

ПИТАННЯ ОЦІНКИ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ЛІФТІВ

А. О. Бойко, О. В. Найдено, В. І. Ткач, Д. І. Ковальський
Одеський національний політехнічний університет

Анотація. В роботі розглядаються питання можливості оцінки енергетичної ефективності сучасних пасажирських ліфтів. Особливу увагу приділяється рекуперації, як найбільш енергоефективному виду гальмування. Пропонується методика, яка дозволяє якісно приблизно оцінити можливість рекуперації в довільних ліфтових електроприводах, на підставі каталожних параметрів, що присутні у відкритих джерелах. Визначається граничне значення еквівалентного коефіцієнта корисної дії ліфтової електромеханічної системи, при якому рекуперація енергії в циклі «пуск – гальмування» відсутня.

Ключові слова: пасажирський ліфт, електропривод ліфту, лебідка, оцінка енергоефективності, коефіцієнт корисної дії, рекуперація енергії.

Вступ

Мінімальним вимогам типових оптимальних діаграм руху задовольняють пасажирські ліфти з електроприводами із черв'ячними редукторами, двошвидкісними асинхронними двигунами (АД) і нерегульованими системами управління (рис. 1). Такі редукторні електроприводи (ЕП) знайшли широке застосування в пасажирських ліфтах, встановлених у житлових будинках 70-х - 90-х років минулого сторіччя та характеризуються у літературі, як «традиційні ліфтові електроприводи» або ЕП з «лебідками традиційної конструкції» [1].

Обмеженню динамічних параметрів ЕП сприяють форма механічної характеристики двошвидкісного АД, велика інерційність сумарної механічної частини лебідки та приводного двигуна. У деяких випадках для зменшення прискорення на валу двигуна встановлюються додаткові маси у вигляді маховика. При подібному конструктивному виконанні, наявність або відсутність пасажирів впливає на загальну масу рухливих частин електроприводу в межах декількох відсотків, що сприяє підтримці необхідних значень прискорень. Обмеженню ривків сприяють електромагнітна інерційність двошвидкісного асинхронного двигуна і механічна пружність канатної передачі. Застосовуване компонування та технічні рішення традиційних ліфтових ЕП, забезпечує комфортність переміщення пасажирів і роботу ліфтів навіть при досить обмежених можливостях релейно – контакторних систем управління [2].

© Бойко А. О., Найдено О. В., Ткач В. І.,
Ковальський Д. І., 2024

Однак, загальновідомі і недоліки таких електроприводів, що випливають із особливості їх конструкції. Насамперед - це низька енергетична ефективність [3]. Черв'ячні редуктори мають дуже низький (60% - 75%) коефіцієнт корисної дії (ККД). Невеликий, порядку 80% на робочій швидкості, ККД, має і двошвидкісний асинхронний двигун. На зниженій швидкості АД його ККД ледь доходить до 30% - 40%. Відома і незадовільна енергетика традиційних редукторних електроприводів і в динамічних режимах [1]. Завдяки наявності черв'ячного редуктора, питома вага корисної маси вантажу ледь доходить до 0,1 від сумарної приведеної маси ліфтового піднімального механізму. Це означає, що на розгін цих інерційних мас із мережі витрачається надлишкова енергія. Надії на повернення в мережу цієї накопиченої енергії при гальмуванні не виправдовуються [4].

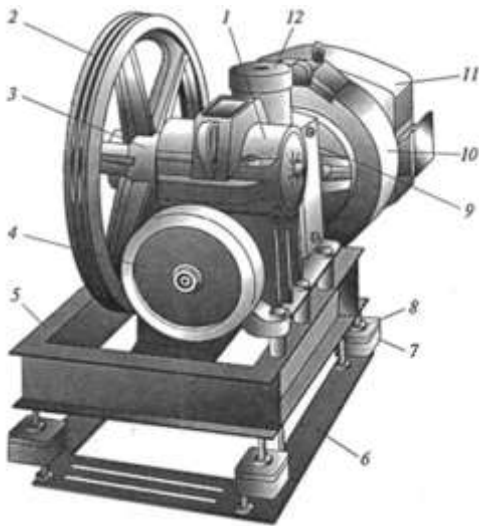
1. Аналіз літератури та постановка проблеми.

