесами»  
Кафедра «Інтелектуальні системи енергопостачання»  
Галузь 14 Електрична інженерія  
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
Спеціалізація «Електротехнічні системи електроспоживання»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри

 Дмитро Босий

(підпис)

« 25 » січня 2021 р.

### ЗАВДАННЯ

до дипломної роботи на здобуття ОС магістр  
студентки групи ЕС2021 Міненко Каріни Андріївни

- 1 Тема дипломної роботи: «Дослідження ефективності застосування накопичувачів електроенергії в системах тягового електропостачання постійного струму»  
затверджена наказом по університету від «15» січня 2021р. № 32ст
- 2 Термін подання студентом закінченої роботи «15» грудня 2021р.
- 3 Вихідні дані до дипломної роботи: технічні параметри пристроїв електропостачання розрахункової ділянки.
- 4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань до розробки): аналіз застосування накопичувачів електроенергії в системах електропостачання, методи моделювання режимів роботи системи тягового електропостачання з накопичувачами, порівняння ефективності використання накопичувача електроенергії для різних систем електротранспорту.
- 5 Перелік креслень (демонстраційного матеріалу): ілюстрований опис результатів досліджень.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| №<br>п/п | Назва розділу                                                                                                 | Термін<br>виконання | Об'єм<br>розділу % |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|--------------------|
|          | ВСТУП                                                                                                         | 10.12               | 5                  |
| 1.       | АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ<br>НАКОПИЧУВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В<br>СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ                           | 01.10               | 25                 |
| 2.       | МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ<br>РОБОТИ СИСТЕМ ТЯГОВОГО<br>ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З<br>НАКОПИЧУВАЧАМИ                 | 11.11               | 40                 |
| 3.       | ПОРІВНЯННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ<br>ВИКОРИСТАННЯ НАКОПИЧУВАЧА<br>ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДЛЯ РІЗНИХ СИСТЕМ<br>ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ | 01.12               | 20                 |
| 4.       | ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ                                                                                      | 13.12               | 5                  |
| 5.       | СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ                                                                                    | 15.12               | 5                  |

Дата видачі завдання «25» січня 2021 р.

Керівник дипломної роботи, доцент



Дмитро Босий

Завдання прийняла до виконання



Каріна Міненко

# ЗМІСТ

|                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП.....                                                                                                             | 6  |
| 1 АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....                                   | 9  |
| 1.1 Свинцево-кислотні акумулятори.....                                                                                 | 10 |
| 1.2 Нікель-кадмієві і нікель-металогідридні акумулятори.....                                                           | 13 |
| 1.3 Літій-іонні акумулятори.....                                                                                       | 14 |
| 1.4 Натрій-сірчані акумулятори.....                                                                                    | 16 |
| 1.5 Воднево-повітряні паливні елементи.....                                                                            | 18 |
| 1.6 Суперконденсатори.....                                                                                             | 20 |
| 1.7 Кінетичні накопичувачі (маховики).....                                                                             | 22 |
| 1.8 Особливості вибору накопичувача.....                                                                               | 23 |
| 1.9 Аналіз ефективності накопичувачів енергії.....                                                                     | 24 |
| 2 МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З НАКОПИЧУВАЧАМИ.....                            | 27 |
| 2.1 Метод алгоритмічного моделювання процесу розподілу енергії рекуперації для системи тягового електропостачання..... | 27 |
| 2.2 Реалізація конкретної моделі зони рекуперації.....                                                                 | 29 |
| 2.3 Раціональне управління енергообмінними режимами накопичувача.....                                                  | 31 |
| 2.4 Модель системи електропостачання електричного транспорту.....                                                      | 33 |
| 3 ПОРІВНЯННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ НАКОПИЧУВАЧА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДЛЯ РІЗНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ.....            | 43 |
| ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.....                                                                                          | 53 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....                                                                                        | 54 |

|                                                         |      |              |                 |      |                                                                                                                            |     |     |        |
|---------------------------------------------------------|------|--------------|-----------------|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|--------|
|                                                         |      |              |                 |      | 02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ                                                                                                    |     |     |        |
| Зам.                                                    | Арх. | № дозв.      | Підпис          | Дата | Дослідження ефективності застосування накопичувачів електроенергії в системах тягового електропостачання постійного струму | Літ | Арк | Аркуші |
| Виконав                                                 |      | К. Міненко   | <i>[Підпис]</i> | 2021 |                                                                                                                            |     | 5   | 56     |
| Керівник                                                |      | Д. Босий     | <i>[Підпис]</i> | 2021 |                                                                                                                            |     |     |        |
| Інженер                                                 |      | І.В. Переміш | <i>[Підпис]</i> |      |                                                                                                                            |     |     |        |
| ІНСТІТУТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ І ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ НАН України |      |              |                 |      | УДУНТ, ІСЕ, гр. ЕС2021                                                                                                     |     |     |        |

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**Український державний університет науки і технологій**

Кафедра Інтелектуальні системи енергопостачання

«ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ /Дмитро БОСИЙ/

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_\_\_р.

**ДИПЛОМНА РОБОТА**

на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань **14 Електрична інженерія**

Спеціальність **141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

Освітньо-професійна програма **Електротехнічні системи електроспоживання**

Тема **Дослідження ефективності застосування накопичувачів електроенергії в системах тягового електропостачання постійного струму**

Theme **Efficiency investigation of electricity storage in DC traction power supply systems**

Керівник дипломної роботи доцент \_\_\_\_\_ Дмитро БОСИЙ

Нормоконтролер доцент \_\_\_\_\_ Віталій ПЕРЦЕВИЙ

Студентка групи ЕС2021 \_\_\_\_\_ Каріна МІНЕНКО

Student Minenko Karina

Дніпро – 2021

Український державний університет науки і технологій  
Факультет «Управління енергетичними процесами»  
Кафедра «Інтелектуальні системи енергопостачання»  
Галузь 14 Електрична інженерія  
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
Спеціалізація «Електротехнічні системи електроспоживання»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри

\_\_\_\_\_ Дмитро Босий

{підпис}

« 25 » січня 2021 р.

### **ЗАВДАННЯ**

до дипломної роботи на здобуття ОС магістр

студентки групи ЕС2021 Міненко Каріни Андріївни

1 Тема дипломної роботи: **«Дослідження ефективності застосування накопичувачів електроенергії в системах тягового електропостачання постійного струму»**

затверджена наказом по університету від «15» січня 2021р. № 32ст

2 Термін подання студентом закінченої роботи «15» грудня 2021р.

3 Вихідні дані до дипломної роботи: технічні параметри пристроїв електропостачання розрахункової ділянки.

4 Зміст пояснювальної записки {перелік питань до розробки}: аналіз застосування накопичувачів електроенергії в системах електропостачання, методи моделювання режимів роботи системи тягового електропостачання з накопичувачами, порівняння ефективності використання накопичувача електроенергії для різних систем електротранспорту.

5 Перелік креслень {демонстраційного матеріалу}: ілюстрований опис результатів досліджень.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| №<br>п/п | Назва розділу                                                                                                 | Термін<br>виконання | Об'єм<br>розділу % |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|--------------------|
|          | ВСТУП                                                                                                         | 10.12               | 5                  |
| 1.       | АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ<br>НАКОПИЧУВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В<br>СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ                           | 01.10               | 25                 |
| 2.       | МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ<br>РОБОТИ СИСТЕМ ТЯГОВОГО<br>ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З<br>НАКОПИЧУВАЧАМИ                 | 11.11               | 40                 |
| 3.       | ПОРІВНЯННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ<br>ВИКОРИСТАННЯ НАКОПИЧУВАЧА<br>ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДЛЯ РІЗНИХ СИСТЕМ<br>ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ | 01.12               | 20                 |
| 4.       | ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ                                                                                      | 13.12               | 5                  |
| 5.       | СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ                                                                                    | 15.12               | 5                  |

Дата видачі завдання «25» січня 2021 р.

Керівник дипломної роботи, доцент \_\_\_\_\_

Дмитро Босий

Завдання прийняла до виконання \_\_\_\_\_

Каріна Міненко

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка має обсяг 57 сторінок, складається із 3 розділів та містить 27 ілюстрації, 3 таблиці, 21 використане джерело.

Метою даної роботи є дослідження ефективності застосування накопичувачів електроенергії в системах тягового електропостачання постійного струму.

У поданій роботі проведено аналіз застосування сучасних накопичувачів електроенергії в системах електропостачання та показані їх переваги та недоліки. Розглянуто методи моделювання режимів роботи системи тягового електропостачання з накопичувачами та показано спосіб раціонального управління енергообмінними режимами накопичувача.

Розроблено модель системи електропостачання електричного транспорту з накопичувачами електроенергії, виконано порівняння ефективності використання накопичувача електроенергії для різних систем живлення електротранспорту.

За результатами моделювання та аналізу струмів електровоза в режимі рекуперації при різних схемних рішеннях зроблені висновки щодо реалізації енергії рекуперації та степеню використання накопичувача електроенергії, що дозволяє виявити найбільш ефективні способи застосування накопичувачів електроенергії в системах тягового електропостачання постійного струму.

Ключові слова: СИСТЕМА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, АККУМУЛЯТОР, НАКОПИЧУВАЧІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, СУПЕРКОНДЕНСАТОР.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП.....                                                                                                             | 6  |
| 1 АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....                                   | 9  |
| 1.1 Свинцево-кислотні акумулятори.....                                                                                 | 10 |
| 1.2 Нікель-кадмієві і нікель-металогідридні акумулятори.....                                                           | 13 |
| 1.3 Літій-іонні акумулятори.....                                                                                       | 14 |
| 1.4 Натрій-сірчані акумулятори.....                                                                                    | 16 |
| 1.5 Воднево-повітряні паливні елементи.....                                                                            | 18 |
| 1.6 Суперконденсатори.....                                                                                             | 20 |
| 1.7 Кінетичні накопичувачі (маховики).....                                                                             | 22 |
| 1.8 Особливості вибору накопичувача.....                                                                               | 23 |
| 1.9 Аналіз ефективності накопичувачів енергії.....                                                                     | 24 |
| 2 МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З НАКОПИЧУВАЧАМИ.....                            | 27 |
| 2.1 Метод алгоритмічного моделювання процесу розподілу енергії рекуперації для системи тягового електропостачання..... | 27 |
| 2.2 Реалізація конкретної моделі зони рекуперації.....                                                                 | 29 |
| 2.3 Раціональне управління енергообмінними режимами накопичувача.....                                                  | 31 |
| 2.4 Модель системи електропостачання електричного транспорту.....                                                      | 33 |
| 3 ПОРІВНЯННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ НАКОПИЧУВАЧА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДЛЯ РІЗНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ.....            | 43 |
| ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.....                                                                                          | 53 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....                                                                                        | 54 |

|           |      |             |        |      |                                                                                                                            |                        |         |
|-----------|------|-------------|--------|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|---------|
|           |      |             |        |      | 02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ                                                                                                    |                        |         |
| Змн.      | Арк. | № докум.    | Підпис | Дата |                                                                                                                            |                        |         |
| Розробник |      | К. Міненко  |        |      | Дослідження ефективності застосування накопичувачів електроенергії в системах тягового електропостачання постійного струму | Літ.                   | Арк.    |
|           |      |             |        |      |                                                                                                                            |                        | Аркушів |
| Керівник  |      | Д. Босий    |        |      |                                                                                                                            |                        | 5       |
|           |      |             |        |      |                                                                                                                            | УДУНТ, ІСЕ, гр. ЕС2021 |         |
| Н. контр. |      | В. Перцевий |        |      |                                                                                                                            |                        | 56      |

## ВСТУП

**Актуальність роботи.** На сьогоднішній день електричні залізниці споживають значну кількість електричної енергії. Ефективне функціонування залізничного транспорту багато в чому залежить від вироблення комплексу заходів з підвищення енергетичної ефективності роботи системи тягового електропостачання.

Одним із важливих напрямків зниження витрати електроенергії на тягу поїздів є рекуперативне гальмування. Під час рекуперативного гальмування тягові двигуни електрорухомого складу (ЕРС) переводять у генераторний режим, і механічна енергія руху поїзда перетворюється на електричну енергію. На ділянках контактної мережі з'являється рухоме джерело енергії, яке розвантажує підстанції та підвищує напругу в тяговій мережі, тим самим покращуючи умови роботи ЕРС, що знаходиться у тяговому режимі.

При рекуперації найбільш економічний такий режим, при якому вся енергія, що виробляється електрорухомим складом, передається іншому ЕРС, що знаходяться поблизу у режимі тяги, однак це не завжди можливо.

На даному етапі технічного розвитку в якості приймачів надлишкової енергії рекуперації можуть застосовуватися інвертори, за допомогою яких енергія передається у первинну мережу, де завжди є споживачі. Проте використання енергії електричного гальмування на основі інверторів малоефективне, у зв'язку з тим, що втрати енергії внаслідок нагрівання провідників тягової мережі складають істотну частку енергії рекуперації, а різниця в ціні споживаної від первинної енергосистеми та енергії яка назад віддається дуже значна. Тому найперспективніше застосування накопичувачів енергії (НЕ) великої ємності, що дозволяють максимально ефективно використовувати надмірну енергію рекуперації.

Тому на даний час оцінка ефективності застосування накопичувачів електроенергії у системі тягового електропостачання є актуальним завданням.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 6    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

**Зв'язок роботи з науковими програмами.** Обране дослідження безпосередньо пов'язані з виконанням науково-дослідних робіт у Українському державному університеті науки і технологій.

**Мета і завдання роботи.** Метою досліджень є оцінка ефективності застосування накопичувачів електроенергії у системі тягового електропостачання постійного струму.

Об'єкт дослідження – ділянка залізниці електрифікована на постійному струмі.

Предмет дослідження – оптимізація режиму енергообміну та споживання електроенергії при застосуванні накопичувача електроенергії в системі з тяговим навантаженням.

Методи дослідження. Вирішення поставлених завдань здійснювалося з використанням методів імітаційного моделювання, програмно-технічних засобів.

**Наукова новизна та основні положення, які виносяться на захист:**

1. Вперше розроблено імітаційну модель системи електропостачання електричного транспорту, що дозволяє провести аналіз режимів роботи системи тягового електропостачання з накопичувачами електроенергії.

2. Вперше проведено зіставлення результатів моделювання при різних режимах роботи обладнання тягової підстанції з накопичувачами електроенергії.

**Практичне значення отриманих результатів:** отримано модель для прогнозного моделювання, що дозволяє використовувати її для аналізу ефективності режиму енергообміну та споживання електроенергії в системі з тяговим навантаженням тягової мережі постійного струму.

**Особистий внесок здобувача.** Постановка мети та завдання дослідження, розробка комп'ютерної моделі. Здобувачем самостійно проведено комп'ютерне моделювання, розрахунки, зіставлення та аналіз отриманих результатів, формулювання висновків.

**Апробація результатів магістерської роботи.** Основні положення роботи і результати досліджень доповідалися здобувачем і обговорювалися на науково-

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 7    |

практичній конференції.

81 Всеукраїнська науково-технічна конференції молодих учених, магістрантів та студентів «Наука і сталий розвиток транспорту» 28 жовтня 2021 р.

**Публікації.**

Міненко К. А., Дослідження ефективності застосування накопичувачів електроенергії в системах тягового електропостачання постійного струму / Енергетика та електромеханіка [електронний ресурс]: збірник тез доповідей секції 81 Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених, магістрантів та студентів «Наука і сталий розвиток транспорту» 28 жовтня 2021 р. – Дніпро: Дніпровський нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2021. – 42 с.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 8    |

# 1 АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

На сучасному етапі розвитку української електроенергетики необхідний форсований перехід до енергозберігаючих технологій, різних способів зниження втрат електричної потужності і електроенергії, що скорочують потребу в нових електростанціях і органічному паливі.

Перевізний процес на залізничному транспорті постійно потребує підвищення енергоефективності. Поява нових технологій в області розробки накопичувачів електричної енергії (НЕ) тягне за собою необхідність оцінювати ефективність роботи існуючих і перспективних видів даних пристроїв в системі тягового електропостачання (СТЕ). Вимагають також рішення задачі стабілізації напруги в контактній мережі, вирівнювання графіка навантаження тягової підстанції, використання енергії рекуперативного гальмування і зниження рівня втрат в елементах СТЕ.

ККД транспортної системи з неавтономними транспортними засобами, які отримують живлення від контактної мережі, в значній мірі залежать від взаємного розташування транспортних засобів і тягових підстанцій. Перебуваючи близько від підстанцій або працюючи в режимах вибігу і не рекуперативного гальмування втрати в тяговій мережі незначні, проте в інших режимах вони можуть знижувати сумарний ККД системи на десятки відсотків. Одним з варіантів вирішення цих завдань є використання накопичувача енергії. Такий НЕ буде забезпечувати виконання таких функцій: 1) для автономних транспортних засобів забезпечувати економну роботу двигуна внутрішнього згорання; 2) накопичення енергії, виробленої двигуном внутрішнього згорання або отриманої від контактної мережі для можливостей подальшої передачі її до двигуна, згідно з режимами руху транспортного засобу, для забезпечення необхідних динамічних можливостей (прискорень при розгоні); 3) накопичення енергії при гальмуванні транспортного засобу з метою її повторного використання при розгоні або для забезпечення роботи інших - допоміжних систем.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 9    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

Найбільшого поширення в даний час для транспортних засобів набули накопичувачі наступних типів [1]:

1. Електрохімічні НЕ, на основі акумуляторних батарей наступних типів: свинцево-кислотні, гелієві, літій-іонні та літій-полімерні. Вони забезпечують тривале зберігання накопиченої енергії, мають прийнятні масогабаритні і вартісні показники. Однак процес їх заряду достатньо складний і тривалий, тому їх показники потужності особливо в процесі зарядки достатньо низькі.

