

**РЕКУПЕРАЦІЯ ЕНЕРГІЇ В ПІДЙІМАЛЬНИХ МЕХАНІЗМАХ  
З ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ**

В роботі розглядаються актуальні питання енергозбереження та енергоефективності силових підйімальних механізмів з частотно-регульованим електричним приводом. Описано проблеми економії електроенергії ліфтовими механізмами в багатоповерхових будівлях та представлено спосіб рекуперації енергії в різних режимах роботи підйімального механізму за допомогою запропонованого методу. Розраховано енергетичну ефективність даної системи із застосуванням різних типів лебідок. Представлено метод надшвидкої акумуляції електроенергії за допомогою іоністорів. Проведено ряд експериментальних досліджень на діючих об'єктах в реальних умовах і різних режимах експлуатації. Запропоновано власний пристрій рекуперації електроенергії.

Ключові слова: рекуперація, енергозбереження.

V.I. STETSUYK, O.V. POLUDENNIY  
Khmelnitsky National University

**ENERGY RECUPERATION IN THE LIFTING MECHANISM  
WITH FREQUENCY-CONTROLLED ELECTRIC DRIVE**

In the paper the actual pytapnyya energy saving and energy power lifting mechanism with variable-speed electric drive. This problem saving electric lift mechanisms in multi-storey buildings and energy recovery method presented in various modes lifting appliance using the proposed method. Calculated the energy efficiency of the system with different types of winches. The method of ultra-fast accumulation of electricity through supercapacitor. A number of experimental studies on the existing objects in the real world and different modes of operation. An own recovery unit of electricity.

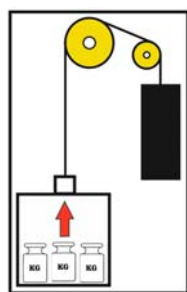
Keywords: recovery, energy saving.

**Вступ**

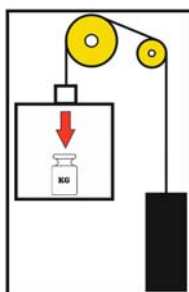
На сьогоднішній день тема енергозбереження актуальна у всьому світі. Впровадження енергозберігаючих технологій відбувається у всіх сферах діяльності людини. На енергозбереження в ліфтобудуванні ще не звертали такої пильної уваги, хоча споживання електроенергії ліфтом за загальними показниками середньостатистичної будівлі займає значну долю (до 15%) [1, с. 32]. Збереження, накопичення та повторне використання цієї електроенергії являється важливою науково-технічною задачею як в рамках одного ліфта, так і в межах всієї країни.

**Принцип роботи**

Рекуперація (від лат. *Recuperatio* – «зворотне отримання») – повернення частини енергії для повторного використання в тому ж технологічному процесі. В нашому випадку – перетворення електричної енергії мережі в кінетичну енергію ліфта і навпаки, при певних умовах генерування електричної енергії під час руху ліфта з великим дисбалансом кабіни відносно протизваги. Зазвичай ліфтова система складається з кабіни, лебідки, протизваги та станції керування. Протизвага необхідна для балансування ваги частково навантаженої кабіни. В результаті цього протизвага важча, ніж порожня або частково заповнена людьми кабіна, але легша, ніж повністю завантажена кабіна. Енергія мережі витрачається, коли повністю завантажена кабіна рухається вгору, або коли злегка завантажена кабіна рухається вниз. Схематичну модель даних процесів представлено на рис. 1.

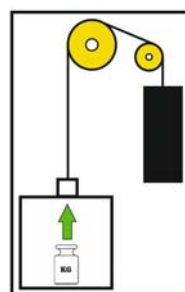


а)

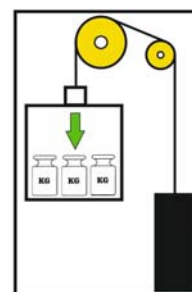


б)

Рис. 1. Схематична модель роботи ліфтового механізму в режимі споживання електроенергії: а) повністю завантажена кабіна рухається вгору; б) злегка завантажена кабіна рухається вниз



а)



б)

Рис. 2. Схематична модель роботи ліфтового механізму в режимі генерації електроенергії: а) мало завантажена кабіна рухається вгору; б) сильно завантажена кабіна рухається вниз

Коли мало завантажена кабіна рухається вгору, або сильно завантажена кабіна рухається вниз, двигун починає працювати в ролі електрогенератора (рис. 2). У випадку споживання електроенергії 3-фазний струм через частотний перетворювач в керованому режимі подається на електродвигун. У приводі,

що не використовує регенерацію енергії, її надлишки, вироблені перетворювачем частоти, розсіюється на гальмівному резисторі [2, с. 126].