Питанням енергоефективності ЕП пасажирських ліфтів присвячено багато аналітичних робіт дослідників, як з України так і світу. Особливу увагу приділяється питанням рекуперації, як найбільш енергоефективному виду гальмування [5]. Визначається, що у режимі, що встановився, рекуперація енергії можлива, якщо потужність активних сил перевищує сумарні втрати потужності. Наприклад, у режимах спуску навантаженої кабіни або підйому порожньої кабіни з урахуванням реактивного характеру усіх сил і моментів втрат. Рекуперація може виконуватися тільки в тому випадку, якщо сума складових активної сили ваги буде перевищувати суму втрат, викликаних реактивними силами, тобто

коли з'являється надлишкова енергія. Для нерегульованої системи управління двигунами ліфтів, рекуперация при спуску кабіни можлива тільки тоді, коли маса вантажу наближається до номінальної, або перевищує її. В більшості інших варіантах завантаження кабіни, двигун лебідки буде працювати в руховому режимі. При застосуванні регульованої системи управління тиххідними двигунами безредукторних електроприводів, рекуперация можлива при невеликих ребалансах сил ваги кабіни з вантажем і противаги [6].



а



б

Рис. 1. - Загальний вид (а) і функціональна схема (б) лебідки традиційної конструкції.
 1 — черв'ячний редуктор; 2 — канатоведучий шків; 3 — ковпак; 4 — штурвал; 5 — рама;
 6 — підрамник; 7 — пружний амортизатор;
 8 — чашка; 9 — муфта; 10 — клемна коробка;
 11 — приводний двошвидкісний асинхронний електродвигун; 12 — колодкеве гальмо.

При синтезі нових типів ліфтових електроприводів актуальне питання про необхідну відмову від черв'ячного редуктора (застосування циліндричних або планетарних редукторів) або повній відмові від редуктора (безредукторні лебідки), як одному зі шляхів підвищення їх ефективності. На сьогоднішній день, розробкою безредукторних ЕП, у яких канатоведучий шків установлюється безпосередньо на валу приводного тиххідного двигуна (наприклад, рис. 2), займається більшість світових розробників пасажирських ліфтів [2].

Економічність і енергоефективність безредукторних електроприводів досягається, насамперед, за рахунок вилучення одного з основних механічних ланок - редуктора й зменшення обсягів кінетичної енергії, яку запасав тиххідний двигун при пуску [7]. Разом з тим, аналіз реальної енергетичної ефективності лебідок нових типів у більшості випадків обмежується відсутністю інформації про їх основні базові показники [8]. При аналітичному огляді ліфтових ЕП різних виробників найчастіше зустрічаються вираження: "...впровадження даного технічного рішення привело до зменшення споживання енергії на 40%, 50% або 90%". У більшості випадків, ці твердження не інформативні. Як правило, порівняння виконується з попереднім подібним конструктивним зразком електроприводу саме цього розробника [9]. При цьому, кожний виробник випускає великий перелік ліфтів різної вантажопідйомності і швидкості, кожний виробник має свої традиції конструювання, використовує різні матеріали й закладає різні запаси міцності.

Отже, маси рухливих частин ліфтів - кабіни, противаги, двигуна, редуктора, шківів, канатів і блоків, також відрізняються. Пасажирські ліфти встановлюються в будинках різного призначення, і величина споживаної енергії прямо залежить від параметрів пасажиропотоку і графіка експлуатації протягом інтервалів часу. І нарешті, характер і величина завантаження кабіни ліфта приводить до того, що певний час двигун лебідки може працювати в генераторному режимі. При цьому істотне значення має спосіб використання енергії, що генерується: накопичення в конденсаторах фільтра (спеціальних накопичувачах), розсіювання на гальмових резисторах у вигляді нагрівання, або рекуперация – віддача енергії у мережу [10].