2. Конденсаторні НЕ, на основі суперконденсаторів - іоністорів. Такі накопичувачі мають хороші масогабаритні характеристики і прийнятні показники потужності. Однак в даний час мають досить високу ціну.

3. Механічні НЕ, на основі обертових маховиків. Головною перевагою їх є висока питома потужність, при прийнятних масогабаритних характеристиках. Основний недолік - висока витік енергії при її тривалому зберіганні і відсутність широкої номенклатури реалізованих конструкцій.

4. Пневматичні НЕ, на основі балонів зі стисненим повітрям, компресора і пневмодвигуна.

Вибір типу НЕ повинен спиратися не тільки на певні критерії, а й враховувати місце його установки і особливості роботи НЕ.

Більш детально різні перспективні типи накопичувачів електроенергії, їх основні переваги та недоліки розглянемо нижче.

### **1.1 Свинцево-кислотні акумулятори**

Це найбільш вивчений і освоєний тип накопичувачів як для систем з поновлюваних джерел енергії, так і багатьох інших застосувань. Свинцево-кислотні акумулятори (СКА) можна зустріти і на великих електростанціях (джерела аварійного живлення власних потреб), і в легкових автомобілях. Активні речовини акумулятора зосереджені в електроліті і позитивних та негативних електродах, а сукупність цих речовин називається електрохімічної системою. У свинцево-кислотних акумуляторних батареях електролітом є розчин сірчаної

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 10   |

кислоти, активною речовиною позитивних пластин - двоокис свинцю, негативних пластин - свинець.

В даний час існує декілька різновидів СКА. Вони розрізняються хімічними добавками до матеріалу позитивних і негативних пластин, станом електроліту та областями застосування. Найпершими за часом створення є заливні акумулятори з вільним електролітом, в яких позитивний і негативний електроди занурені в водний розчин сірчаної кислоти. Технологія досить проста і дешева, такі акумулятори широко застосовуються в стартерних батареях автомобілів. Зустрічаються вони і в стаціонарних системах аварійного живлення.

Основна проблема полягає в тому, що акумулятори вимагають обслуговування, що полягає в періодичній перевірці рівня кислоти і її концентрації. Кислота втрачається при випаровуванні електроліту і при електролізі під час заряду. Остання обставина призводить до виділення водню в процесі заряду і необхідності вентиляції приміщень під час заряду. Такі акумулятори можуть експлуатуватися тільки в горизонтальному положенні [2].

Останнім часом конструкція і технологія виробництва СКА зазнали ряд змін, перш за все спрямованих на підвищення ресурсу та зручності обслуговування. Перевагою свинцево-кислотних акумуляторів є саме відпрацьована технологія їх масового виробництва, що істотно знижує їх вартість - даний вид накопичувачів в розрахунку на одиницю устаткування є найдешевшим.

Для більшості СКА допустима глибина розряду з міркувань збереження ресурсу обмежується 30% від номінальної енергоємності.

До недоліків свинцево-кислотних акумуляторів в цілому слід віднести невелику глибину розряду (до 30...50%), чутливість до температури навколишнього середовища, низькі питомі характеристики (порядку 20...30 Вт·год/кг) і відносно низький ресурс (500...800 циклів при глибині розряду 40...50% для більшості виробників) [2].

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 11   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

З недавнього часу також існують акумулятори з іммобілізованим в полімерній матриці (закордонне позначення AGM - Absorbed glass mate) і гелі (закордонне позначення Gel) електролітом. Такі акумулятори вже можуть експлуатуватися в будь-якому положенні відносно поверхні Землі і не вимагають обслуговування. Тому загальний термін для даного типу систем - герметизовані акумулятори. Вони забезпечені рекомбінаторами водню, що перетворюють газ, що виділився в процесі електролізу в воду і, таким чином, це компенсує втрати електроліту при перезаряді. Проте, тривалий або швидкий перезаряд здатний привести до вибуху батареї через перегрів і підвищене газовиділення.

Крім іммобілізації електроліту, в обох типах по-різному модифіковані електроди. У СКА типу AGM підвищена стійкість до режиму так званого «жорсткого буфера», коли батарея тривалий час знаходиться в режимі постійного підзаряду - енергія постійно протікає «наскрізь» - від зарядного пристрою до споживача. Цей режим характерний для джерел аварійного живлення і допускає миттєве підхоплення навантаження при зникненні живлення від мережі. З точки зору електрохімії даний режим характеризується перебуванням катода і анода акумулятора при потенціалі, близькому до верхньої межі допустимого діапазону і, отже, є підвищена вірогідність запуску паразитних реакцій, що ведуть до руйнування електрода. Середній термін служби СКА, використовуваних в такому режимі - від 3 до 5 років [3].

Гелеві акумулятори оптимізовані для постійних глибоких зарядів і розрядів, тому вони найбільш часто застосовуються в системах електропостачання.

СКА залишаються найбільш поширеним рішенням по буферному акумуляуванню електроенергії, коли мова йде про невеликі пристрої в поновлюваних джерелах енергії. Також можна відзначити домінування цього типу акумуляторів в джерелах резервного і безперебійного живлення самого різного призначення - від великих підстанцій на залізниці до джерел безперебійного живлення для персональних комп'ютерів. Багато в чому така ситуація

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 12   |

пояснюється консерватизмом галузі, яка звикла до відпрацьованих рішень, а по-друге - відносно низькою вартістю СКА.

## 1.2 Нікель-кадмієві і нікель-металогідридні акумулятори

В нікель-кадмієвом акумуляторі анодним електродом є гідрат дігидроксида нікелю  $\text{Ni(OH)}_2$ , змішаний для підвищення провідності з графітом (5...8% мас.%), катодним електродом - гідрат закису кадмію  $\text{Cd(OH)}_2$  або металевий кадмій  $\text{Cd}$  (у вигляді порошку). Електроліт - водний розчин калієвого лугу  $\text{KOH}$  щільністю  $1,2\text{г/см}^3$ . Напруга холостого ходу нікель-кадмієвого акумулятора близько 1,37 В, питома енергія близько 50 Вт·год/кг.

Залежно від конструкції, режиму роботи (тривалі або короткі розряди) і чистоти застосовуваних матеріалів, термін служби складає від 100 до 9000 циклів заряду-розряду. Сучасні (ламельні) промислові нікель-кадмієві батареї можуть служити до 20...25 років [3]. Нікель-кадмієві акумулятори (Ni-Cd) – єдиний вид акумуляторів, які можуть зберігатися розрядженими. Для даного типу акумуляторів також характерна стійка робота при знижених ( $-20\text{ }^\circ\text{C}$ ) температурах і малий нагрів при заряді і розряді високими струмами за рахунок застосування лужного електроліту. Основним недоліком даного типу акумуляторів є так званий «ефект пам'яті» - коли зарядці піддається не в повному обсязі розряджений акумулятор, його робоча напруга знижується через формування додаткового подвійного електричного шару на електродах, як би «залишкової ємності». Багаторазове повторення цього явища призводить до виходу акумулятора з ладу, тому акумулятори даного типу доцільно застосовувати в системах, для яких характерний глибокий розряд. Робота цих акумуляторів в буферному режимі не рекомендується. Щоб уникнути розбалансу акумуляторів батареї при зберіганні необхідна система контролю і вирівнювання напруги, в іншому випадку акумулятори всередині батареї будуть обмінюватися між собою зарядом малими струмами, що призведе до їх деградації за рахунок ефекту пам'яті. Контролер заряду для таких акумуляторів повинен періодично здійснювати цикли повного заряду-розряду для збереження характеристик.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 13   |

Іншим істотним недоліком є застосування в елементах токсичного кадмію, який вимагає спеціальних технологій утилізації акумуляторів і відходів їх виробництва.

Даний тип акумуляторів знайшов широке застосування в бортових джерелах живлення різних транспортних засобів, від електромобілів і радіокерованих моделей до авіації, головним чином за рахунок підвищених щодо СКА питомих показників, стійкості до низьких температур і високим допустимим значенням струмів заряду і розряду [4].

### 1.3 Літій-іонні акумулятори

Літій-іонні акумулятори розвиваються найбільш інтенсивно останнім часом, знаходячи все більше застосування в електротранспорті, портативних джерелах живлення, космічній та авіаційній техніці.

Застосування органічних електролітів дозволяє підвищити напругу на одиничному елементі до 3...5 В в порівнянні з 1...1,5 В для кислотних і лужних систем.

При заряді акумулятора відбувається інтеркаляція іонів літію в анодний матеріал (зазвичай використовується вуглецевий анод) [5]. При розряді іони літію деінтеркаліруються і переносяться на катод, а вивільнені електрони формують електричний струм у зовнішньому ланцюзі. Для даного типу акумуляторів характерні висока енергоємність (табл. 1.1), глибокі цикли заряду-розряду (70...80%), відсутність ефекту пам'яті. В той же час ресурс і вартість таких акумуляторів залежать від типу електрохімічних систем, що застосовуються на катоді і аноді, а також від температури і режимів експлуатації.

Підвищення температури при експлуатації або навіть зберіганні істотно знижує ресурс і збільшує швидкість саморозряду. Приклади катодних систем наведені в таблиці 1.1.

Видно, що системи з високою енергоємністю мають менший ресурс і допускають розряд меншими струмами. Застосування в якості анодного матеріалу

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 14   |

наноструктурованого титаната літію ( $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ) дозволяє, збільшити ресурс до 9000 циклів, але зі зниженням енергоємності до 90 Вт·год/кг [5].

Таблиця 1.1 – Деякі властивості літій-іонних акумуляторів

| Катодна система                          | Питома енергія, Вт·год/кг | Питома потужність, кВт/кг | Питома вартість, долл./Вт·год | Ресурс циклів | Застосування                                      |
|------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------------|---------------|---------------------------------------------------|
| $\text{Li}_{(1-x)}\text{Mn}_2\text{O}_4$ | 150                       | 0,8...1                   | 1...3                         | 1500          | Джерела безперебійного живлення, електротранспорт |
| $\text{LiCoO}_2$                         | 180                       | 0,3...0,4                 | 2,8...5                       | 1200          | Побутова електроніка, електротранспорт            |
| $\text{LiFePO}_4$                        | 110                       | 2...3                     | 0,4...2                       | більше 2000   | Електротранспорт, стаціонарні системи             |

Для нормальної і безпечної роботи літій-іонної акумуляторної батареї (ЛІАБ) необхідна система управління і контролю, що регулює струми заряду і розряду, яка контролює температуру на окремих акумуляторах і, головне, вирівнює їх напругу в процесі заряду і розряду. Без такої системи може виникнути ситуація, коли вся батарея починає працювати на заряд єдиного акумулятора з мінімальною напругою, що може привести до його заряду, пожежі і вибуху. Системи контролю і управління зазвичай класифікуються як активні і пасивні. Активні здійснюють відключення і дозарядку кожного акумулятора індивідуально, в той час як пасивні знижують напругу на найбільш заряджених акумуляторах за рахунок пропускання струму через резистор балансування, включений паралельно кожному акумулятору.

Пасивні системи більш прості і дешеві, але сумарний ККД батареї в цьому випадку буде нижче за рахунок розсіювання частини енергії в тепло. Це розсіювання буде тим вище, чим більше початковий «розбіг» напруг індивідуальних акумуляторів, зібраних в батарею, тому попередньо акумулятори піддають вхідному контролю з метою їх сортування по партіях з близькими зарядно-розрядними характеристиками і енергоємністю в Агод.

Незважаючи на високі питомі характеристики, до середини 2000-х років літійонні акумулятори застосовувалися в основному в портативних електронних пристроях.

Використання в якості основного катодного матеріалу дорогого і вибухонебезпечного кобальтиту літію було головним обмеженням на число елементів в батареї. До того ж такі батареї вимагали складної системи контролю та управління, що не допускала:

- а) надмірного розігріву елементів;
- б) високих значень струмів заряду і розряду;
- в) суттєвої різниці напруг між окремими елементами батареї.

Порушення будь-якого з цих вимог зазвичай веде до вибуху елемента. зрозуміло, що в таких умовах про великі накопичувачі на основі ЛПА не могло бути й мови.

Ситуація почала кардинально змінюватися з появою і відпрацювання нових катодних матеріалів - олівіноподібних структур, що дозволило підвищити безпеку, ресурсні характеристики і знизити вартість батарей без істотного зниження енергоємності [6]. Застосування титанату літію на аноді акумулятора дозволило розширити температурний діапазон і досягти ресурсу більш 6000 циклів при істотній глибині розряду високих значеннях струмів. В даний час цілий ряд компаній, орієнтованих на виробництво ЛПА для електромобілів, починає випуск систем ЛПА для безперебійних, резервних і аварійних потреб, а також буферного акумуляування електроенергії. Високі питомі характеристики ЛПА дозволяють розмістити такі системи в стандартних морських або автомобільних контейнерах.

#### 1.4 Натрій-сірчані акумулятори

Принцип дії натрій-сірчаного акумулятора показаний на рис. 1.1. Багато в чому дана електрохімічна система нагадує літієву - в розрядженому стані натрій утворює з сіркою хімічну сполуку (полісульфід натрію), в зарядженому - сірка і натрій представлені у вигляді чистих речовин, розділених керамічної мембраною.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 16   |

Є ряд істотних відмінностей - електроліт в даній системі керамічний, що обумовлює високу робочу температуру акумулятора (290...360°C).

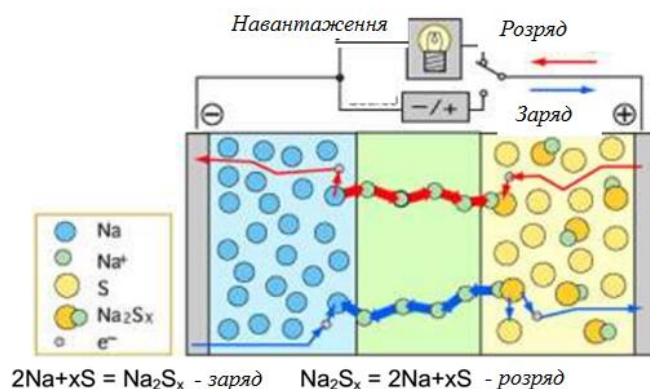


Рисунок 1.1 – Принцип дії NaS акумулятора

У японських системах, розроблених і серійно випускаємих компанією NGK Insulators LTD, температура акумулятора в режимі зберігання підтримується за рахунок струмів саморозряду. Так як падіння температури призводить до замерзання реагентів і різкого зниження іонної провідності електроліту, в конструкції зроблені додаткові заходи щодо теплоізоляції батареї. Крім теплоізоляції зовнішнього корпусу застосовуються такі заходи як відкачка повітря з внутрішнього об'єму батареї, де розташовані окремі акумулятори, і покриті на внутрішніх стінках цього обсягу фольгою (екранно-вакуумна теплоізоляція). Теоретична енергоемність даної системи може досягати 925 Вт·год/кг, однак у реальності досягнуті набагато менші цифри – 150...100 Вт·год/кг. Досягнуті на практиці ресурсні характеристики демонструють значення від 2000 до 4000 циклів при глибині розряду до 80...90%. Слід відзначити широке застосування подібних систем в Японії і США, як для відновлюваної, так і централізованої енергетики [7].

Великих успіхів у створенні високо потужних натрій-сірчаних акумуляторів досягнуті за останнє десятиліття в Японії в Tokyo Electric Power Company (TEPCO) і NGK Insulators, LTD, причому мова йде як про результати науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи, так і про серійне виробництві накопичувачів даного типу. Великі перспективи сірконатрієвих

аккумуляторів обумовлені цілим рядом їх переваг, до яких відносяться висока питома енергія і потужність, хороша оборотність і великий ресурс, що є наслідком використання рідких електродів, відсутність побічних реакцій, герметичність і великий термін зберігання, дешевизна і доступність основних реагентів - натрію і сірки. Цьому унікальному поєднанню переваг сірконатрієвого аккумулятора протистоїть один істотний недолік - його відносно висока робоча температура ( $300^{\circ}\text{C}$ ), яка, в основному, і визначає області можливого застосування цього виду накопичувачів.

Кілька модулів за останні роки були інстальовані в США, в основному для стабілізації роботи вітрових електростанцій і великих електричних мереж.

### 1.5 Воднево-повітряні паливні елементи

Воднево-повітряні паливні елементи розглядалися як перспективні енергетичні системи для різних застосувань в силу високого ККД ( $50\ldots 55\%$ ) і відсутність шкідливих викидів в разі низькотемпературних систем - лужних і твердополімерних паливних елементів.

Принцип дії воднево-повітряної паливної елементи показаний на рис. 1.2. На каталізаторі анода відбувається реакція розкладання молекули водню на атоми і подальшої їх іонізації. Протони рухаються до катода через тонку полімерну мембрану, яка виконана з композиційного матеріалу на основі фторопласта, що включає в себе сірчаноокислі функціональні групи, які, власне, і забезпечують транспорт протонів. Електрони також потрапляють на катод через зовнішній ланцюг. На катодному каталізаторі відбувається реакція відновлення кисню повітря до води. Важливо відзначити, що паливні елементи генерують електричну енергію до тих пір, поки на анод і катод подаються паливо і окислювач. Тобто потужність і енергоємність даної системи є незалежними - остання забезпечується обсягом запасених палива і окислювача, а перша - кількістю паливних елементів в батареї і їх площею. Типові значення робочої напруги одиничної комірки складають  $0,6\ldots 0,7\text{ В}$ , а струми –  $200\ldots 400\text{ мА/см}^2$ [5].