Застосування гальмівних резисторів має ряд недоліків:

- великі габарити гальмівних резисторів;
- розігрів їх поверхні до високих температур – вище 100 °С;
- обов'язковий захист від попадання пилу, вологи і т.д.;
- необхідність системи відведення тепла.

### Енергетична ефективність та рекуперація енергії

Економічність і енергоефективність безредукторних лебідок досягається, перш за все, за рахунок вилучення однієї із основних ланок – редуктора та зменшення обсягів кінетичної енергії, яку запасав при пуску тихохідний приводний двигун. Разом із тим, кількісний аналіз реальної енергетичної ефективності нових типів лебідок в більшості випадків обмежується відсутністю інформації про основні базові показники [2-4]. В усталеному режимі, рекуперація енергії можлива, якщо потужність активних сил перевищує сумарні втрати потужності. Наприклад, в режимах спуску навантаженої кабіни або підйому порожньої кабіни. Тут потрібно враховувати реактивний характер всіх сил і моментів втрат. Рекуперація може виконуватися тільки в тому випадку, якщо сума складових активної сили тяжіння буде перевищувати суму втрат, викликаних реактивними силами, тобто коли з'являється надлишкова енергія. При застосуванні регульованої системи управління синхронним двигуном безредукторної лебідки, рекуперація можлива при невеликому дисбалансі кабіни відносно противаги.

У динамічних режимах, якщо обсяг кінетичної енергії прийняти за одиницю, по при пуску з мережі споживається енергія, рівна:

$$A_c = \frac{1}{\eta}. \quad (1)$$

Втрати енергії в перетворювачах будуть визначатися:

$$\Delta A_c = \frac{1}{\eta} - 1, \quad (2)$$

де  $\eta$  – результуючий ККД лебідки з двигуном і перетворювачем.

При гальмуванні в мережу віддається енергія  $A_2 = \eta$ , а втрати рівні:

$$\Delta A_2 = 1 - \eta. \quad (3)$$

Можна обчислити таке граничне значення ККД перетворювачів  $\eta_{zp}$ , при якому рекуперація енергії в циклі «пуск-гальмування» відсутня. Це випадок, коли сума втрат енергії під час пуску і при гальмуванні дорівнює кінетичній енергії:

$$\eta_{zp}^2 + \eta_{zp} - 1 = 0 \quad (4)$$

Звідки величина граничного значення коефіцієнта корисної дії становить 0,618. При цьому значенні ККД, в циклі «пуск-гальмування» з мережі споживається енергія, рівна кінетичній енергії запасеній в підйомному механізмі, а кінетична енергія, яка віддається при гальмуванні, компенсує втрати енергії. Якщо ККД буде більше цього граничного значення  $\eta_{zp}$ , то рекуперація енергії можлива, і з мережі споживається менший обсяг енергії. При значеннях ККД менших  $\eta_{zp}$ , рекуперація неможлива, а з мережі споживається енергія, більша за кінетичну енергію.

Необхідно також врахувати характер навантаження та особливості вимог до електроприводів лебідок. У зв'язку з відсутністю ефекту самогальмування в пропонованих сьогодні ринком нових типах безредукторних лебідок, в повній мірі сказується активний характер дії сил тяжіння вантажу, кабіни і противаги. При неврахуванні цієї обставини можливі «просідання» кабіни або противаги на початку і в кінці руху при вмиканні та вимиканні механічного гальма. В лебідках з регульованими системами керування ця проблема вирішується шляхом введення режиму утримання кабіни. На режим роботи системи в цілому впливають також і поточні налаштування: частотного перетворювача, плати керування, тощо. Вони дозволяють регулювати швидкість руху, інтервали розгону-гальмування та інш. Всі ці фактори в певній мірі впливатимуть на величину енергії рекуперації.