Мета роботи: визначення спрощеної методики попереднього аналізу енергоефективності електроприводів пасажирських ліфтів, зокрема оцінки можливості рекуперации, на підставі ката-

ложних параметрів, що присутні у відкритих джерелах.

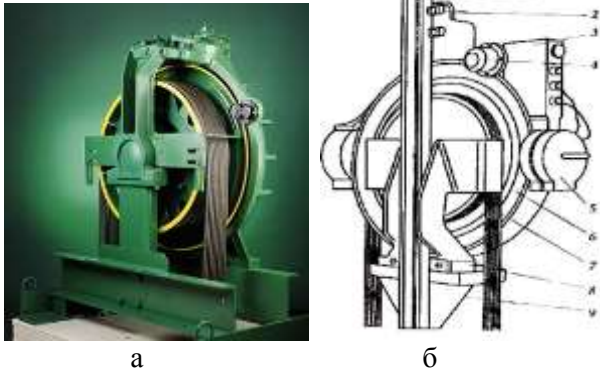


Рис. 2. Безредукторна лебідка «Ecodisc» KONE: загальний вид у виконанні з машинним приміщенням (а); функціональна схема (б).

- 1 — напрямні кабінні; 2, 8 — притисні планки кріплення лебідки;
3 — клемна коробка; 4 — тахогенератор системи керування роботою двигуна;
5 — електромагніт, що розгальмовує;
6 — дискове гальмо з канатоведучим і гальмовим шківом;
7 — тягові канати; 9 — корпус лебідки.

2. Основний матеріал дослідження

У динамічних режимах, якщо обсяг кінетичної енергії прийняти за одиницю, то при пуску кабінні, з мережі споживається енергія, яка дорівнює [11]

$$A_n = \frac{1}{\eta} \quad (1)$$

η — еквівалентний ККД лебідки, приводного двигуна й системи керування, в.о.

Втрати енергії в перетворювачах енергії

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

При гальмуванні, в мережу віддається енергія $\Delta T = \eta$, а втрати

$$\Delta A_n = 1 - \eta \quad (3)$$

Можна знайти таке граничне значення ККД η_v , при якому рекуперація енергії в циклі «пуск – гальмування» відсутня. Очевидно, що це буде виконуватися, коли сума втрат енергії при пуску електропривода і при гальмуванні дорівнювати кінетичної енергії

$$\eta_v^2 + \eta_v - 1 = 0 \quad (4)$$

звідки може бути знайдена величина граничного значення коефіцієнта корисної дії. Ця величина становить $\eta_v = 0,618$. При цьому значенні ККД, у циклі «пуск – гальмування» з мережі споживається енергія, яка дорівнює кінетичної енергії в складових ліфтового електроприводу, а кінетична енергія, яка віддається при гальмуванні, компенсує втрати енергії [12]. Якщо ККД більше цього граничного значення, то рекуперація енергії можлива, а з мережі споживається енергія, яка менша обсягу кінетичної енергії. Очевидно, що при значеннях еквівалентного ККД менших значення η_v рекуперація неможлива. При аналізі потрібно обов'язково, враховувати «відстань» кожного з елементів ліфтового підйомного механізму від мережі живлення. Так, лебідка «з'єднана» з мережею за допомогою електромеханічного перетворювача із ККД, наприклад $\eta_{дв} = 0,9$, і напівпровідникового перетворювача з досить великим коефіцієнтом корисної дії, $\eta_{нп} = 0,97$. Загальний ККД становить $\eta = 0,873$. Тому в циклі віддачі кінетичної енергії ротором двигуна втрати енергії не тільки компенсуються, але і деяка частина енергії може бути регенована у мережу. Для елементів підйомного механізму, які конструктивно знаходяться «далі» від мережі, а це - вантаж, кабінні і противага, еквівалентне значення ККД може виявитися таким, що виключить можливість рекуперації ЕП. Наприклад, ККД ліфта з редукторною лебідкою, асинхронним двигуном з частотною системою управління $\eta_{кп} \cdot \eta_p \cdot \eta_{дв} \cdot \eta_{нп} = 0,95 \cdot 0,75 \cdot 0,9 \cdot 0,97 = 0,622$, перебуває на границі можливої умови рекуперації. Для традиційного редукторного електроприводу сумарний ККД менш $\eta = 0,618$, а рекуперація відсутня [2, 8]. Для безредукторного ліфтового електроприводу коефіцієнт корисної дії складає $\eta_{кп} \cdot \eta_{дв} \cdot \eta_{нп} = 0,95 \cdot 0,81 \cdot 0,97 = 0,746$, при цьому рекуперація частини накопиченої кінетичної енергії здійснюється, що підтверджується багатьма експериментами.