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 18   |

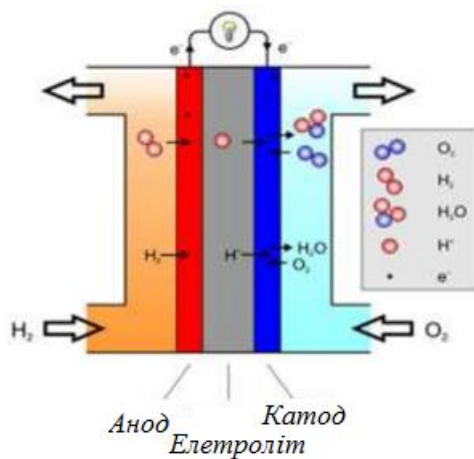


Рисунок 1.2 – Принцип роботи паливного елемента з твердо полімерним електролітом

Електролізери працюють на тих же самих принципах, однак замість генерації струму вони розкладають воду на водень і кисень при подачі на електроди різниці потенціалів вище 1,23 В. Електролізери з твердополімерним електролітом допускають досягнення високих тисків в газових лініях (40...120 атм.), що дозволяє нагнітати водень і кисень в сховища без додаткового компримування, в той час як вартість лужних електролізерів нижче через відсутність платинових каталізаторів і твердополімерних мембран, а також трубопроводів і ємностей, розрахованих на підвищені тиску.

Джерелом швидкої деградації, як електролізерів, так і паливних елементів є домішки в газах або воді. Особливу небезпеку становлять сполуки вуглецю, сірки, хлору (отруюють каталізатор) та іони заліза, кобальту, нікелю (пригнічують провідність мембран-електролітів). Тому при використанні даних систем необхідне додаткове очищення води, тобто до складу установки з водневим циклом включається дистилятор (для лужних електролізерів) або станція отримання деіонізованої води (для систем з твердим полімерним електролітом). Також необхідно осушення одержуваних електролізом газів щоб уникнути корозії ємностей для їх зберігання (газгольдерів).

Принципова схема реалізації водневого циклу з паливними елементами представлена на рис. 1.3.

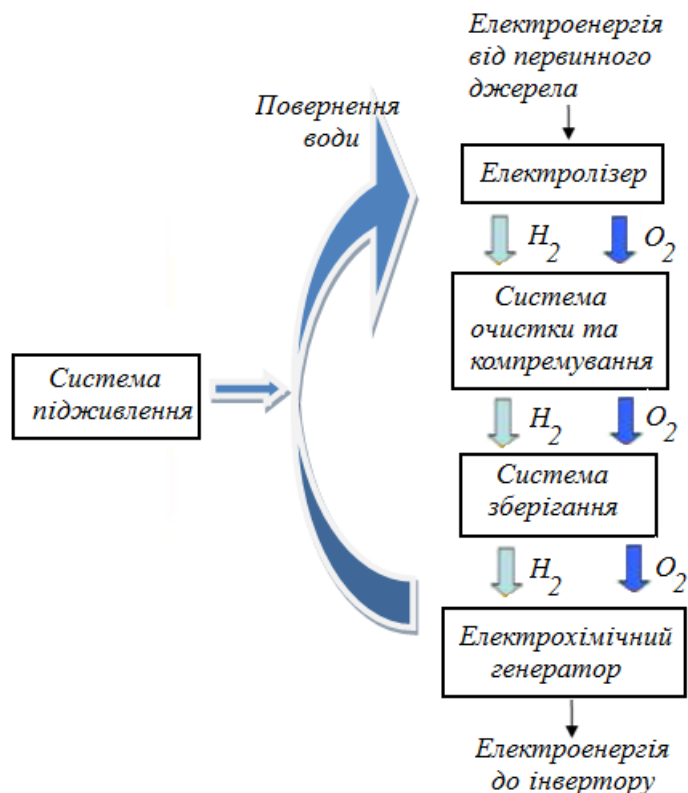


Рисунок 1.3 – Принципова схема реалізації водневого циклу акумулювання електроенергії з використанням електролізера і паливних елементів

При надлишковій генерації базового джерела або в години зниження споживання електроенергії генеруються водень і кисень, що проходять необхідні процедури очищення, осушення і компримування і запасуються в газгольдерах. При необхідності підтримки базового джерела енергії, гази подаються в паливні елементи.

Важливо відзначити ту обставину, що в водневому циклі потужність і енергоємність накопичувача розділені - потужність визначається параметрами генератора (паливного елемента або теплового двигуна), а ємність - запасами газів-реагентів.

Це дозволяє гнучко варіювати параметри накопичувача, а також практично повністю виключити явище саморозряду.

## 1.6 Суперконденсатори

Суперконденсатор є імпульсний електрохімічний пристрій, призначений для компенсації швидких перехідних процесів в різних електричних схемах. Від

акумуляторів різних типів він відрізняється істотно меншою енергоємністю (одиниці Вт·год/кг) і підвищеною питомою потужністю (2...10 кВт/кг) [1]. Відсутність фарадеевських процесів при роботі ДСК призводить до збільшення його ресурсу в порівнянні з акумуляторами, а також до відсутності обмежень по глибині його розряду.

Двошаровий суперконденсатор (ДСК) складається з двох пористих електропровідних електродів, розділених заповненим електролітом сепаратором. Процес запасання енергії в ДСК здійснюється за рахунок поділу заряду на двох електродах з досить великою різницею потенціалів між ними. Різниця потенціалів зазвичай визначається величиною напруги розкладання електроліту. Ця величина лежить в районі 1,23 В для водних електролітів (лугів і кислот) і в районі 2,5...4 В для органічних електролітів. Процеси, що відбуваються в подвійному електричному шарі (ДЕС) на кордоні розділу двох провідників, схожих на ті, які протікають в звичайному конденсаторі, проте в цьому випадку відстань між несучими різний заряд обкладинками складає кілька міжатомних довжин, так як фактично одна обкладка представлена електронами в електронному провіднику, згрупованих і в при поверхневому шарі, а друга - сорбованих на поверхні катода позитивними іонами електроліту (катіонами). На аноді шар формується за рахунок збіднення електронами електронного провідника і сорбції негативних іонів електроліту. Таким чином, для досягнення максимальної місткості необхідно забезпечити якомога більшу поверхню контакту електроліту з електронним провідником. Тому в якості електронного провідника зазвичай використовуються нанопористі вуглецеві матеріали. Рідкий електроліт зазвичай укладено в пористий полімерний або азбестовий сепаратор, що розділяє електроди, щоб уникнути короткого замикання. Для підвищення запасеної суперконденсатором енергії використовуються органічні електроліти з високою напругою розкладання.

З огляду на особливості суперконденсаторів, доцільно їх використання в гібридних схемах з акумуляторами. В цьому випадку суперконденсатор реагує на

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 21   |

короткі піки генерації або споживання електроенергії, збільшуючи ресурс акумулятора і знижуючи час відгуку всієї схеми на зовнішні впливи. Такі схеми можуть застосовуватися для підвищення якості електроенергії, що виробляється традиційними електроустановками та електропристроями на основі відновлювальних джерел енергії (згладжування флуктуацій напруги), в електротранспортних засобах і гібридних автомобілях (рекуперація енергії гальмування і розгін транспортного засобу), для забезпечення роботи рентгенівських установок і швидкого запуску ДГУ, особливо в умовах знижених температур.

### **1.7 Кінетичні накопичувачі (маховики)**

Принцип дії кінетичного накопичувача (КНЕ) або маховика заснований на перетворенні кінетичної енергії в електричну і назад. При заряді кінетичного накопичувача йде розкрутка масивного колеса до високої швидкості. Висока маса необхідна для збереження запасеної енергії протягом більшого часу за рахунок інерції. При розряді маховик обертає привід генератора до тих пір, поки втрати на тертя і переведення кінетичної енергії в електричну повністю не погасять цю інерцію. Такі системи можуть реагувати на зміну потужності в системі досить швидко і розвивати високу потужність, але для тривалого акумулювання великого запасу енергії потрібні великі капітальні витрати (будівництво групи КНЕ і забезпечення необхідних заходів безпеки, в основному пов'язаних з будівництвом захисного купола над маховиком на випадок його руйнування відцентровими силами або зриву з осі). По області застосування дана система близька до суперконденсаторів, але дозволяє працювати в діапазоні більш високих потужностей при меншому рівні капітальних витрат.

Основні дослідження, що проводяться в даний час, пов'язані з пошуком нових матеріалів, здатних забезпечити зниження ціни маховика при збереженні прийнятних міцності та зменшення рівня втрат на тертя, на розкрутку масивного тіла, на опір повітря. Для вирішення останнього завдання маховики розташовують в вакуумованому обсязі.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 22   |

## 1.8 Особливості вибору накопичувача

Розглянуті раніше типи накопичувачів і ніші їх застосування досить різноманітні. З чого випливає висновок про те, що рекомендувати якусь акумулюючу систему для всіх типів енергоустановок неможливо.

Проте, можна сформулювати деякі вимоги і обмеження, що полегшують проектувальнику вибір накопичувача для своєї системи. Так, наприклад, якщо мова йде необхідності регулювання енергетичних потоків в системі, де їх потужність обчислюється десятками і сотнями МВт, немає сенсу застосовувати дорогі та малопотужні електрохімічні накопичувачі, якщо тільки мова не йде про розподіл їх між кінцевими споживачами потужністю 10...100 кВт і подальшої злагодженої роботи під єдиною системою управління. Завдання управління великими енергетичними потоками потужного вітропарку, великої приливної електростанції або територіального комплексу на основі ВДЕ в масштабах регіону може бути вирішена за рахунок застосування ГАЕС або НЕСВ, а в ряді випадків - водневого циклу з тепловим двигуном. Застосування водневого циклу доцільно в системах, для яких характерна велика енергоемність при малій потужності і є обмеження за обсягом і масі накопичувача. У ніші малих енергоустановок з ВДЕ поки домінують СКА, однак постійний розвиток ЛПА в напрямку підвищення безпеки та зниження ціни, як за рахунок застосування нових матеріалів, так і нарощування обсягів виробництва укупі з такими «вродженими» недоліками СКА як мала енергоемність, низька допустима глибина розряду і малий ресурс в кінцевому підсумку може привести до часткового витіснення їх ЛПА. Застосування суперконденсаторів, маховиків і адіабатичних НЕСВ доцільно в системах з швидкоплинними процесами, причому ранжування цих трьох технологій в порядку убавання потужності наступне: НЕСВ, маховики, суперконденсатори. Нарешті, в складних системах з різними вимогами можуть бути застосовані гібридні накопичувачі електричної енергії, що включають в себе комбінації різних технологій, об'єднані єдиною системою перетворення і управління.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 23   |

## 1.9 Аналіз ефективності накопичувачів енергії

Кожен НЕ характеризується рядом стандартних показників, що описують параметри самого накопичувача: потужність, ємність, маса, ККД, ціна і термін служби. Крім того, для порівняння НЕ використовуються питомі показники: питома вартість енергії і питома вартість потужності (виражені в дол./кВт.год). Також існують такі показники як: питомі капіталовкладення на одиницю енергоемності, експлуатаційні витрати, умовна вартість електроенергії при роботі в автономному режимі.

Гелієві акумулятори енергії AGM володіють найкращими показниками питомих енергетичних витрат (мінімальних), практично для всіх типів транспортних засобів, крім легкового автомобіля (де кращі показники у свинцево-кислотних акумуляторів). Однак їх питомі потужності витрати в режимі зарядки значно гірше, ніж у інших типів НЕ, хоча кращі в режимі розряду. Кращий показник питомих потужних витрат в режимі зарядки у механічних накопичувачів, що дозволяє використовувати їх для режимів рекуперативного гальмування. Зберігати енергію найкраще в пневматичних накопичувачах, проте цілком прийнятні результати мають іоністори і акумулятори. Питомі енергетичні витрати при транспортуванні для механічних накопичувачів досягають 55% від витрат питомих витрат на створення накопичувача. Найменшими ці витрати є у іоністорів, що володіють малою масою. Як видно з наведеного вище аналізу показників різних типів НЕ, жоден з них не є оптимальним. Тому можливо застосувати для перспективного транспортного засобу комбінований НЕ, що складається з двох або трьох розглянутих вище типів, що дозволить реалізувати переваги кожного з типів, знівелювавши їх недоліки. Даний напрямок зараз інтенсивно розробляється для автомобільного транспорту, там розробляються гібридні НЕ. Управління перетіканням потужності між елементами тягової передачі пропонується проводити на основі інтелектуальної системи управління, яка контролює роботу, як накопичувачів, так і двигуна внутрішнього згоряння та інших двигунів.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 24   |

Через зростаючу кількість фактів використання енергоємних пристроїв виникає задача налагодження їх ефективної взаємодії з енергетичною інфраструктурою електрифікованого транспорту для зниження енергоємності перевізного процесу.

На даний час існує позитивний досвід експлуатації НЕ на метрополітенах і міському електротранспорті. На ТП переважно використовуються інерційні механічні НЕ, як найбільш узгоджені з електромеханічними характеристиками транспортних навантажень. Комплекс з 2...5 енергоблоків дозволяє акумулювати енергію потужністю 1,5...2,5 МВт, що дозволяє забезпечувати пуск та розгін двох електропоїздів до швидкості 60 км/год. Використання суперконденсаторних та надпровідних індуктивних НЕ в тягових мережах на даний час не отримало масового розповсюдження та знаходиться на стадії експериментальної експлуатації. Значення основних параметрів, що визначають властивості головних типів накопичувачів енергії, наведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Енергетичні та розрядні показники різних типів НЕ

| Тип НЕ                         |                   | Питома енергія,<br>Дж/г | Час виводу<br>енергії, с |
|--------------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------------|
| Зі статичною<br>активною зоною | Хімічний          | $10^2 \dots 10^5$       | $1 \dots 10^5$           |
|                                | Індуктивний       | $1 \dots 10$            | $10^{-3} \dots 10$       |
|                                | Ємнісний          | $0,1 \dots 0,5$         | $10^{-6} \dots 10^{-2}$  |
| З динамічною<br>активною зоною | Механічний        | $10 \dots 10^3$         | $1 \dots 10^3$           |
|                                | Електромеханічний | $1 \dots 10$            | $10^{-2} \dots 10$       |
|                                | Електродинамічний | $0,05 \dots 1$          | $10^{-3} \dots 10^{-2}$  |

На рис. 1.4 показано деякі обрані типи НЕ, причому для порівняння ефективності їх застосування наведені питомі енергії (відношення накопиченої енергії до маси накопичувача) та питомі потужності (відношення потужності заряду/розряду до маси накопичувача).

Таким чином, можна зробити висновки, що зараз в якості накопичувачів на транспорті можуть використовуватись різні типи акумуляторних елементів, вибір

яких повинен забезпечувати покриття як короткочасних, так і тривалих періодів електроспоживання та рекуперації.

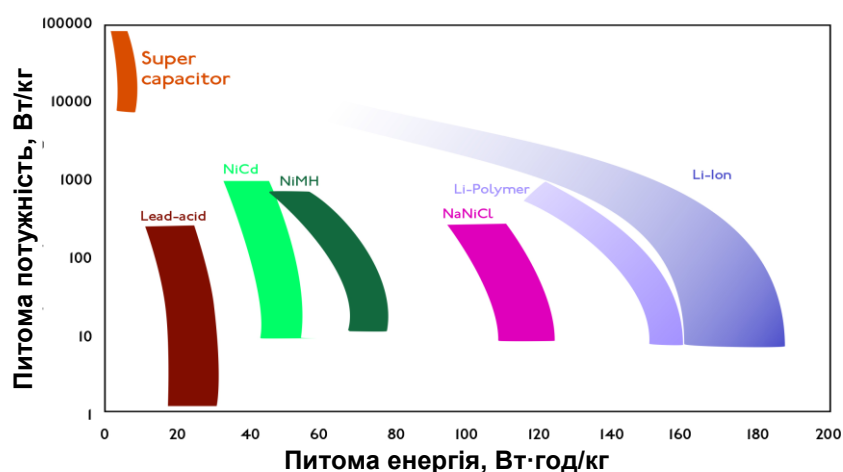


Рисунок 1.4 – Залежність питомої потужності від питомої енергії для різних накопичувачів електроенергії

При цьому для стаціонарного розташування, як правило, використовуються механічні або хімічні вторинні джерела електроенергії, а при бортовому розташуванні необхідна комбінація хімічних і суперконденсаторних елементів [8].

## 2 МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З НАКОПИЧУВАЧАМИ

### 2.1 Метод алгоритмічного моделювання процесу розподілу енергії рекуперації для системи тягового електропостачання

Для вивчення питань ефективності розподілу та використання енергії рекуперації на всіх рівнях підсистем електрифікованого транспорту найбільш зручним засобом є моделювання цих процесів. Це дозволяє дослідити вплив режимів тягового і зовнішнього електропостачання та організації руху електротранспорту на режим напруги в контактній мережі, рівень перетоків надлишкової рекуперативної енергії на суміжні МПЗ до віддалених тягових навантажень та її втрат в тяговій мережі, а також ефективність інших процесів (наприклад, споживання надлишкової енергії рекуперації первинною енергосистемою). При дослідженні ефективності передачі надлишкової енергії рекуперації в первинну енергосистему визначальним чинником є режими нетягових навантажень у вузлах приєднання ТП до живлячих ЛЕП (6, 10, 35, 110, 220 кВ). Враховуючи випадкову складову в даних режимах, а також короткочасний характер енергії рекуперації, аналіз перетоків надлишкової рекуперативної енергії в зовнішню енергосистему найбільш раціонально проводити з допомогою стохастичних або нечітких методів, в основі яких лежить моделювання графіків нетягових навантажень [9]. При цьому також можливо виконувати оцінку впливу даних перетікань на якість електроенергії в живлячих лініях. Крім цього моделювання дозволяє вивчати питання ефективності використання енергії рекуперації в перспективних СТЕ, що містять стаціонарні накопичувачі енергії, пункти підживлення КМ від відновлюваних джерел та ін.