Найбільш точну оцінку енергоефективності електроприводу ліфтового обладнання можуть дати тривалі спостереження за енергоспоживанням на різних ліфтах. Застосування таких методів в кожному конкретному випадку є досить важким. Зростаюча увага за енергетичними показниками ліфтового обладнання змушує використовувати методи, що дозволяють з мінімальними часовими втратами експериментально визначити такі показники. На сьогоднішній день відсутні подібні, затверджені законодавчо, вітчизняні методи. В Європі розроблено дві методики, представлені в наступних документах: ISO / DIS 25745-1 (2008 рік) і VDI 4707 (2009 рік). У цих методах пропонується визначити енергетичні показники ліфта в режимах руху і очікування. У режимі очікування проводиться вимірювання споживаної потужності після 10 хвилин простою ліфта. За цей час станція управління перейде в режим простою, відключивши другорядних споживачів. У режимі руху відповідно до цих методик оцінка енергоефективності ліфтової установки проводиться шляхом вимірювання споживаної енергії, що витрачається в певному контрольному циклі. Контрольний цикл – це переміщення порожньої кабіни ліфта на висоту шахти 2 рази (в будь-якому початковому і зворотному йому напрямку) [1]. Такий цикл

застосовується зважаючи на простоту його реалізації (відсутня необхідність у використанні тарованих вантажів).

Для експериментального визначення енергетичних показників приводу ліфтового обладнання потрібно вимірювати споживану енергію. У частотно-регульованому електроприводі найбільшого поширення на сьогоднішній день отримали перетворювачі частоти з проміжною ланкою постійного струму і некерованим випрямлячем на вході. Форма струму, споживана з мережі даним типом пристроїв, є несинусоїдальною. Такий тип перетворювачів частоти використовується в складі безредукторного електроприводу. При несинусоїдальних формах струмів і напруг для визначення електричної енергії, що передається по трьох фазах мережі живлення, може бути застосована формула:

$$W = \int_0^t (p_A(t) + p_B(t) + p_C(t)) dt, \quad (5)$$

де  $p_A, p_B$  і  $p_C$  – миттєва електрична потужність, що передається по фазах А, В і С;  
 $t$  – період часу, для якого визначається споживана з мережі енергія.

Миттєва потужність виражається через фазні напруги і струми:

$$p_A = u_A i_A, \quad p_B = u_B i_B, \quad p_C = u_C i_C. \quad (6)$$

У разі, коли напруги в фазах мережі живлення симетричні, напруга однієї з фаз (наприклад, С) можна виразити через напруги інших фаз:

$$u_C = -(u_A + u_B). \quad (7)$$

Струм однією з фаз також можна виразити через інші фазні струми:

$$i_C = -(i_A + i_B). \quad (8)$$

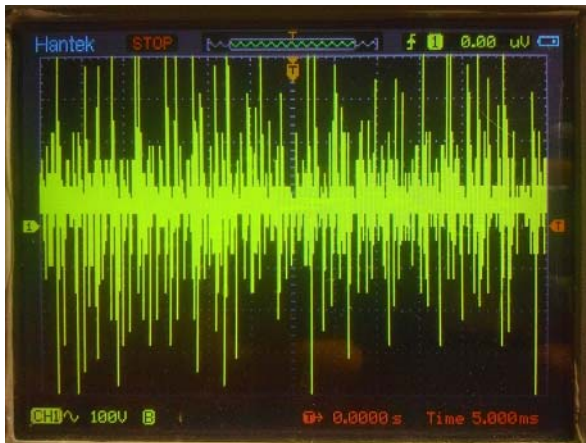
З урахуванням (7) і (8) вираз (5) можна записати у вигляді:

$$W = \int_0^t (u_A i_A + u_B i_B + (u_A + u_B)(i_A + i_B)) dt. \quad (9)$$

Формула (9) дозволяє визначити споживану навантаженням енергію з трифазної мережі з використанням фазних напруг і струмів двох фаз живлення.

### Експеримент

Відповідно до рис. 2, було запущено малозавантажену кабінку на підйом у шахті довжиною 50 м. Осцилограми викидів регенованої енергії представлені на рис. 3. В результаті експерименту було встановлено, що коли ліфт переходить на велику швидкість, майже по всій траєкторії руху спостерігалась присутність викидів регенованої енергії розмахом до 2000 В. Даний експеримент було проведено на редукторному двигуні вантажопідйомністю 1000 кг.



а)



б)

Рис. 3. Осцилограми розмаху викидів імпульсів регенованої енергії з двигуна на гальмівний резистор опором 50 Ом: а)  $t=5$  мс, 100 В/діл.; б)  $t=50$  мс, 100 В/діл.

Існує пряма залежність ефективності рекуперації енергії від типу приводу (асинхронний двигун з черв'ячним редуктором), або ж безредукторний синхронний двигун. Відомо, що синхронні безредукторні лебідки мають ККД набагато вищий відносно асинхронних редукторних лебідок. На редукторних лебідках можна регенерувати теоретично до 20% від загальної спожитої енергії. Компактний синхронний електродвигун дозволяє економити до 40% енергії від загально спожитої. Таким чином, кількість економії енергії залежить від багатьох факторів, таких як: завантаження кабінки, швидкості руху ліфта, типу застосованої лебідки, висоти підйому і т.д.

