

УДК 621.311.16

## **ШЛЯХИ ІНТЕГРАЦІЇ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ДО РОЗПОДІЛЕНОЇ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЕЛЕКТРИФІКОВАНОЇ ЗАЛІЗНИЦІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З АЛЬТЕРНАТИВНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ.**

*Кедря М.М., к.т.н., доцент, Анікеєва А.О., студентка  
Дніпровський національний університет залізничного транспорту ім. акад.  
В. Лазаряна, м Дніпро, Україна*

**Анотація.** В статті розглянуто вибір типу та місця розташування накопичувачів електричної енергії в розподіленій системі тягового електропостачання та їх основних параметрів.

**Ключові слова:** накопичувач електричної енергії, розподілена система, постійний струм, електропостачання залізниць

**Вступ.** Нерівномірне добове споживання електроенергії – вважається основною проблемою систем тягового електропостачання залізничного транспорту.. Типовий графік споживання електроенергії в системі електропостачання залізниць має свої максимальні та мінімальні значення впродовж доби та на інтервалах проходження ділянки рухомим складом. В результаті, спостерігаються надлишок та недостача енергії, що призводить до виходу за встановлені норми показників якості електроенергії в системі електропостачання рухомого складу. Засоби утилізації надлишкової енергії з наступним поверненням її до мережі під час недостачі є застосування накопичувачів електричної енергії. В світі все більшого значення набувають системи накопичення та зберігання енергії [1].

**Мета роботи.** Розглянути використання накопичувачів електричної енергії в розподіленій системі електроживлення. Таке використання дає змогу вирішувати широкий спектр завдань, наприклад: поліпшення якості електричної енергії; дозволяє інтегрувати альтернативні джерела електричної енергії в існуючу електромережу; утилізувати енергію рекуперації. Абсолютний лідер в структурі накопичування енергії займає гідроакумулююча електростанція зберігання енергії якої становить 96%, але інші види накопичування енергії досить швидко зростають. Ефект від застосування накопичувачів полягає в забезпеченні безперебійного електропостачання груп споживачів, які вимагають підвищений рівень надійності, зниження втрат енергії та стабілізації напруги в мережі. Накопичувачі в мережі працюють в таких комбінаціях:

- режим в якому накопичувач не споживає з мережі та не віддає електроенергію в мережу, виняток споживання власних потреб
- режим накопичування енергії, коли відсутня необхідність віддачі енергії накопичувач переходить в режим накопичення енергії (коли параметри

мережі електроживлення знаходяться в межах робочого діапазону накопичувач заряджається, при цьому потужність, яка споживається від мережі, обмежується значенням, визначеним оператором).

- режим передачі енергії в мережу в якому накопичувач переходить в режим перетворення постійної напруги акумуляторів в змінну, синхронізовану за частотою, фазою та миттєвим значенням з напругою в мережі.

**Основна частина.** Наукові публікації останніх років свідчать, що в якості накопичувачів електроенергії, в тому числі і рекуперованої, в зазначених системах найбільш ефективно застосовувати тільки чотири типи накопичувачів: електрохімічний, інерційний електромеханічний, ємнісний, надпровідниковий індуктивний. Залежно від конкретних умов та цілей зберігання енергії вибір типу накопичувачів залежить від вимог до видаваної потужності, тривалості зберігання енергії, питомих втрат, коефіцієнту корисної дії, терміну служби, територія розміщення та впливу навколишнього середовища [2-5].