Оптимізація режимів СТЕ за енергетичним критерієм базується на попередньому дослідженні даних режимів на основі моделювання та прогнозування режимів роботи СТЕ. Основу роботи імітаційних моделей становить формування і розрахунок миттєвих схем, під яким розуміється розрахунок струморозподілу схеми і визначення миттєвих значень наступних

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 27   |

параметрів: струмів фідерів, втрат напруги в місцях розташування навантаження, втрат електроенергії в тяговій мережі і ТП.

В основі моделювання розглядуваних процесів лежить спільне виконання тягових розрахунків та розрахунків миттєвих схем СТЕ [10]. На базі виконаних тягових розрахунків можуть бути визначені параметри електроспоживання та розташування транспортних засобів на ділянці, що при відомих параметрах СТЕ ділянки дозволить визначити можливі напрями поширення енергії рекуперації та її оптимальний напрям.

На рис. 2.1 представлені можливі канали розподілу енергії рекуперації транспортного засобу в елементах системи електричної тяги постійного струму з урахуванням можливості її накопичення на ТП та передачі в СЗЕ в межах однієї ТП.

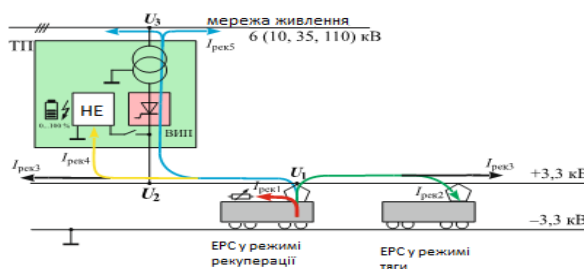


Рисунок 2.1 – Потоки розподілу енергії рекуперації в системі електротранспорту постійного струму

Енергія рекуперації в системі електротранспорту з класичною (некерованою) СТЕ розподіляється пропорційно відстані до її потенціальних споживачів (транспортних засобів в режимі тяги) та потужності їх тягових навантажень, при цьому відбувається її часткове розсіювання на елементах СТЕ.

В елементах СТЕ постійного струму (3,3 кВ) величина втрат  $\Delta W_{\text{рек}}$  може сягати значення 10...15 % від величини генерованої енергії  $W_{\text{рек}}$ , що близько до значення втрат енергії при тяговому електроспоживанні [11].

Природний розподіл енергії рекуперації в системі електротранспорту з некерованою СТЕ (навіть з урахуванням можливості її накопичення на ТП та передачі в СЗЕ) не завжди виявляється ефективним за енергетичним критерієм  $\Delta W_{\text{рек}}(L_{\text{рек}}) \rightarrow \min$ , що визначається можливим значним віддаленням від рекуперуючого ЕРС споживача найбільшої потужності або інвертуючих (накопичувальних) ТП.

Оптимальний розподіл енергії  $W_{\text{рек}}$  в тяговій мережі може бути досягнуто при переході до концепції так званого керованого (гнучкого, інтелектуального) тягового електропостачання. При цьому керуючі органи СТЕ будуть знаходити канали перерозподілу енергії  $W_{\text{рек}}$  за енергетичним критерієм в залежності від дислокації тягових навантажень на фідерній зоні та їх потужності, а також накопичувачів та інверторів енергії, режимів напруги на вводах на ТП. При цьому обмежувальним фактором оптимального управління є забезпечення надійності тягового електропостачання поїздів на ділянках. У такому випадку при наявності надлишкової енергії рекуперації залежно від рівня попереднього заряду накопичувачів і режимів зовнішньої мережі повинні прийматися рішення про підключення накопичувачів або інверторів енергії, або плавному зниженні напруги на шинах ТП в діапазоні допустимих значень. Крім того, принцип гнучкого розподілу енергії  $W_{\text{рек}}$  дозволить вирішити науково-практичну задачу визначення оптимальних місць розташування накопичувачів і інверторів енергії, а також пристроїв плавного регулювання напруги на шинах ТП під навантаженням при мінімізації кількості і встановленої потужності додаткового енергозберігаючого електрообладнання в СТЕ (накопичувачів, інверторів, регуляторів напруги на шинах ТП, пунктів підживлення тощо) [12].

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 29   |

## 2.2 Реалізація конкретної моделі зони рекуперації

Розглянемо реалізацію моделі (у вигляді структурної схеми) однієї з зон рекуперації, що представлено на рис. 2.2.

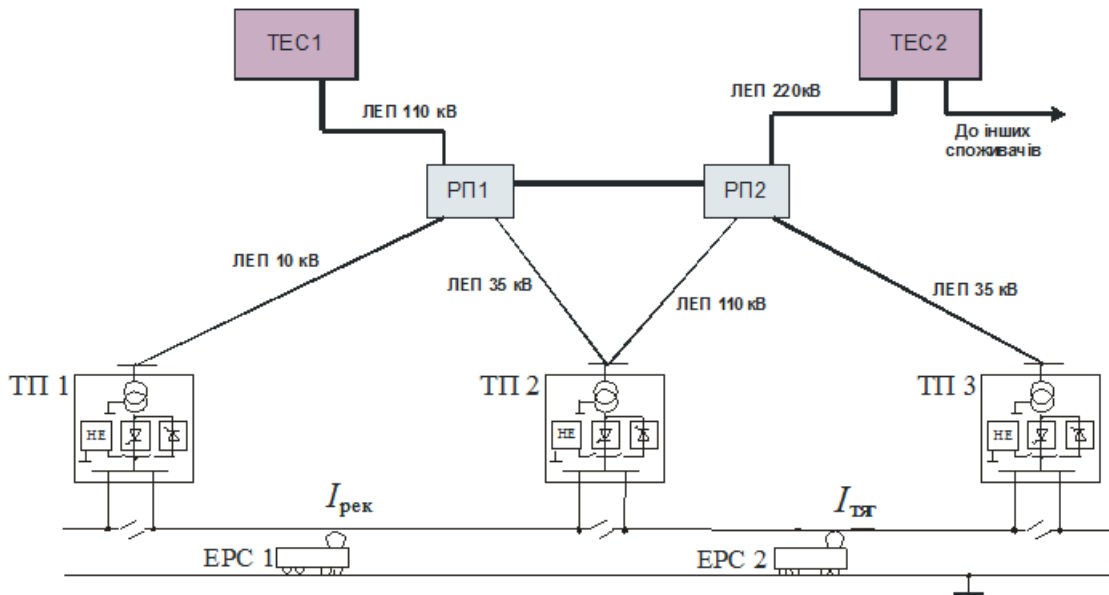


Рисунок 2.2 – Структурна схема зони рекуперації

Сформована структурна схема ділянки споживання енергії рекуперації моделює багатоваріантність структури задіяних тягових підстанцій і поїзної ситуації. Структура одноколіїної ділянки для випадку використання всіх одиниць обладнання, задіяних у розподілі надлишкової енергії рекуперації представлена на рис. 2.3.

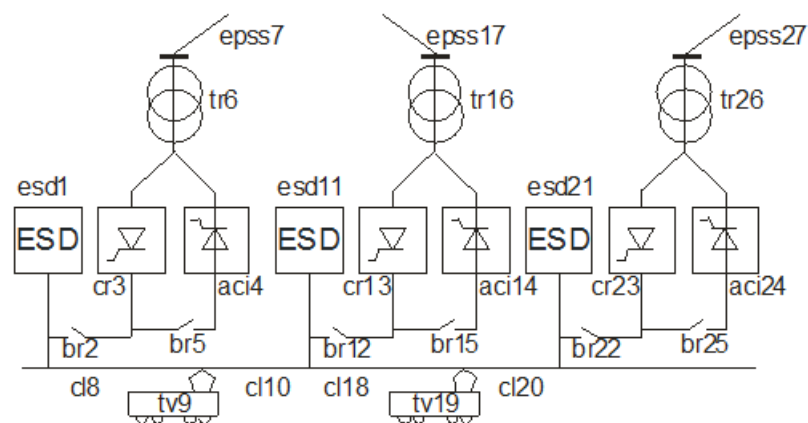


Рисунок 2.3 – Структура ділянки розподілу енергії рекуперації

Атрибутика елементів схеми формується пристроями вимірювання та передачі інформації і експертними висновками.

Розроблений метод моделювання заснований на можливостях КПС в новій предметній області. Термінальний алфавіт семантично наповнений образами електрообладнання, тягової мережі і споживачами електроенергії, обладнання – відповідною атрибутикою.

Наведений окремий випадок формування структурної схеми демонструє всі можливості КПС стосовно до даної задачі.

В рамках обраного напрямку досліджень необхідно розробити необхідні інструментальні програмні засоби для формування структурних схем зон споживання енергії рекуперації, отримання експертних рішень з управління та формування нейрофазі мереж прийняття рішень.

Запропонований новий підхід до вирішення задачі раціонального використання енергії рекуперації полягає в застосуванні методів і засобів штучних нейронних мереж, експертних систем і нечіткої логіки і математико-алгоритмічного конструктивізму.

Представлені методи конструктивно-продукційного моделювання структури зони розподілу енергії рекуперації в системі тяги постійного струму виконані на базі конкретизації КПС, яка дозволяє врахувати всі можливості і особливості сучасного обладнання систем тягового електропостачання, ділянок тягової мережі і поїзної ситуації.

### **2.3 Раціональне управління енергообмінними режимами накопичувача**

Управління процесами енергообміну в НЕ для систем загальної енергетики та електричної тяги відрізняються. У загальній електроенергетиці НЕ повинен забезпечувати постійний рівень відбору електроенергії від генеруючої системи, компенсуючи відхилення від середнього значення потужності. Рівень енергоспоживання, при якому НЕ перемикається з зарядного режиму на розрядний і навпаки та величина його енергоемності встановлюються шляхом

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 31   |

статистичного моделювання графіків навантажень з урахуванням заданого значення показника, що характеризує нерівномірність споживання потужності від джерела. В системі електричної тяги, де наявним є як споживання так і рекуперація енергії, управління процесом енергообміну НЕ є більш складним і потребує застосовування інших алгоритмів, які дозволяють ефективно узгоджувати роботу НЕ в режимі демпфера пікових навантажень та буфера надлишкової енергії рекуперації [13]. По-перше, тут треба чітко розрізняти, коли має місце рекуперація з надлишком потужності, що віддається в порівнянні зі споживанням. Інший режим – це коли споживана потужність перевищує ту, що віддається. У першому випадку алгоритм управління НЕ простий – він повинен поглинати всю надлишкову енергію і його параметри мають бути обрані саме по цьому режиму. У другому випадку принцип управління енергообміном може варіюватися між двома крайніми випадками: реалізується алгоритм максимально швидкого розряду НЕ та віддачі накопиченої енергії з метою поглинання наступної порції енергії рекуперації або процес віддачі енергії регулюють за принципом підтримання певного рівня споживаної від енергосистеми значення потужності або мінімально допустимого рівня напруги на фідерах [14].

Побудова системи керування НЕ визначається наявністю датчиків для реалізації зворотних зв'язків, що вимірюють для порівняння споживані потужності (струми) з тяговою і зовнішньої мережі та датчиків напруги на шинах ТП та власне НЕ (рис. 2.4).

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 32   |

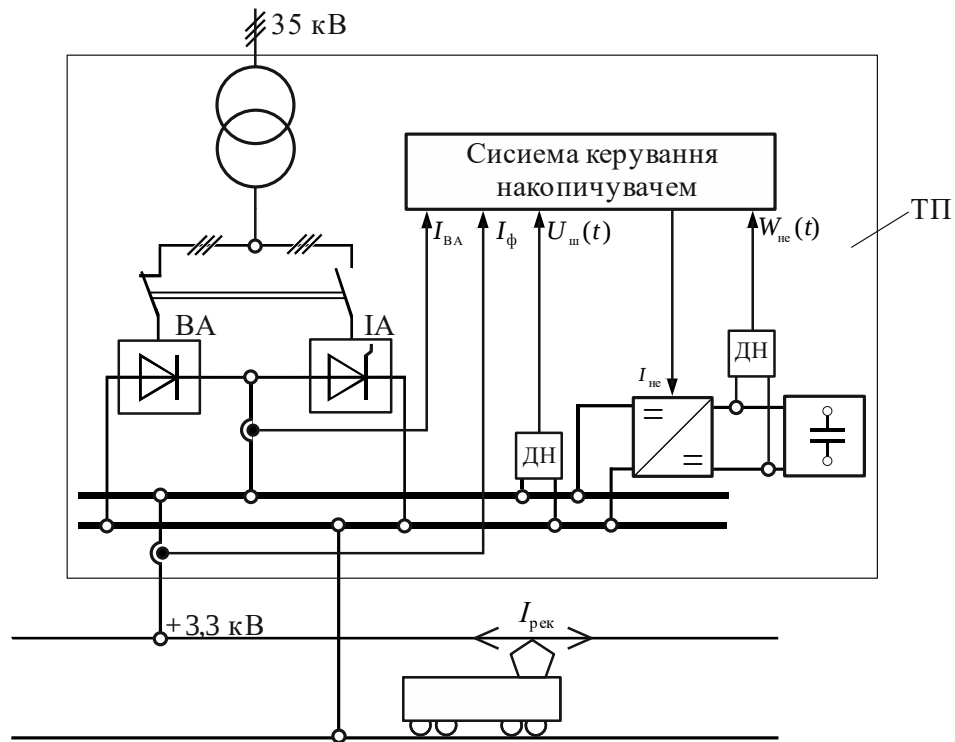


Рисунок 2.4 – Структурна схема керування режимом енергообміну НЕ

Можливе регулювання тільки за сигналами датчика напруги на фідерах ТП, коли при підвищенні напруги вище рівня холостого ходу НЕ включатися в режим поглинання, стабілізуючи напругу на шинах в заданих межах.

## 2.4 Модель системи електропостачання електричного транспорту

Розрахунки складних режимів електроспоживання електричного транспорту, як правило, виконується на спеціально розроблених моделях. При цьому сучасні середовища на зразок MatLab не дозволяють безпосередньо виконувати такі розрахунки. Використати беззаперечні переваги сучасних середовищ можна за допомогою розробленої концепції динамічного моделювання режимів тягових мереж, в яких використано поєднання керованих джерел струму та змінних за аналітичними функціями опорів тягової мережі. Таким чином, зміна значення струму дозволяє врахувати у часі режим електроспоживання окремого взятого навантаження, а зміна опору тягової – його переміщення у просторі відповідно до графіку руху [15].

Приклад реалізації такої концепції для одноколійної ділянки з консольним живленням, довжиною плеча  $x_0$  та питомим опором тягової мережі  $r_0$

представлений на рис. 2.5 та рис. 2.6. Даний приклад розглядає всі можливі випадки знаходження на ділянці трьох навантажень.

Функції опору даної ділянки для одного з плечей живлення описуються наступними виразами:

$$R_1(x_1) = \begin{cases} r_0(x_0 - x_1), & \text{при } x_0 \leq x_1, \\ 0, & \text{при } x_0 > x_1 \end{cases}, \quad (2.1)$$

$$R_2(x_1, x_2) = \begin{cases} r_0(x_1 - x_2), & \text{при } x_1 \leq x_0, x_2 \leq x_0 \\ r_0(x_0 - x_2), & \text{при } x_0 > x_1, x_2 \leq x_0, \\ 0, & \text{при } x_1 > x_0, x_2 > x_0 \end{cases} \quad (2.2)$$

$$R_3(x_2, x_3) = \begin{cases} r_0(x_2 - x_3), & \text{при } x_2 \leq x_0, x_3 \leq x_0 \\ r_0(x_0 - x_3), & \text{при } x_2 > x_0, x_3 \leq x_0, \\ 0, & \text{при } x_2 > x_0, x_3 > x_0 \end{cases} \quad (2.3)$$

$$R_\phi(x_1) = \begin{cases} 0, & \text{при } x_1 \leq x_0, \\ \infty, & \text{при } x_1 > x_0, \end{cases} \quad R_\phi(x_2) = \begin{cases} 0, & \text{при } x_2 \leq x_0, \\ \infty, & \text{при } x_2 > x_0, \end{cases} \quad R_\phi(x_3) = \begin{cases} 0, & \text{при } x_3 \leq x_0, \\ \infty, & \text{при } x_3 > x_0, \end{cases} \quad (2.4)$$

де  $R_1(x_1)$ ,  $R_2(x_1, x_2)$ ,  $R_3(x_2, x_3)$  – відповідно опори тягової мережі між поїздами і ТП в залежності від їх положення і положення інших поїздів.

Опори що визначаються виразами (2.1)...(2.4) є фіктивними, що виконують функцію приналежності струму поїзда до того плеча живлення тягової мережі, що відповідає координаті поїзда.