Енергетична ефективність пасажирського ліфта експериментально визначена і приведена на рис. 4. Для ліфта вантажопідйомністю 1000 кг споживана потужність електродвигуна буде дорівнювати: для

редукторної лебідки з асинхронним двигуном – 11 кВт, для безредукторної лебідки з синхронним двигуном – 6,9 кВт і для безредукторної лебідки з синхронним двигуном в парі з блоком рекуперації – 4,14 кВт.

### Запропонований пристрій рекуперації енергії

Використання енергії, що надходить від електродвигуна ліфта у генераторному режимі під час руху кабіни ліфта із великим дисбалансом кабіни відносно противаги, здійснюється наступним чином (рис. 5). Вхід трифазної напруги (L1, L2, L3) організовано через ввідний пристрій на частотний перетворювач, який, в свою чергу, живить електродвигун.

Специфіка роботи частотних перетворювачів така, що він містить трифазний випрямляч і коло постійного струму (DC шина), до якої під'єднується гальмівний резистор. Пропонується замість гальмівного резистора встановити блок накопичення енергії, який складається із суперконденсаторів та акумуляторів. Гальмівний резистор можна виключити із системи повністю, або ж залишити, як елемент додаткового захисту, під'єднавши через захисний пристрій. Якщо блок накопичення енергії буде повністю заповнений рекуперованою енергією і вона в цей час буде споживатись менш інтенсивніше, пристрій захисту перенаправить потік регенованої енергії на гальмівний резистор.



Рис. 5. Блок-схема запропонованого пристрою рекуперації енергії

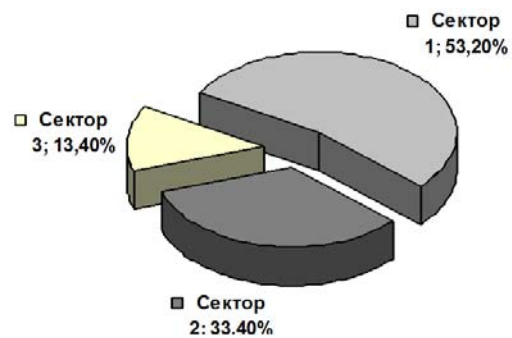


Рис. 4. Енергетична ефективність ліфтових підймальних механізмів: сектор 1 – витрати електроенергії редукторної лебідки; сектор 2 – витрати електроенергії безредукторної лебідки; сектор 3 – витрати електроенергії безредукторної лебідки в парі з пристроєм рекуперації

### Висновки

Актуальність питання енергозбереження вимагає детального розгляду як з наукової, так і з технічної точок зору. Енергетична ефективність пристрою рекуперації підтверджена рядом експериментів і складає 20–40% в залежності від ряду факторів: типу лебідки, висоти підйому, завантаженості кабіни ліфта тощо. В даній статті пропонується пристрій рекуперації енергії, який використовує блок накопичення енергії у вигляді поєднання суперконденсаторів та акумуляторів. Це дозволяє максимально швидко акумулювати енергію, яка рекуперується, підвищує термін експлуатації акумуляторних батарей, дозволяє адаптувати дану систему в будь-яку сучасну станцію керування ліфтом та значно знижує собівартість споживаної електроенергії.

### Література

1. ДСТУ EN 81-1:2003. EN 81-1:1998. IDT. Норми безпеки до конструкції та експлуатації ліфтів. Частина 1. Ліфти електричні.
2. Стецюк В. І. Рекуперація енергії в ліфтових механізмах / В. І. Стецюк, О. В. Полуденний // 24-та Всеукраїнська науково-практична Інтернет-конференція «Ключові проблеми сучасної науки» 15-30 вересня 2016. Україна, – Дніпропетровськ, С. 77-83.
3. Бойко А. А. Влияние номинальной скорости кабины на производительность пассажирских лифтов. – Одеса: Інтерпрінт, 2013. – С. 38-43
4. Семенюк В. Ф. Комплексный метод анализа энергоэффективности лебедок пассажирских лифтов с применением энергетических диаграмм // Науково-технічний та виробничий журнал «Підйомно-транспортна техніка». – Вип. 4 (44). – Одеса: Інтерпрінт, 2014. – С. 24-29

Рецензія/Peer review : 16.9.2016 р.

Надрукована/Printed : 31.10.2016 р.  
Рецензент: д.т.н., доц. Любчик В.Р.