Електрохімічні накопичувачі енергії або електрохімічні акумуляторні батареї вважаються найбільш розповсюджених типів накопичування. Перевагами акумуляторних накопичувачів є їх конструкція, компактність, функціональна гнучкість, можливість автоматизації процесів управління і контролю та головною перевагою є високий рівень накопичуваної питомої енергії. Але в той же час акумуляторні накопичувачі електроенергії мають високу вартість, недостатній ресурс роботи, зменшення ресурсу при роботі в режимах розряду та заряду та спеціальні вимоги до глибини заряду. Ці недоліки можливо компенсувати за рахунок оптимального розподілу потужності між акумуляторною батареєю та суперконденсаторами. Важливим фактором є утилізація та переробка накопичувачів які відпрацювали свій термін експлуатації [6]. Так як для виробництва електрохімічних накопичувачів використовують токсичні хімічні елементи і вони викликають значні екологічні проблеми процес утилізації та переробки значно фінансово затратний. Використання на електричному транспорті акумуляторні батареї в якості накопичувальних пристроїв недоцільне по деяким причинам:

- тривалий процес розряду (практично всі види акумуляторних батарей заряджаються та розряджаються з малим навантаженням та невеликими струмами)
- в акумуляторі швидкість віддачі енергії залежить від швидкості хімічних реакцій, що протікають в ньому яка в свою чергу залежить від рухливості іонів.
- акумуляторні батареї володіють низькою піковою віддаваною потужністю, що дозволяє забезпечити нормальний режим роботи електродвигуна на ЕРС.
- невеликий ККД (70...80%)

Електрохімічні накопичувачі являються найбільш придатними для режимів роботи тривалого накопичення та витрат електроенергії в стаціонарних режимах роботи електротехнічних пристроїв та практично незадовільними і малоефективними для акумулювання енергії електричного гальмування.

Електромеханічний накопичувач енергії в якості інерційного накопичувача використовують ротор електричної машини. Виведення накопичуваної механічної енергії здійснюється за допомогою електричних генераторів, при якому механічна енергія перетворюється в електричну за допомогою електричної машини. Під «інерційним» накопичувачем енергії розуміють пристрій, який накопичує її в обертовій масі. Зокрема, електромеханічні накопичувачі енергії отримали новий імпульс в своєму розвитку з впровадженням композитних матеріалів, що не тільки підвищило їх енергетичні показники, але й безпеку. Проте масове застосування електромеханічних накопичувачів енергії обмежується їх технологічною складністю: необхідність створити вакуум всередині корпусу і застосовувати електромагнітні підшипники для зниження втрат на тертя. Інерційні накопичувачі інваріантні до місця їх встановлення і в силу великої питомої енергоємності компактні. Час реверсу потужності визначається можливістю переведення розгінного двигуна накопичувача в режим генератора (і навпаки) і складає десятки долей секунди. ККД в залежності від режиму і графіка роботи коливається від 80 до 95%. До основних переваг відносять: високі показники питомої енергії і питомої потужності; високий ККД, стабільність характеристик, що обумовлює застосування даного типу накопичувачів в системах тягового електропостачання. Основною перевагою маховика квазіізотропної конфігурації являється високий рівень об'ємної ефективності, яка дозволяє створювати компактні системи. З іншої сторони, при його руйнуванні формуються високоенергетичні уламки, а вся енергія виділяється одночасно і її розсіювання надскладне. До головних недоліків електромеханічного накопичувача відносять: динамічна активна зона і великі габарити, а також складність конструктивного виконання і дороговизна у виробництві і експлуатації. Ці недоліки обмежують застосування механічних накопичувачів безпосередньо на рухомій одиниці.

Ємнісні накопичувачі електроенергії заощаджують її в електричному полі «незвичайних» конденсаторів, із яких складається цей накопичувач. За останній час в Україні та за кордоном досягнуто значних успіхів в збільшенні питомої енергоємності конденсаторних накопичувачів. Існуючі технології виробництва дозволяють створювати вже зараз конденсатори з густиною електричної ємності до  $100 \text{ Ф/см}^3$ . Така питома енергоємність не границя, тому в цьому напрямку неперервно ведуться нові розробки. Крім того, модульна конструкція дозволяє говорити про створення достатньо потужної батареї з конденсаторів на напругу в десятки кіловольт, що витримують струми в декілька кілоампер і енергоємністю до  $10^{12}$  Дж. Це дає можливість використовувати батарею в якості накопичувача енергетичного призначення. Ємнісні накопичувачі електроенергії