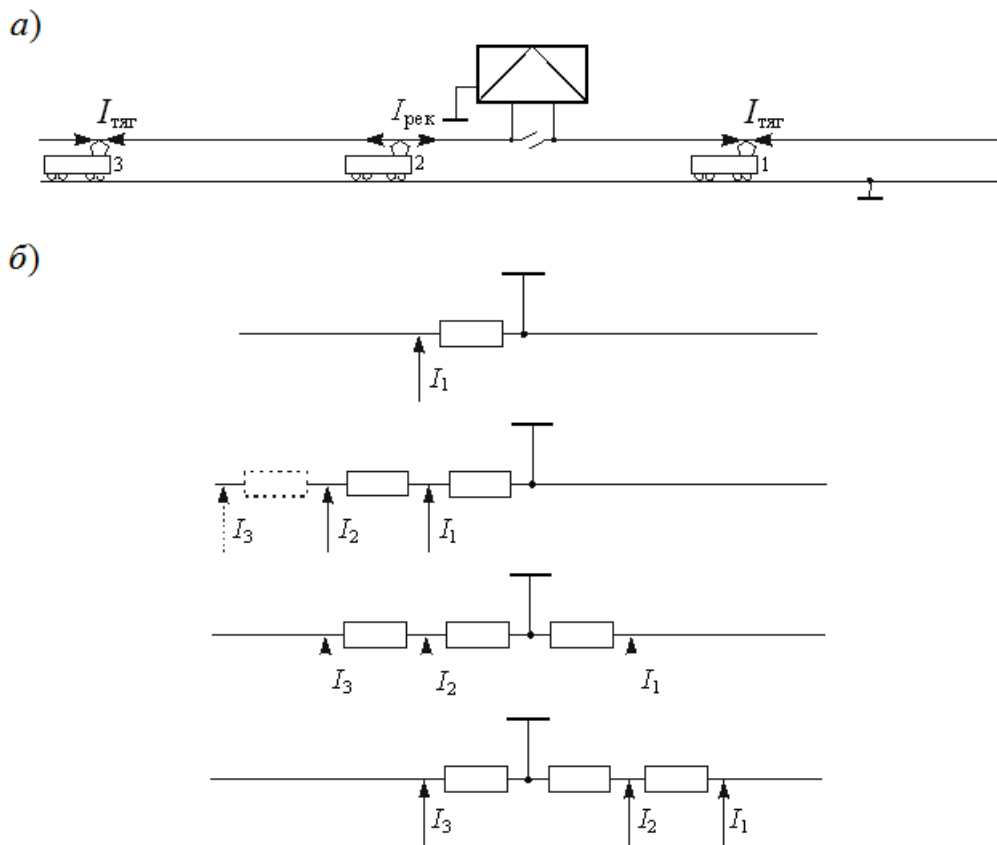


Рисунок 2.5 – Одноколіійна ділянка СТЕ (а), схема її заповнення навантаженнями (б)

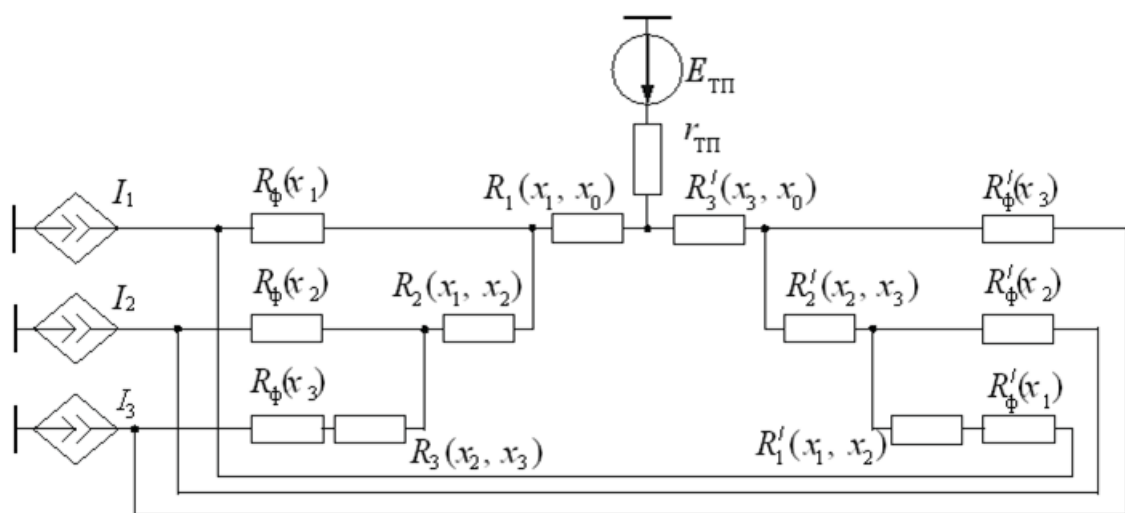


Рисунок 2.6 – Миттєва схема заміщення одноколіійної ділянки СТЕ

Для схеми заміщення ТП з випрямлячем зовнішня характеристика в загальному випадку будується за формулою [16]:

$$U(I) = E_{\text{вн}} - I\rho_{\text{вн}}, \quad (2.5)$$

де  $E_{\text{вн}}$  – ЕРС джерела, що відповідає напрузі холостого ходу випрямленої напруги на шинах ТП;

$I$  – струм ТП;

$\rho_{\text{вн}}$  – внутрішній опір ТП в режимі випрямлення струму для номінального режиму.

З огляду на односторонню провідність ТП постійного струму без інверторів розрахунок миттєвих схем СТЕ при наявності в тяговій мережі надлишкового струму рекуперації не повинен допускати зворотних струмів через вітки ТП, що не забезпечує рівняння зовнішньої характеристики ТП виду (2.10). У такому випадку аналіз усталених режимів СТЕ, строго кажучи, повинен здійснюватися на базі розв'язання системи нелінійних рівнянь стану миттєвих схем СТЕ. Рівняння зовнішньої характеристики ТП при цьому має враховувати її однобічну провідність, тобто рівняння (2.5) необхідно доповнити спадом напруги на випрямлячі, тобто

$$U(I) = E_{\text{вн}} - I\rho_{\text{вн}} - U_{\text{VD}}(I). \quad (2.6)$$

З достатнім ступенем точності ВАХ ідеального випрямляча для отримання односторонньої провідності ТП може бути апроксимована експонентною функцією виду

$$U_{\text{VD}}(I) = -ae^{-bI}. \quad (2.7)$$

У формулі (2.7) коефіцієнти  $a$ ,  $b$  позитивні дійсні числа, причому ВАХ наближається до характеристики ідеального випрямляча при виборі їх значень в області допустимих напруг і струмів ТП таким чином, щоб  $a \rightarrow 0$ , а  $b \rightarrow \infty$ . При цьому забезпечується одностороння провідність ТП, що при холостому ході ТП ( $I = 0$ )  $U_{\text{VD}}(0) \approx 0$ , у режимі видачі енергії ТП ( $I > 0$ )  $U_{\text{VD}}(I) \rightarrow 0$ , а коли напруга на

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 36   |

шинах ТП стає більше напруги холостого ходу (у випадку рекуперації і відсутності споживача  $U_{\text{ш ТП}} > U_{\text{xx}} = E_{\text{вн}}$ ) струм через гілку з ТП не протікає ( $I = 0$ ). В даному випадку ТП якби «закривається» і припиняє живлення тягових навантажень, а через її шини відбувається перетік надлишкової енергії рекуперації на сусідню МПЗ до віддалених тягових навантажень (при умові що за граничнодопустимою напругою на струмоприймачі рекуперація не припинилася).

Загальний вигляд імітаційної моделі на підставі запропонованої концепції створеної для середовища MatLab представлено на рис. 2.7.

В структурі моделі на рис. 2.7 можна виділити наступні елементи: 1 – блоки системи зовнішнього електропостачання; 2 – блоки визначення витрати електроенергії; 3 – блоки змінних опорів тягової мережі; 4 – блоки керованих джерел струму; 5 – підсистеми накопичувачів з підключенням через перетворювач та прямим підключенням.

Система зовнішнього електропостачання моделюється трифазним джерелом потужності та перетворювачем, який може бути як випрямлячем так і інвертором.

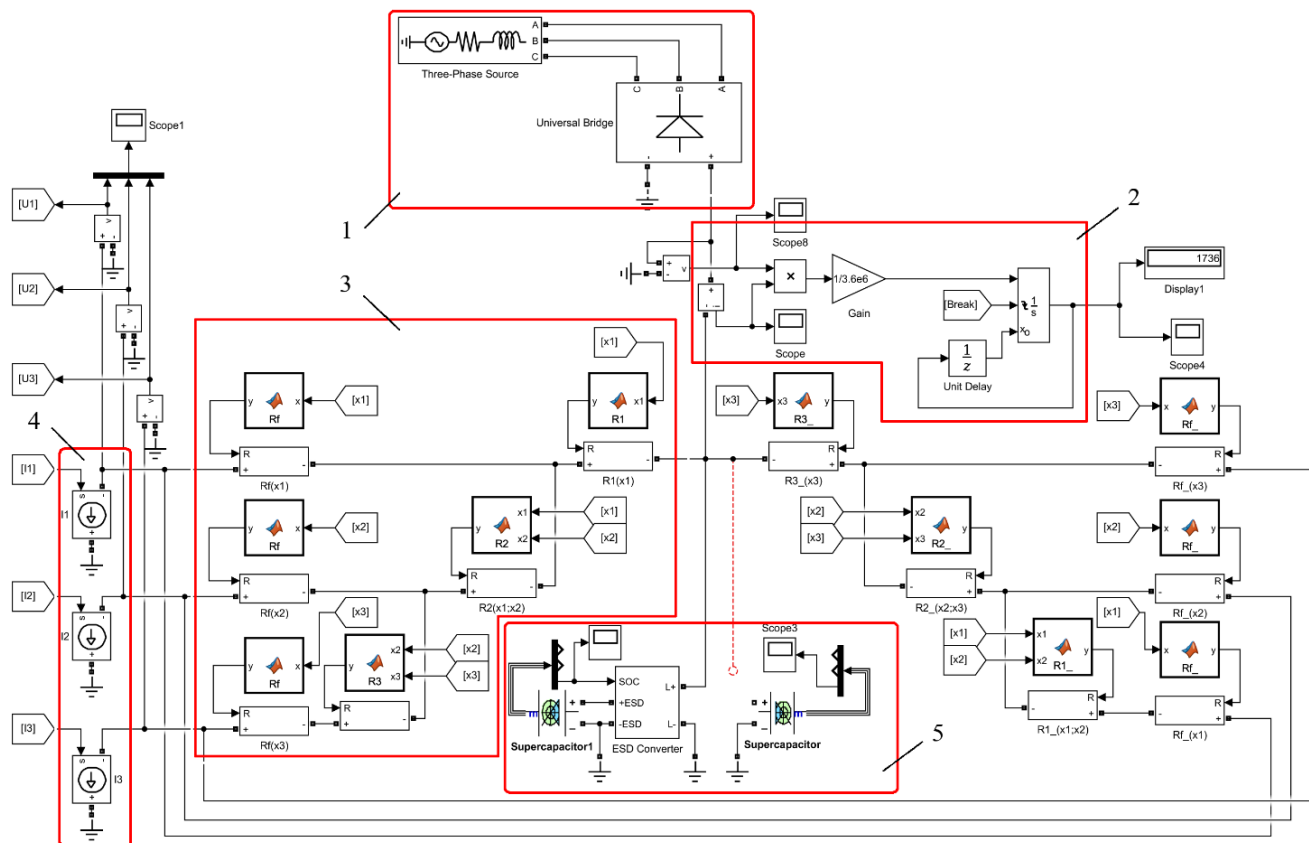


Рисунок 2.7 – Імітаційна модель системи тягового електропостачання

Для визначення витрат електроенергії використовується інтегрування добутку струму підстанцій та напруги на її шинах. Для унеможливлення впливу різкої зміни струму та напруги, які виникають при зривах рекуперації використовується скидання інтегратора з встановленням початкового значення, яке отримане на попередньому кроці.

Змінний опір тягової мережі в межах вирішення даної задачі моделюється керованим джерелом напруги (рис. 2.8, а). Значення напруги джерела визначається добутком протікаючого через нього струму та необхідного значення опору  $R$ , яке визначається записом формул (2.6)...(2.9) у вигляді MatLab-функцій. У випадках коли  $R$  може приймати нескінченне значення для забезпечення коректної топології послідовно з джерелом напруги слід включити довільний опір, який в інших випадках шунтується вимикачем (рис. 2.8, б).

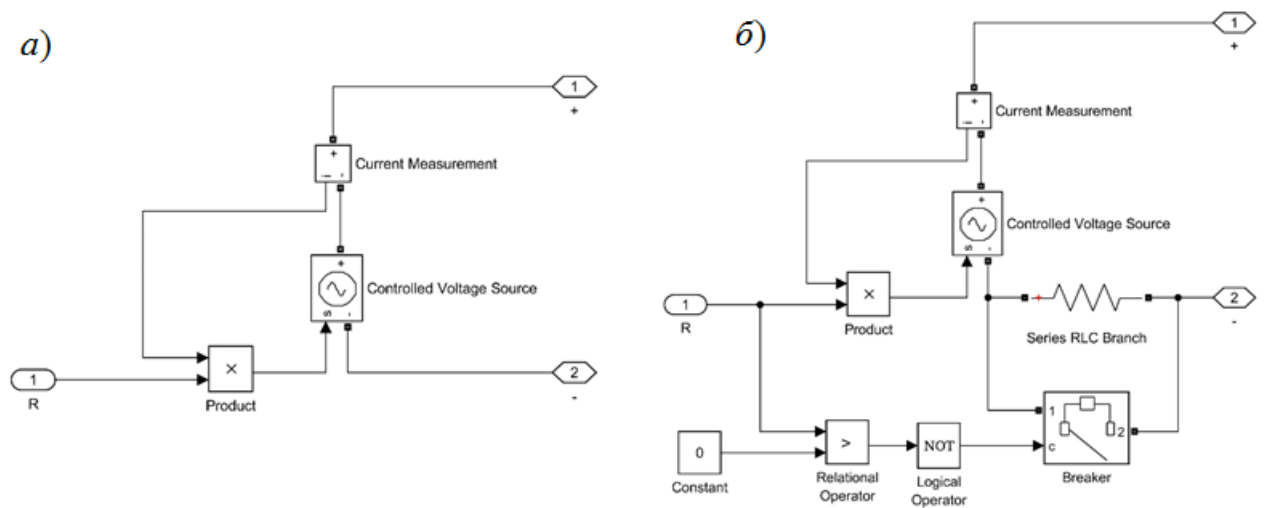


Рисунок 2.8 – Підсистеми змінного опору тягової мережі на основі керованого джерела напруги

Окремо містяться підсистеми організації вхідних даних та коригування (рис.2.9), задача яких на підставі глобальної змінної часу моделювання *Time* сформуванати для кожного навантаження інформацію про його місцезнаходження ( $x1, x2, x3$ ), споживаний струм ( $I1, I2, I3$ ) та напругу на струмоприймачі ( $U1, U2, U3$ ) відповідно до тягових розрахунків.

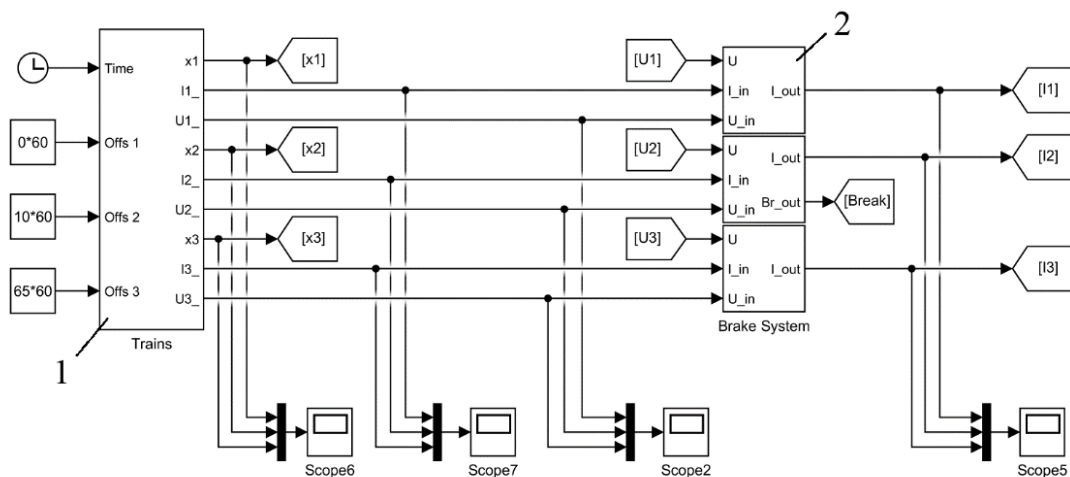


Рисунок 2.9 – Підсистеми обробки вихідних даних та їх коригування відповідно до режимів напруги

Формування масиву інформації виконується за допомогою організації вхідних даних у вигляді двовимірних масивів (рис. 2.10), першою розмірністю якого виступає час, а друга залежить від типу інформації (координата, струм,

напруга). Вихідний графік руху поїздів формується за рахунок уведення зміщень у часі ( $Offs1$ ,  $Offs2$ ,  $Offs3$ ) з відповідним їх відніманням від глобальної змінної часу  $Time$ .