Висновки

Актуальним напрямком розвитку ліфтових електроприводів, є перехід від редукторних конструкцій до безредукторних, застосування регульованих систем управління. У цьому напрямку, на сьогоднішній день, працюють переважна більшість світових розробників пасажирських ліфтів.

Практично усі провідні розробники не надають конкретну технічну інформацію про нові типи ліфтових електроприводів. Провести об'єктивну порівняльну оцінку енергетичної ефективності електроприводів різного виконання і різних

виробників за допомогою загальноприйнятих методів дуже важко або неможливо.

Запропонована методика дозволяє, з достатнім ступенем вірогідності, оцінити можливість рекуперації у довірливих ліфтових електроприводах, на підставі каталожних параметрів, що присутні у відкритих джерелах.

Остаточний кількісний висновок щодо рекуперації окремими складовими ліфтових електроприводів можна робити тільки після зведення балансу енергії всіх їх елементів.

Список використаної літератури

1. Бойко, А. А., Семенюк, В. Ф., Соколов, Я. А., Зубак, В. В. (2020). Особенности повышения эффективности лифтовых лебедок традиционной конструкции. *Научно-технический та виробничий журнал «Підйомно-транспортна техніка»*, 1(62), 29-44. <https://doi.org/10.15276/pidtt.1.62.2020.03>

2. Boiko, A., Naidenko, E., Besarab O., Bondar, O. (2023). Analysis of Factors Affecting the Energy Efficiency of an Elevator Winch. *InterPartner: Advanced Manufacturing Processes*. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7>

3. Shrivastava, N., Pande, A., Lele, J., Kampassi, K. Embedded (2018). Control System for Self Adjusting Scissor Lift, 2018 Fourth International Conference on Computing Communication Control and Automation (ICCUBEA), 1-5. doi: 10.1109/ICCUBEA.2018.8697800

4. Jiwen, H., Zaiping, Z., Zheng, J., Li, J. (2019). A survey of braking energy recovery and management technology. 2019 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), 978-998. doi: 10.1109/ITEC-AP.2014.6941262

5. Mathew, S., Mogre, P., Chouthai, R., Karandikar, P. B., Kulkarni, N. R. (2019). Supercapacitor based energy recovery system for an elevator. 2019 International Conference on Advances in Computing, Communication and Control (ICAC3), doi: 2034-2049. 10.1109/ICAC3.2017.8318788

6. Jabbour, N., Mademlis, C. (2019). Improved Control Strategy of a Supercapacitor-Based Energy Recovery System for Elevator Applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31, issue: 12, 8398- 8408. doi: 10.1109/TPEL.2016.2516104

7. Smotrov, E. A. (2014). Reкуператор of the electric drive of the lift. *Electrical and Computer Systems*, Kiev, Ukraine, Science, 16(92), 16 - 25. <https://eltechs.op.edu.ua/index.php/journal/article/view/1677/856>

8. Семенюк, В. Ф., Бойко А. А. (2014) Комплексный метод анализа энергоэффективности

лебедок пассажирских лифтов с применением энергетических диаграмм. *Научно-технический та виробничий журнал «Підйомно-транспортна техніка»*, 4(44), 24 - 29. <https://ptt-journals.net/wp-content/gallery/Pidtt%202014%204%205>.