мають високий ККД, значення зарядно-розрядного циклу якого складає 88-98%. Час зберігання енергії в таких накопичувачах порівняно невеликий – близько 100 год. Ємнісні накопичувачі володіють дуже малим внутрішнім опором, що дозволяє досягати питомої потужності імпульсного розряду близько 10 Вт/см<sup>3</sup>. Ємнісний накопичувач не має негативного екологічного впливу, пожежонебезпечний і вибухобезпечний, і може бути розміщений практично в будь-якому місці. Інтелектуальна система керування визначає ще на початку процесу рівень напруги ( $u_{eq}$ ) [7-8], до якої відбувається балансування. Для ємнісних накопичувачів значення  $u_{eq}$  визначається на підставі відомих значень напруги  $u_i$  на кожному з  $n$  накопичувачів до початку балансування:

$$u_{eq} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n u_i^2}{n}} \#$$

Недоліки ємнісного накопичувача:

- модульний характер конструкції, що призводить до великої кількості контактних з'єднань, що може створити негативний вплив на надійність всього пристрою;
- необхідність використання додаткового обладнання для заряду;
- необхідність зміни полярності батареї на протилежну при перемиканнях із заряду в розряд.

Ємнісні накопичувачі на базі аномальної ємності слід розглядати як перспективні пристрої, котрі дозволяють вирішувати проблеми в різних областях науки.

Максимальне припустиме значення струму обмежується індуктивністю дросель-трансформатора і, за умови постійного значення періоду, мінімальне значення індуктивності визначається за виразом

$$L = 0,5 \cdot T \cdot U / u_m$$

Нижче, в таблицях 1 та 2 наведено у порівнянні результати розрахунків, які дозволяють наочно оцінити вплив від встановлення накопичувачів на тягових підстанціях та електрорухомому складі на основні електричні величини в системі тягового електропостачання.

Таблиця 1

Результати електричних розрахунків  
для випадку розташування НЕ на ТП

№	Показник	ТП без НЕ	ТП з НЕ	Різниця, %
1	Витрати енергії, кВт·год	100	93,6	-6,4
2	Втрати в тяговій мережі, %	3,5	3,6	+0,1
3	Мінімальна напруга, В	3017	3052	+1,2
4	Коефіцієнт навантаження знижувального тра-ра	0,25	0,23	-8,0
5	Коефіцієнт навантаження перетворювального тр-ра	0,16	0,15	-6,2
6	Пропускна спроможність (пар./непар.), %	100	100	-
7	Мінімальний міжпід-станційний інтервал, хв	12	12	-

Таблиця 2

Результати електричних розрахунків  
для випадку розташування НЕ на ЕРС

№	Показник	ЕРС без НЕ	ЕРС з НЕ	Різниця, %
1	Витрати енергії, кВт·год	100	81,1	-12,9
2	Втрати в тяговій мережі, %	6,5	1,9	-4,6
3	Мінімальна напруга, В	2888	3300	+14,3
4	Коефіцієнт навантаження знижувального тра-ра	1,39	0,49	-64,7
5	Коефіцієнт навантаження перетворювального тр-ра	0,9	0,28	-68,9
6	Пропускна спроможність (пар./непар.), %	100	150,5	-50,5
7	Мінімальний міжпід-станційний інтервал, хв	12	8	-30,3

Принцип роботи напівпровідникових індуктивних накопичувачів електроенергії побудовано на тому, що електроенергія накопичується в магнітному полі надпровідникової котушки. Величина що характеризує надпровідниковий індуктивний накопичувач являє добуток струму надпровідникової котушки на довжину проводу обмотки. До недоліків

надпровідникових котушок відносять велику механічну радіальну напругу, створювану в обмотці, і порівняно малу величину накопичуваної в магнітній котушці енергії, внаслідок обмеження граничної величини накопичуваної енергії обумовленої механічною міцністю матеріалу котушки. Головним недоліком вважають наявність великих зовнішніх магнітних полів. Для їх зменшення використовують циліндричний напівпровідниковий індуктивний накопичувач електроенергії у вигляді двох основних сферичних котушок з зустрічним напрямком струму. Напівпровідникові індуктивні накопичувачі електроенергії мають високий показник питомої потужності та енергоємності, їх застосування в електротранспорті ближчим часом малоймовірне. Накопичувачі такого типу володіють великими габаритами і можуть використовуватись в якості стаціонарних пристроїв на тяговій підстанції. Но все одно вони являються одними з самих перспективних джерел пікової потужності [9-10].