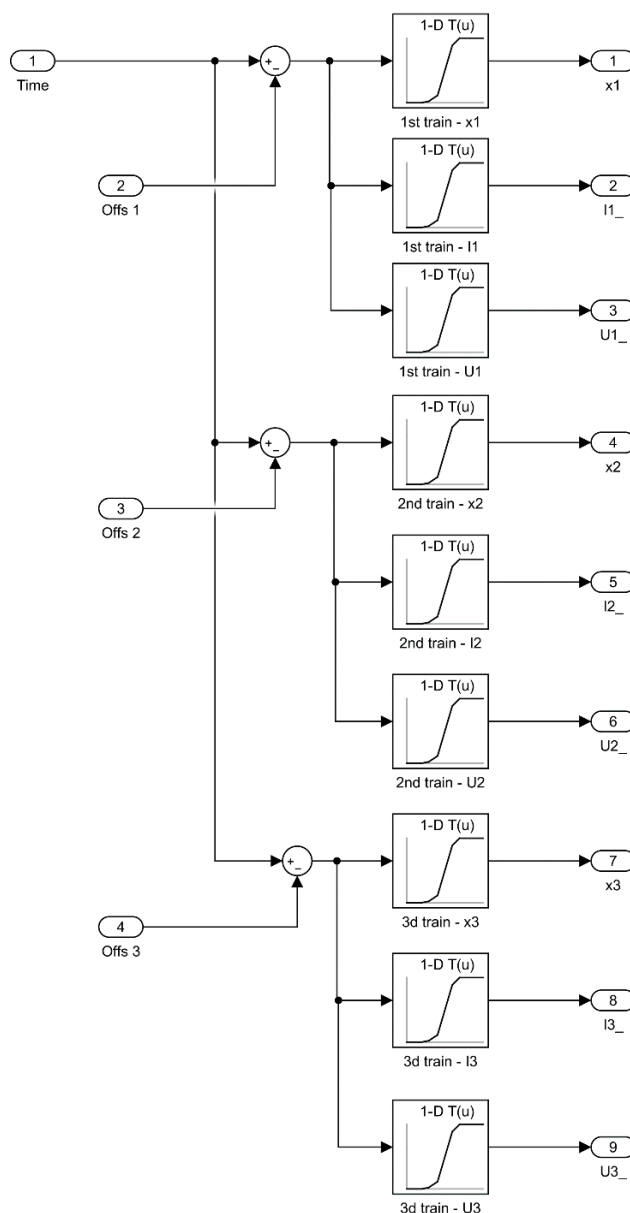


Рисунок 2.10 – Організація вводу вхідних даних за допомогою двовимірних табличних масивів

Коригування вхідних даних здійснюється з метою забезпечення відповідності споживаної потужності навантаженнями фактичному рівню напруги в тяговій мережі, отриманому в результаті моделювання. Коригування реалізується на підставі перерахунку струму навантаження шляхом віднесення

визначеної тяговим розрахунком потужності до усередненої напруги в тяговій мережі (рис. 2.11).

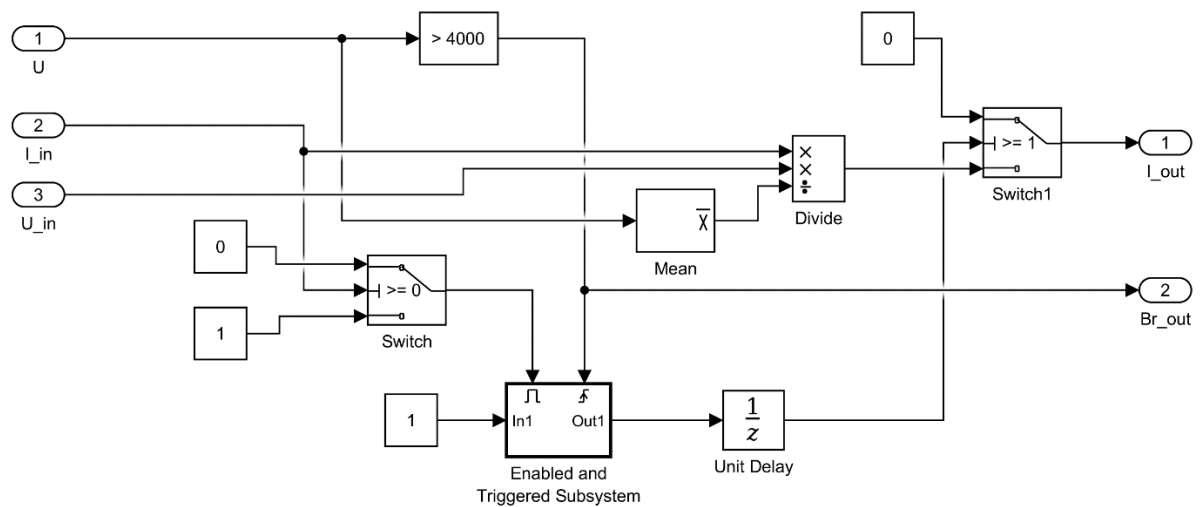


Рисунок 2.11 – Підсистема коригування струму навантаження

Підсистема також реалізує моделювання зривів рекуперації, які виникають при збільшенні напруги в інтервалі застосування рекуперації більше 4000 В. В такому випадку вихідний струм навантаження з початку зриву рекуперації і до кінця інтервалу гальмування дорівнюватиме нулю. Можливе також налаштування підсистеми для зменшення струму рекуперації до гранично можливого рівня за умовами системи електропостачання.

Дослідження роботи системи електропостачання при наявності накопичувачів можна виконувати при їх безпосередньому приєднанні до тягової мережі та через зарядно-розрядний перетворювач [17]. В першому випадку номінальна напруга накопичувача обирається відповідно до режимів роботи тягової мережі. При використанні перетворювача номінальна напруга накопичувача може бути меншою. Модель перетворювача пропонується виконати у вигляді двох керованих джерел струму з слідкуючою системою за заданою характеристикою переходу між режимами накопичення, зберігання та віддачі електроенергії (рис. 2.12).

В режимі накопичення джерело *Source2* навантажує тягову мережу струмом, що визначається відповідно до заданої характеристики напругою

мережі. Визначена шляхом добутку напруги і струму, споживана із тягової мережі потужність переводиться через номінальну напругу накопичувача у струм його заряду, який з коефіцієнтом втрат керує джерелом *Source1*, до якого приєднується накопичувач *ESD*. Коефіцієнт втрат обирається таким чином, що в режимі заряду до накопичувача передається 90 % енергії з мережі, а в інверсному режимі розряд відбувається потужністю 110 % від необхідної. Таким чином можна враховувати втрати на перетворення енергії в обох режимах роботи.

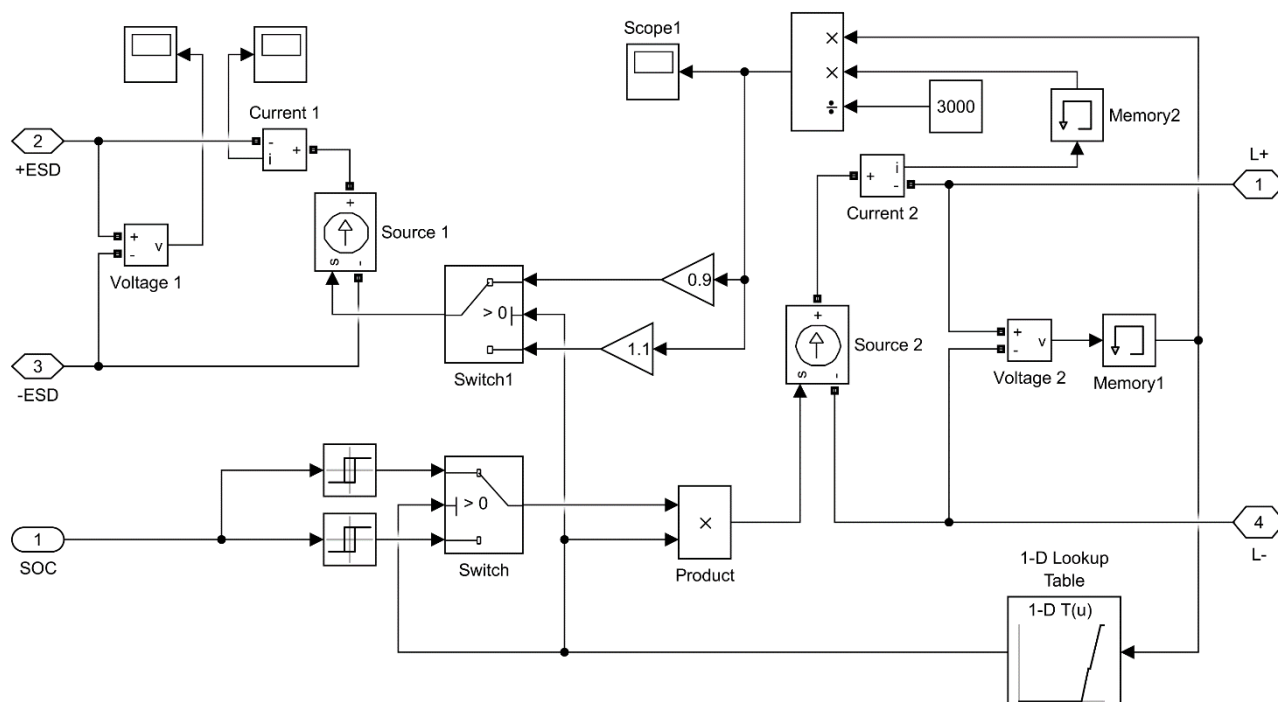


Рисунок 2.12 – Підсистема зарядно-розрядного пристрою накопичувача

Зворотний зв'язок за рівнем заряду накопичувача *SOC* дозволяє роботу джерела струму поки заряд накопичувача менше 100 % у режимі заряду та, відповідно, більше 0 % у режимі розряду.

Важливим етапом при моделюванні режимів СТЕ при рекуперації електроенергії на ділянках є визначення адекватної моделі ЕРС в режимі рекуперації, який працює паралельно з системою електропостачання на тягове навантаження і являє собою рухоме джерело енергії, параметри якого залежать від параметрів гальмування і режиму СТЕ. При короткочасному гальмуванні в КМ генеруються нетривалі імпульси електроенергії (3...15 с), тому в режимі

рекуперації ЕРС в загальному випадку являє собою джерело нестабілізованої енергії. На відміну від моделей джерел, що розглядаються в класичній теорії кіл, побудова адекватної моделі ЕРС в режимі рекуперації для завдань дослідження ефективності розподілу та використання рекуперативної енергії вимагає врахування параметрів руху ЕРС (параметрів режиму гальмування), рівня тягового навантаження в зоні рекуперації, напруги на шинах ТП і ряду інших.

При побудові моделі ЕРС в режимі рекуперації електроенергії необхідно виділити два характерні різновиди рекуперативного гальмування [18]:

- тривала рекуперація при гальмуванні з метою обмеження швидкості руху на зтяжному спуску (при постійній швидкості), коли переважно реалізується потенційна енергія поїзда;

- короткочасна рекуперація при гальмуванні для зупинки, зниження або стабілізації швидкості руху, коли короткочасно реалізується кінетична (потенційна) енергія поїзда.

У першому випадку гальмування, особливо при незмінному ухилі і достатньому рівні тягового навантаження в зоні рекуперації, процес генерації є стійким а енергія стабілізованою (практично постійний струм рекуперації). Це властиво магістральному руху при пригальмовуванні поїзда на зтяжному спуску, де в залежності від довжини ухилу і швидкості руху рекуперація може тривати 2...20 хв. У другому випадку енергія що генерується має короткочасний характер, що зазвичай зустрічається при гальмуванні в циклічному русі для зупинки, або коли рекуперація використовується для підтримки заданої швидкості руху поїзда за рахунок автоматичних переходів з режиму тяги в рекуперацію і навпаки (при коливаннях профілю колії), при яких генерація енергії триває близько 0,05...1,5хв.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 43   |

### З ПОРІВНЯННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ НАКОПИЧУВАЧА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДЛЯ РІЗНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ

Для дослідження ефективності режиму енергообміну накопичувача в системі з тяговим навантаженням обрана одноколійна ділянка тягової мережі постійного струму номінальною напругою 3,3 кВ, що включає три тягові підстанції, одна з яких може бути обладнана накопичувачем електроенергії. Ємність накопичувача прийнята рівною 300 Ф, що на сьогодні є прийнятним значенням за технологічною доступністю та вартісними показниками [19].

Розглянемо випадок, коли ділянкою проходять три поїзди за графіком руху (рис. 3.1) таким чином, що великоваговий поїзд, обладнаний рекуперацією, слідує між двома легковаговими.

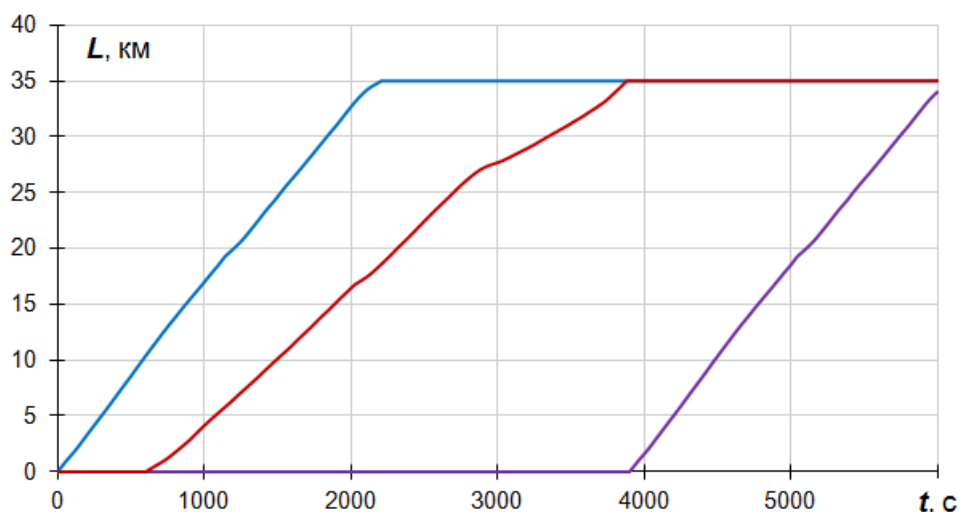


Рисунок 3.1 – Графік руху поїздів на ділянці

Профіль колії на ділянці обрано таким, що поїзди на ділянці ТП 1-2 знаходяться в режимі тяги та вибігу, а на ТП 2-3 частково в режимі вибігу та рекуперативного гальмування. Режим руху поїздів обрано такими, що процеси тягового електроспоживання і рекуперації поїздів на суміжних ділянках не співпадають в часі, що є найбільш розповсюдженим випадком, тому для отриманого надлишку електроенергії необхідно визначити найбільш ефективний спосіб її реалізації. Надлишковий струм рекуперації в такому разі буде описуватися як:

$$I_{\text{надп.р}}(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } I_T(t) \geq |I_p(t)| \\ I_T(t) - I_p(t) & \text{при } I_T(t) < |I_p(t)| \end{cases}$$

Після виходу поїзда 1 за межі розглядуваної ділянки і входу великовагового поїзда 2 на ділянку ТП 2-3, на ділянку ТП 1-2 заходить поїзд 3, що споживає енергію за тим же графіком що і поїзд 1 (рис.3.2). При цьому поїзд 3 частково може підживлюватись від накопичувача. На основі тягових розрахунків для даної ділянки (ТП 1-3) визначенні графіки струмів поїздів (рис. 3.3), що формуються профілем, режимом руху та масою поїзда.

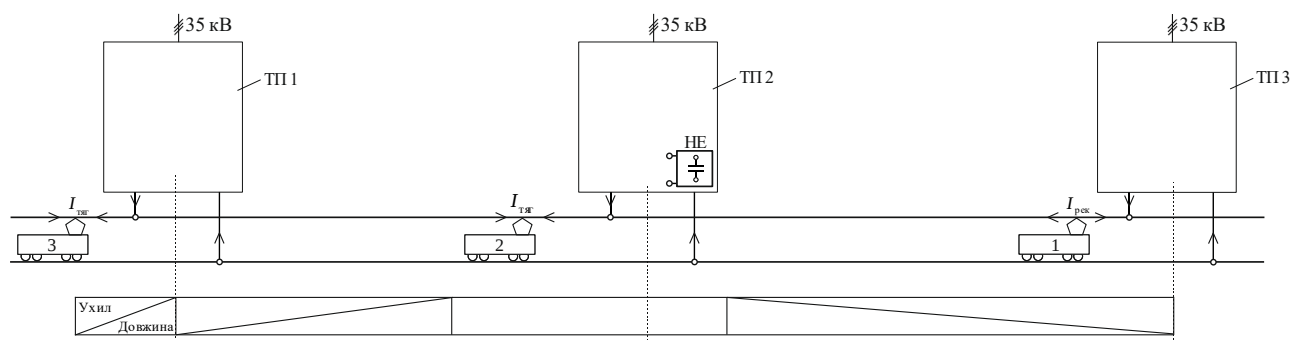


Рисунок 3.2 – Структурна схема дослідної ділянки

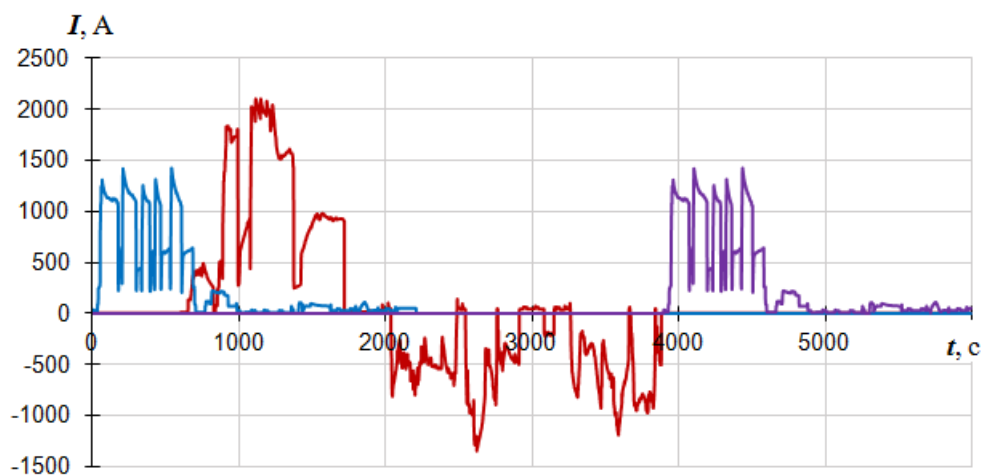


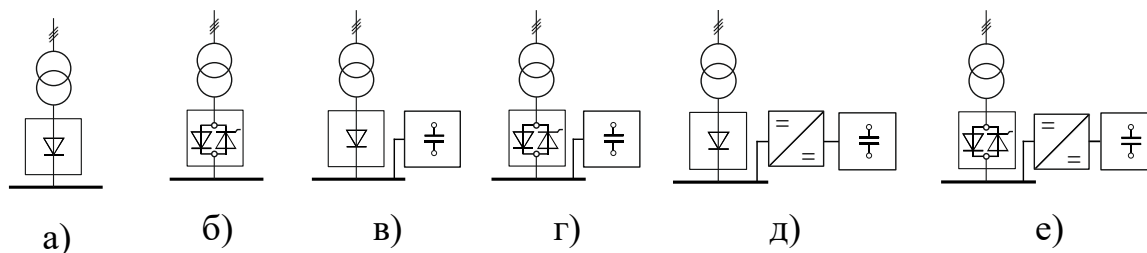
Рисунок 3.3 – Вихідні графіки струмоспоживання поїздів

Розглядалися наступні варіанти комплектації обладнання тягової підстанції:

- випрямний та інверторний перетворювач;

- випрямний перетворювач з керованим та некерованим накопичувачем;
- інверторний перетворювач з керованим та некерованим накопичувачем.

Варіанти структурних схем, що використовувались при моделювання приведені на рис. 3.4.



а – випрямляч без накопичувача; б – інвертор без накопичувача; в – випрямляч з некерованим накопичувачем; г – інвертор з некерованим накопичувачем; д – випрямляч з керованим накопичувачем; е – інвертор з керованим накопичувачем

Рисунок 3.4 – Варіанти структурної схеми ТП

На рис. 3.5 представлена вольт-амперна характеристика зарядно-розрядного пристрою, що представляє собою перетворювач постійно-постійної напруги та призначений для керування енергообмінним режимом накопичувача в необхідних межах [20]. Параметрами перетворювача виступають напруги  $U_1 \dots U_4$  та струми  $I_0$ ,  $I_{\min}$  та  $I_{\max}$ , значеннями яких можливо регулювати глибину та швидкість заряду і розряду накопичувача.

Для всіх випадків напруга холостого ходу тягової підстанції приймалась на рівні 3,5 кВ.

Для забезпечення рівних умов моделювання в різних структурних схемах початковий рівень заряду накопичувача обирався наступним чином. В схемах з некерованим накопичувачем початковий рівень заряду суперконденсаторів дорівнює напрузі холостого ходу в точці підключення, що виключає наявність перехідного процесу в початковий момент моделювання та його вплив на загальну витрату електроенергії. Для схем з керованим накопичувачем – таким

чином, щоб початковий рівень заряду накопичувача дорівнював його заряду в кінці розглядуваного інтервалу часу.

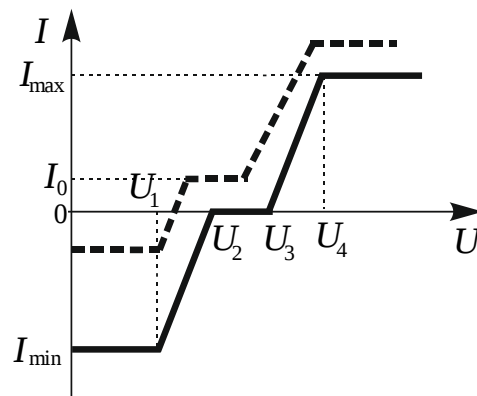
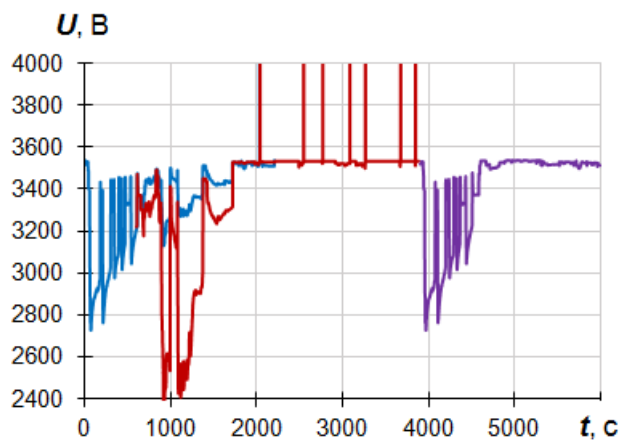


Рисунок 3.5 – Загальний вигляд вольт-амперної характеристики зарядно-розрядного перетворювача накопичувача

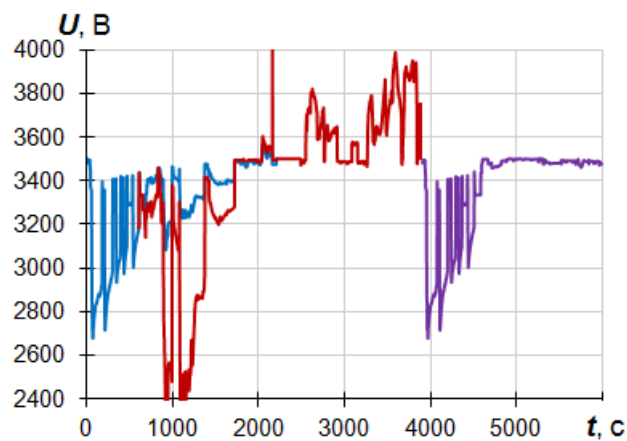
В результаті моделювання роботи різних структур ТП СТЕ (рис. 3.4) були визначені часові залежності напруг на струмоприймачах поїздів (рис. 3.6), струмів електровозів в режимах тяги і рекуперації (рис. 3.7), напруги на шинах тягових підстанцій, їх струмів та струмів накопичувача енергії (рис. 3.8).

З рис. 3.6, а за вираженими стрибками напруги на струмоприймачі видно моменти зривів рекуперації. При використанні інверторів стрибки відсутні, надлишкова енергія перетікає до зовнішньої мережі (рис. 3.6, б). При використанні лише некерованих накопичувачів також мають місце стрибки напруги і зриви рекуперації (рис. 3.6, в).

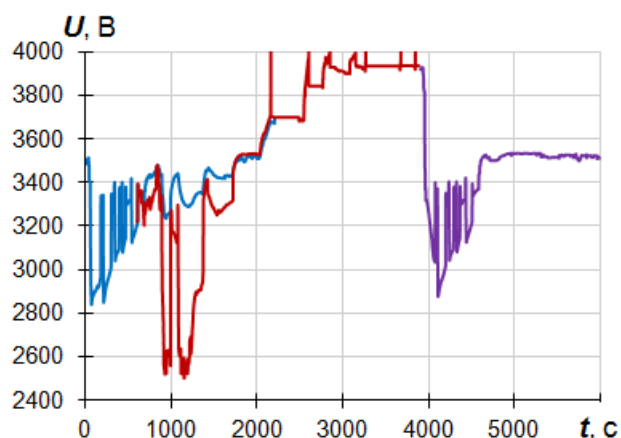
З аналізу струмів електровоза в режимі рекуперації при різних структурах ТП 2 випливає, що реалізація енергії рекуперації в повному обсязі (100 %) має місце лише для випадків при наявності на ТП інвертора, або керованого накопичувача (рис. 3.7, б, г, д, е). У випадках рис. 3.7, (а, в) енергія рекуперації реалізується лише частково, в обсязі 2 та 12 % відповідно.



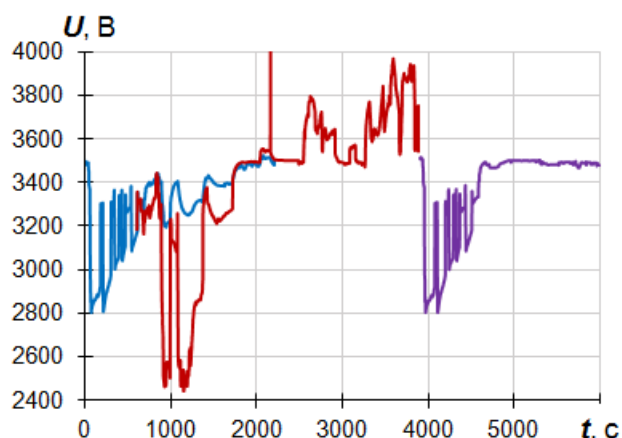
а)



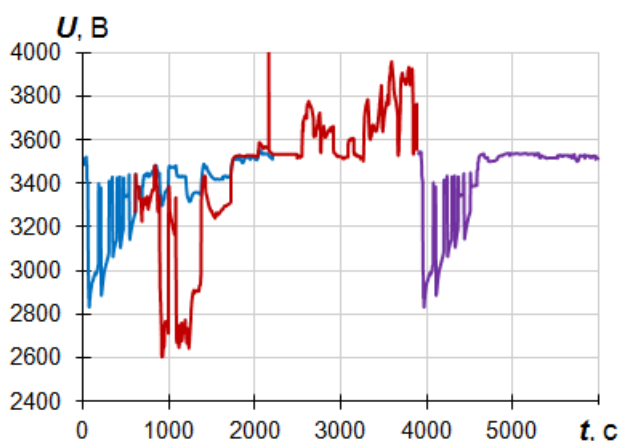
б)



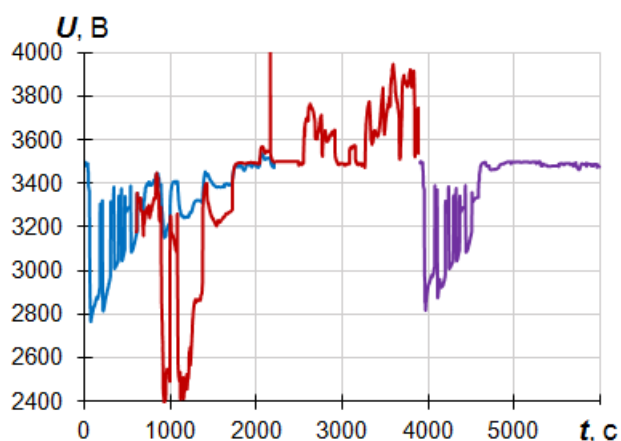
в)



г)



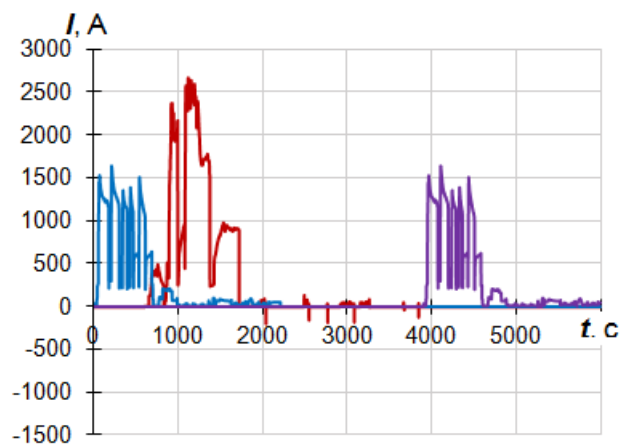
д)



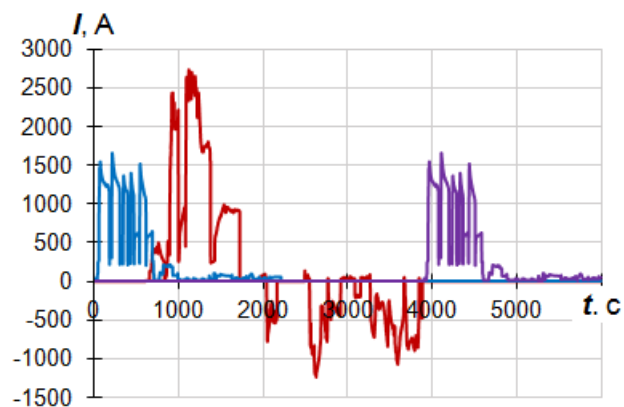
е)

а – випрямляч без накопичувача; б – інвертор без накопичувача; в – випрямляч з некерованим накопичувачем; г – інвертор з некерованим накопичувачем; д – випрямляч з керованим накопичувачем; е – інвертор з керованим накопичувачем

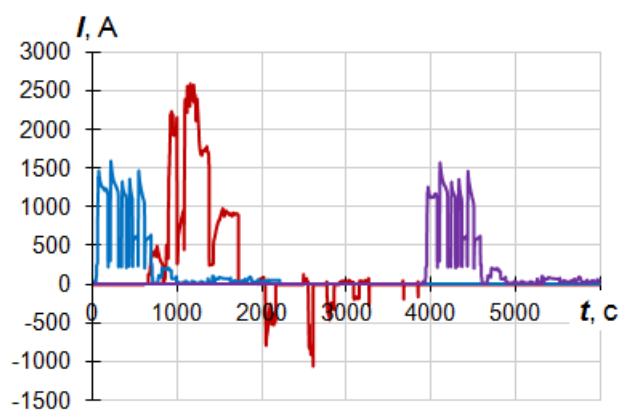
Рисунок 3.6 – Напруги на струмоприймачах електровозів в різних режимах роботи обладнання тягової підстанції



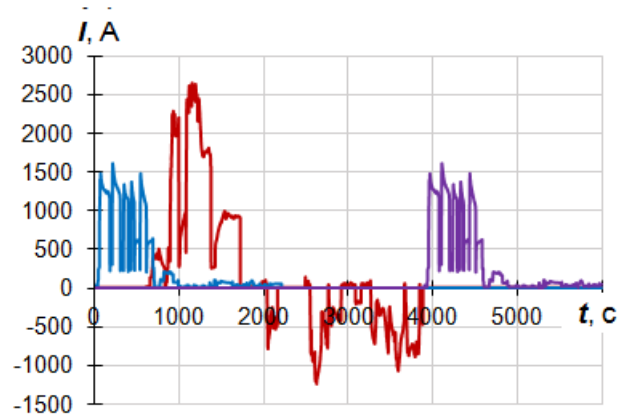
а)



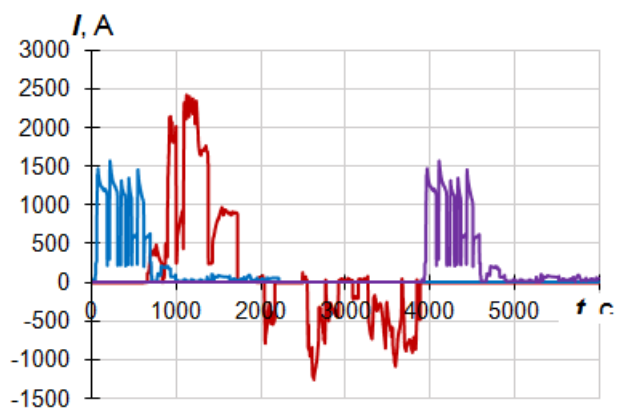
б)



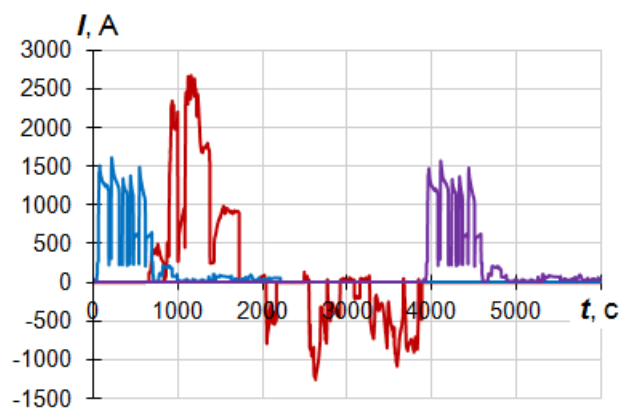
в)



г)



д)

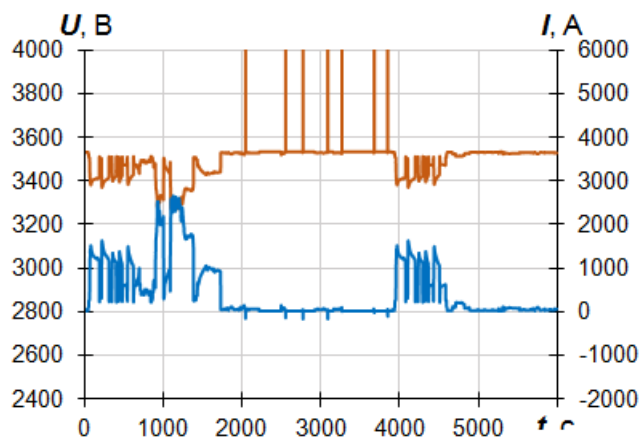


е)

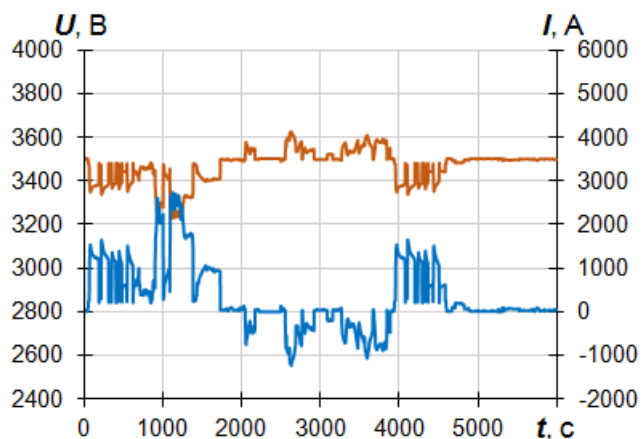
а – випрямляч без накопичувача; б – інвертор без накопичувача; в – випрямляч з некерованим накопичувачем; г – інвертор з некерованим накопичувачем; д – випрямляч з керованим накопичувачем; е – інвертор з керованим накопичувачем

Рисунок 3.7 – Струми електровозів в різних режимах роботи обладнання тягової підстанції