У свою чергу, можливі чотири варіанти розташування НЕ в системі тягового електропостачання [11-13].

- 1) Розташування на тяговій підстанції. Цей варіант ідеальний по зручності обслуговування накопичувачів так як на тягових підстанціях вже встановлено електроустаткування. В такому випадку накопичувачі підключаються безпосередньо до шин тягової підстанції.

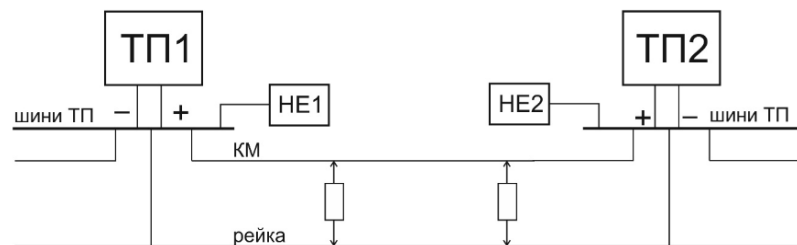


Рис.1. Накопичувач енергії на тяговій підстанції

Перевагами розміщення накопичувача на тяговій підстанції є постійність температури яка дозволяє збільшити термін експлуатації накопичувача.

- 2) На зупиночних станціях. Найбільш економічним при рекуперації являється режим, при якому вся генерована ЕРС енергія передається до розміщеного неподалік накопичувача, а в момент розряду ЕН – до найближчого ЕРС, котрий працює в режимі тяги.

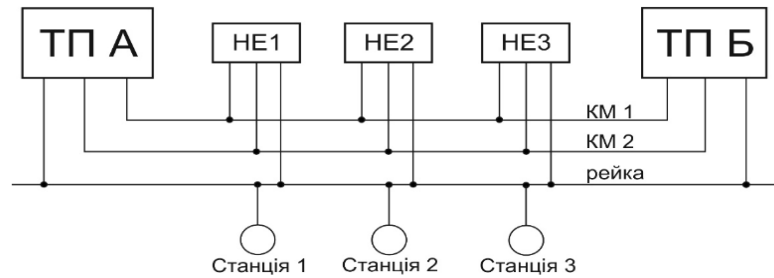


Рис.2. Схема вмикавання накопичувача на станціях

- 3) На міжпідстанційній зоні. Встановлення накопичувача в підстанційній зоні є більш раціональним варіантом. Такий тип розміщення знижує капітальні затрати, встановленням одного накопичуваного елемента на дві секції в порівнянні з варіантом розміщення накопичувача на зупиночних станціях. З таким розміщенням є можливість в значній мірі піддержувати середній рівень напруги; вирівнювати його в суміжних плечах, частково розвантажуючи і знижуючи втрати при передачі енергії в кінець міжпідстанційної зони живлення ТП; проводити акти рекуперації незалежно від наявності активного споживання.
- 4) На фідерах тягової підстанції. Встановлення накопичувача на виводах живлячої лінії скорочує втрати в живлячому фідері. В такому розміщенні накопичувача не має переваг, властивих розміщенню на тяговій підстанції. Розташування накопичувача в СТЕ дозволяє розв'язати ряд електротехнічних задач: випрямлення хвилинних, годинних, добових графіків навантажень; підвищення якості електроенергії; зниження температури проводів підвіски контактної мережі та напівпровідникових агрегатів; використання дешевої електроенергії, накопиченої вночі, для компенсації дефіциту потужності в часи пік.