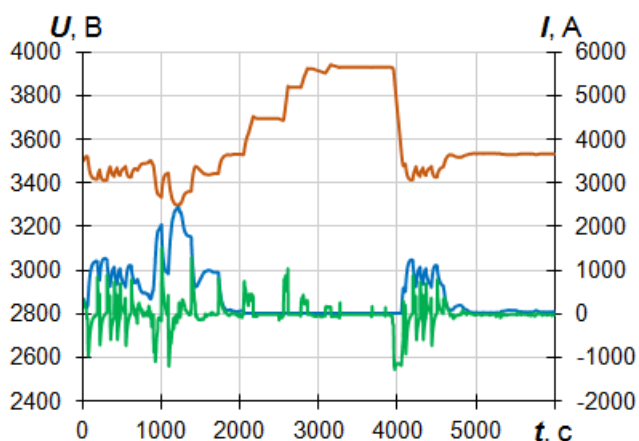
|      |      |          |        |      |
|------|------|----------|--------|------|
|      |      |          |        |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |



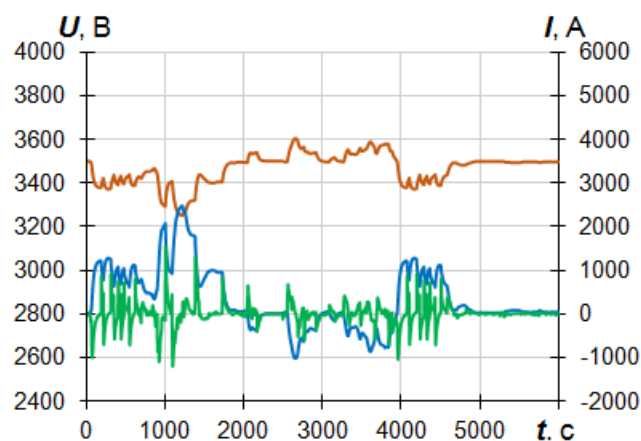
а)



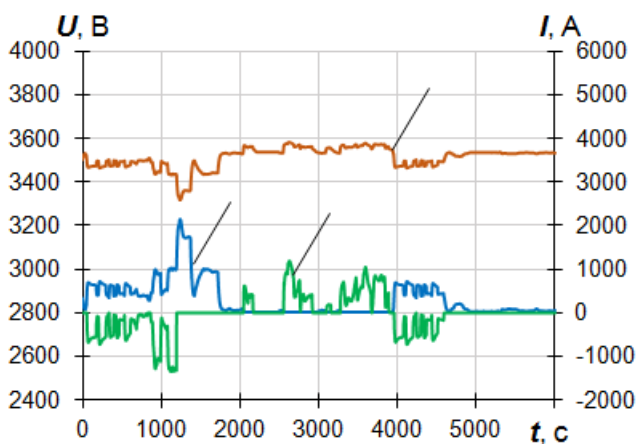
б)



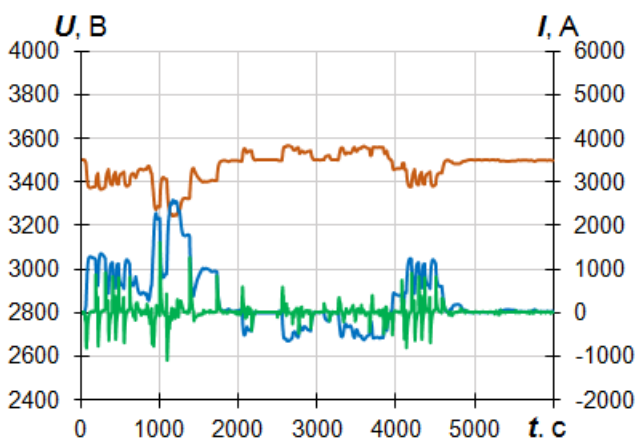
в)



г)



д)



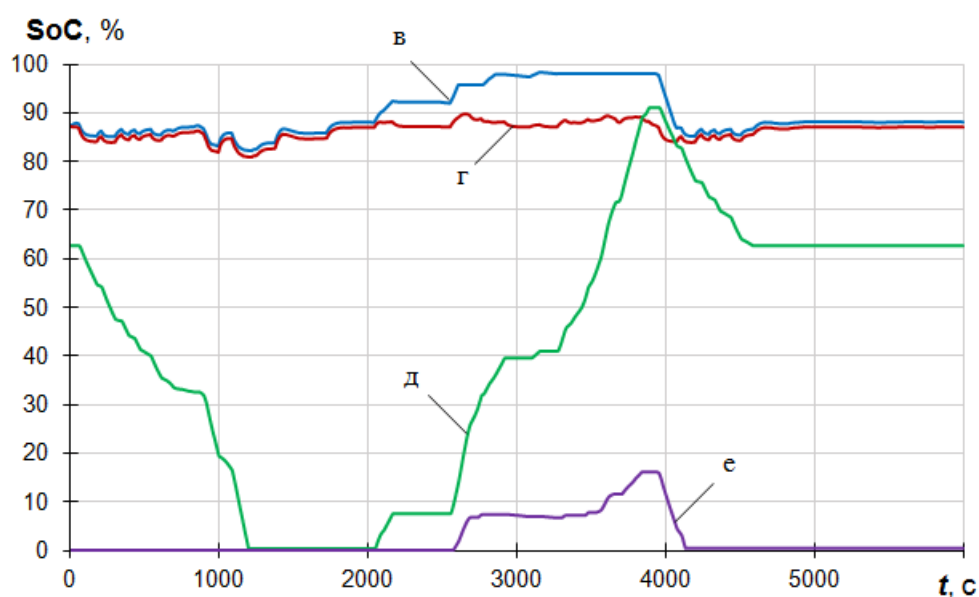
е)

а – випрямляч без накопичувача; б – інвертор без накопичувача; в – випрямляч з некерованим накопичувачем; г – інвертор з некерованим накопичувачем; д – випрямляч з керованим накопичувачем; е – інвертор з керованим накопичувачем

Рисунок 3.8 – Напруги на шини тягової підстанції 1, струми підстанції 2, струми накопичувачів в різних режимах роботи 3

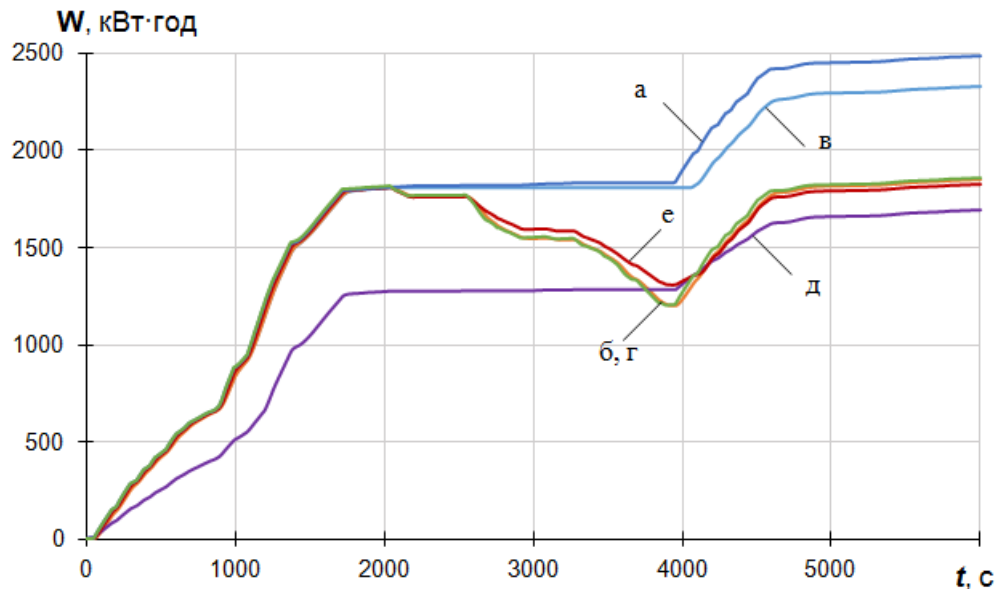
При аналізі графіків рис. 3.8 можна спостерігати, що при наявності накопичувача на ТП зменшується піковість і різкозмінність характеру споживання струму ТП з зовнішньої мережі. Так коефіцієнт форми струму ТП для рис. 3.8, д становить 3,25 у порівнянні з 4,8 для рис. 3.8, е. Найбільш енергоефективною схемою виявляється варіант д.

Рівень заряду накопичувача в різних режимах роботи обладнання тягової підстанції показано на рис. 3.9, а витрати електроенергії в різних режимах роботи обладнання тягової підстанції на рис. 3.10.



а – випрямляч без накопичувача; б – інвертор без накопичувача; в – випрямляч з некерованим накопичувачем; г – інвертор з некерованим накопичувачем; д – випрямляч з керованим накопичувачем; е – інвертор з керованим накопичувачем

Рисунок 3.9 – Рівень заряду накопичувача в різних режимах роботи обладнання тягової підстанції



а – випрямляч без накопичувача; б – інвертор без накопичувача; в – випрямляч з некерованим накопичувачем; г – інвертор з некерованим накопичувачем; д – випрямляч з керованим накопичувачем; е – інвертор з керованим накопичувачем

Рисунок 3.10 – Витрати електроенергії в різних режимах роботи обладнання тягової підстанції

Результати визначення витрат електроенергії в різних режимах роботи обладнання тягової підстанції представлені в таблиці 3.1 та на рисунку 3.11. Як видно з даної таблиці найбільша економія електроенергії складає 31,8 % для структурної схеми з випрямлячем з керованим накопичувачем.

Таблиця 3.1 – Результати розрахунку витрат електроенергії

| Режим роботи обладнання | Витрата електроенергії, кВт·год | Економія електроенергії, кВт·год | Економія електроенергії, % |
|-------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| а)                      | 2482,5                          | —                                | —                          |
| б)                      | 1858,1                          | 624,4                            | 25,2                       |
| в)                      | 2333,1                          | 149,4                            | 6,0                        |
| г)                      | 1849,2                          | 633,3                            | 25,5                       |
| д)                      | 1692,0                          | 790,5                            | 31,8                       |
| е)                      | 1829,3                          | 653,2                            | 26,3                       |

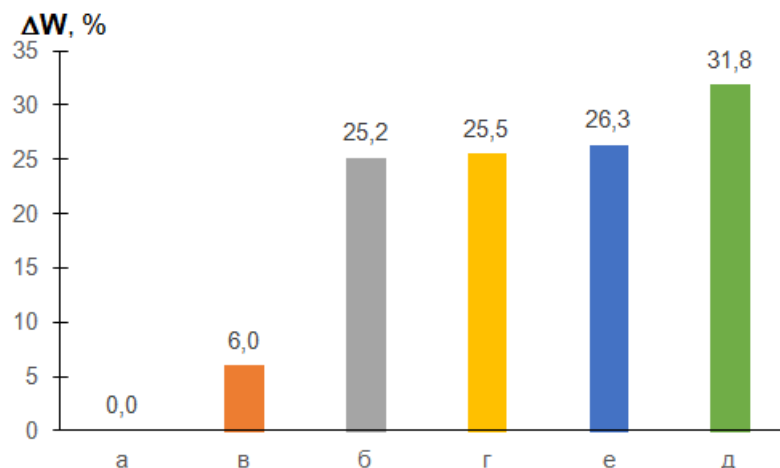


Рисунок 3.11 – Економія витрат електроенергії при різних режимах роботи обладнання

За результатами моделювання та аналізу струмів електровоза в режимі рекуперації при різних структурах впливає, що реалізація енергії рекуперації в повному обсязі (100 %) має місце лише для випадків при наявності на ТП інвертора, або керованого накопичувача, а найкращими характеристиками, по економії витрат електроенергії при різних режимах роботи обладнання, володіють схеми з випрямлячем та з керованим накопичувачем.

## ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

У магістерській роботі на основі виконаного автором дослідження ефективності застосування накопичувачів електроенергії в системах тягового електропостачання постійного струму визначено найоптимальніший варіант структурної схеми ТП, при застосуванні якої будуть найкращі режими енергообміну накопичувача в системі з тяговим навантаженням.

Загальні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Розроблену імітаційна модель системи тягового електропостачання з блоками накопичувачів електроенергії.
2. Визначено варіанти комплектації обладнання тягової підстанції з використанням накопичувачів електроенергії.
3. Проведено імітаційне моделювання та виконано аналіз ефективності використання накопичувача електроенергії для різних систем електротранспорту, визначено напруги на струмоприймачах електровозів, струми електровозів, рівень заряду накопичувача та витрати електроенергії в різних режимах роботи обладнання тягової підстанції.

За результатами дослідження струмів електровоза в режимі рекуперації при різних структурах зроблено висновок, що реалізація енергії рекуперації в повному обсязі (100 %) має місце лише для випадків при наявності на ТП інвертора, або керованого накопичувача, а найкращими характеристиками, по економії витрат електроенергії при різних режимах роботи обладнання, володіють схеми з випрямлячем та з керованим накопичувачем.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 54   |

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Астахов Ю. Н. Накопители энергии в электрических системах: Учеб, пособие для электроэнергетических спец. вузов / Ю. Н. Астахов, В. А. Веников, А. Г. Тер-Газарян. – Москва: Высш. шк., 1989. – 240 с.
2. Хрусталёв Д. А. Аккумуляторы / Д. А.Хрусталёв. – М.: Изумруд, 2003. – 224 с.
3. Штанг А. А. Оценка современных накопителей энергии на транспортных средствах / А. А. Штанг, О. А. Михалева. – Онлайн Электрик: Электроэнергетика. Новые технологии, 2012.
4. Алексеев Б. А. Применение накопителей в электроэнергетике / Б. А. Алексеев // Электро. – 2005. – № 1. – С. 42–46.
5. Бут Д.А. Накопители энергии / Д.А. Бут, Б.Л. Алиевский, С.Р. Мизюрин. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 400 с.
6. Рыбалко А. Я. Критерии сопоставления накопителей энергии / А. Я. Рыбалко, С. В. Дыбрин / Гірнича електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2005. – № 75. – С. 56–61.
7. Смоленцев Н. И. Накопители энергии в локальных электрических сетях / Н.И. Смоленцев // Ползуновский вестник. – 2013. – № 4–2. – С. 176–181.
8. Черняк Ю. В. Анализ повышения эффективности потребления электроэнергии на электропоездах путем установки накопителей энергии / Ю. В. Черняк, А. В. Гаюр, М. О. Ревчук // Зб. наук. праць ДЕТУТ. Серія «Транспортні системи і технології». – 2012. – №. 20. – С. 142–144.
9. Бурков А. Т. Методы расчета систем тягового электроснабжения железных дорог / А. Т. Бурков, В. М. Варенцов, С. Е. Кузин, Э. П. Селедцов, В. Г. Каратеев; Ленинград, 1985. – 74 с.
10. Босый Д. А. Усовершенствование имитационных средств моделирования систем тягового электроснабжения / Д. А. Босый, Е. Н. Косарев // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Наука, творчество и

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 55   |

образование в области электроэнергетики и электротехники – достижения и перспективы», 19–20.11.2015, г. Хабаровск, ДВГУПС. – С. 64-70.

11. Черемисин В. Т. Оценка способов повышения энергетической эффективности системы тягового электроснабжения в условиях рекуперации электроподвижного состава // The 6 Int. Symp. for Transp. Univ. in Europe and Asia / Korea nat. univ. of transp.: 50 Daehak-ro, Chugji-si. Chungbuk, 2013. С. 147–151.

12. Черемисин В. Т. Выбор мест установки накопителей электроэнергии на полигоне постоянного тока по критерию энергоэффективности / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров, В. Л. Незевак // Наука и транспорт. Модернизация железнодорожного транспорта. – 2013. – №2 (6). – С. 48 – 52.

13. Омеляненко В. И. Накопители энергии – перспективная технология для железных дорог / В. И. омеляненко, В. Е. Бондаренко, Г. В. Омеляненко, Л. В. Оверьянова // Міжнародний інформаційний науково-технічний журнал «Локомотив-інформ». – Харків : Техностандарт, – 2011. – № 4. – С. 4–9.

14. Шевлюгин М. В. Совершенствование системы тягового электроснабжения с помощью накопителей энергии // Прил. к журн. «Мир транспорта». № 1, т. 4. М.: МГУПС. 2007. – С. 35–38.

15. Закарюкин В. П. Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков. – Иркутск: ИрГУПС. – 2010. – 160 с.

16. Тер-Оганов Э. В. Электроснабжение железных дорог: учебник для студентов университета (УрГУПС) / Э. В. Тер-Оганов, А. А. Пышкин. Екатеринбург: УрГУПС, 2014. – 432 с.

17. Колобов М. Г. Гибридный накопитель энергии для транспорта / М. Г. Колобов, В. И. Климов, А. В. Дубинин, М. В. Москалев // Электричество. – 2011. – № 10. – С. 26–30.

18. Незевак В. Л. К вопросу о выборе накопителя на участках постоянного тока с применением рекуперативного торможения // Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте: мат-лы науч.-прак. конф. Омск: ОмГУПС, 2013. 242 с.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 56   |

19. Любарский Б. Г. Концептуальный проект пригородного электропоезда с инерционным накопителем энергии / Б. Г. Любарский, В. И. Омеляненко, Л. В. Оверьянова, Е. С. Рябов // Міжнародний інформаційний науково-технічний журнал «Локомотив-інформ». – Харків : Техностандарт, – 2013. – № 11. – С. 6–11.

20. Баринов, В.А. Режимы энергосистем: Методы анализа и управления. / В.А. Баринов, С.А. Совалов – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 440 с.

21. Bosiy D., Sablin O., Kosariev Ye. Computing and Optimization for DC Power Systems of Electric Transport. London: World Scientific Publishing Europe Ltd, 2020p. DOI:10.1142/q0229.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 57   |