**Висновок.** Рекомендувати однозначно будь-який накопичувач електричної енергії в розподіленій системі тягового електропостачання неможливо. Проте, можна сформулювати ряд вимог і обмежень, що полегшують вибір накопичувача для кожного окремого випадку. Технології накопичення енергії розвиваються стрімкими темпами, отже накопичувачі електроенергії знаходять все більш широке застосування в практиці регулюванні та управлінні режимами електроенергетичних систем.

Список використаних джерел:

1. Андреев В.М., Забродский А.Г., Когновицкий С.О., Интегрированная энергоустановка с накопителем энергии на основе водородного цикла,

- Международный журнал «Альтернативная энергетика и экология» АЭЭ №2 (46), 2007,99-105;
2. Сиченко, В. Г. Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць / В.Г. Сиченко, Ю.Л Сасенко, Д.О Босий; Дн-вськ. : «Стандарт-Сервіс», 2015. - 344 с
  3. Косарев, Є. М. Регулювання напруги в контактній мережі електрифікованих залізниць постійного струму / Є. М. Косарев // Електрифікація транспорту. – 2015. – №9, с. 37-43.
  4. Сиченко В. Г. Оптимізація керування режимом напруги в тяговій мережі постійного струму з пунктами підсилення. / В. Г. Сиченко, Д.О. Босий, Є. М. Косарев// Вісник Вінницького політехнічного інституту. № 6 – 2015, - с. 95-103.
  5. Гончаров Ю.П. Повышение эффективности функционирования тягового электроснабжения при применении возобновляемых источников электрической энергии. / Ю. П. Гончаров, В. Г. Сыченко, Д. А. Босый, М. С. Пастушенко, Е. Н. Косарев //Problemy Kolejnictwa, czasopismo naukowe wydawane / Instytut Kolejnictwa. – Warszawa, 2014. – Zeszyt 162. – С. 65-82.
  6. Енергетична стратегія України на період до 2030 року
  7. Електрон.ресурс – Режим доступа:  
[https://ec.europa.eu/energy/topics/technology-and-innovation/strategic-energy-technology-plan\\_en](https://ec.europa.eu/energy/topics/technology-and-innovation/strategic-energy-technology-plan_en)
  8. Електрон.ресурс – Режим доступа: <https://hornsdalespowerreserve.com.au/>
  9. Алексеев, Е. Н. Существующие и перспективные направления применения накопителей энергии в железнодорожном транспорте / Е. Н. Алексеев, И. В. Ванин, Н. С. Охотников // Перспективные задачи развития железнодорожного транспорта: Сборник статей молодых ученых и аспирантов ВНИИЖТ. – М.: Интекст, 2010. – С. 134-145.
  - 10.Потехин, А. А. Инерционные накопители энергии в системах тягового электроснабжения железнодорожного транспорта / А. А. Потехин / Материалы докладов 15 Аспирантско-магистерского научного семинара, посвященного «Дню энергетика», Казань, 5-7 дек. – 2011. – Т. 2. – С. 116
  - 11.Гулиа, Н. В. Накопители энергии /Н. В. Гулиа. – М. : Наука, 1980. –151 с.
  - 12.Астахов, Ю. Н. Функциональные возможности накопителей электрической энергии в энергосистемах / Ю. Н. Астахов, В. А. Веников, А. М. Иванов и др. // Электричество. – 1983. – № 4. – С. 2-6.
  - 13.Венедиктов, А. З. Инерционный накопитель энергии для тяговой сети / А. З. Венедиктов, В. Н. Демкин. Д. С. Доков // Железные дороги мира – 2004. – №2. – С. 40-44.
  - 14.Шевлюгин, М. В. Проблемы использования накопителей энергии в системах тягового электроснабжения : дис. ... к-та техн. наук : 05.22.09 Шевлюгин Максим Валерьевич ; Московский государственный университет путей сообщения. – М., 2000. – 218 с. – Библиогр.: С. 122-130.