9. Li, Z., Huang, G., Ma, H., He, Z. (2021). Comparative Study on Energy Efficiency Testing Methods of Different Types of Elevators. 7th International Conference on Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations (CMMNO). doi: 874-899. 10.1109/CMMNO53328.2021.9467526

10. Jiang X., Namokel, M., Hu, C., Tian, R., Dong, J. (2020). Research on Energy Saving Control of Elevator . 2020 International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS), 1134-1148. doi: 10.1109/ICCAIS46528.2019.9074551

11. Йорг, Х. (2010). Энергетический ККД лифтов. *Лифтииформ*, 3, 52-56.

12. Bilbao, E., Barrade, Ph., Etxeberria-Otadui, I., Rufer, A., Luri, S., Gil I. (2019), Optimal Energy Management Strategy of an Improved Elevator With Energy Storage Capacity Based on Dynamic Programming. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 2, 1233 - 1244. doi: 10.1109/TIA.2002.803021.

References list

1. Boiko, A.A., Semenyuk, V.F., Sokolov, Y. A., Zubak, V. V. (2020). "Features of increasing the efficiency of lift winches of traditional design" [Osobennosti povisheniya effektivnosti liftovih lebedok tradizionnoy konstrukzii]. *Scientific, technical and production magazine "Lifting and transport equipment"* [Naukovo-tehnichniy ta virobnichniy jurnal «Pidyomno-transportna tehnika»], 1(62), 29-44. <https://doi.org/10.15276/pidtt.1.62.2020.03>

2. Boiko, A., Naidenko, E., Besarab O., Bondar, O. (2023). Analysis of Factors Affecting the Energy Efficiency of an Elevator Winch. *InterPartner: Advanced Manufacturing Processes*. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7>

3. Shrivastava, N., Pande, A., Lele, J., Kampassi, K. Embedded (2018). Control System for Self Adjusting Scissor Lift, 2018 Fourth International Conference on Computing Communication Control and Automation (ICCUBEA), 1-5. doi: 10.1109/ICCUBEA.2018.8697800

4. Jiwen, H., Zaiping, Z., Zheng, J., Li, J. (2019). A survey of braking energy recovery and management technology. 2019 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), 978-998. doi: 10.1109/ITEC-AP.2014.6941262

5. Mathew, S., Mogre, P., Chouthai, R., Karandikar, P. B., Kulkarni, N. R. (2019). Supercapacitor based energy recovery system for an elevator. 2019 International Conference on Advances in Computing, Communication and Control (ICAC3), doi: 2034-2049. 10.1109/ICAC3.2017.8318788
6. Jabbour, N., Mademlis, C. (2019). Improved Control Strategy of a Supercapacitor-Based Energy Recovery System for Elevator Applications. IEEE Transactions on Power Electronics, 31, issue: 12, 8398- 8408. doi: 10.1109/TPEL.2016.2516104
7. Smotrov, E. A. (2014). Rekuperator of the electric drive of the lift. Electrical and Computer Systems, Kiev, Ukraine, Science, 16(92), 16 - 25. <https://eltechs.op.edu.ua/index.php/journal/article/view/1677/856>
8. Semenyuk, V.F., Boiko, A.A.. (2014) "A comprehensive method for analyzing the energy efficiency of passenger elevator winches using energy diagrams" [Kompleksniy metod analiza energoefektivnosti lebedok passajirskih liftov s primeneniem energeticheskikh diagram]. Scientific, technical and production magazine "Lifting and transport equipment" [Naukovo-tehnichniy ta virobnichniy jurnal «Pidyomno-transportna tehnika»], 4(44), 24 - 29. <https://ptt-journals.net/wp-content/gallery/Pidtt%202014%204%205>.
9. Li, Z., Huang, G., Ma, H., He, Z. (2021). Comparative Study on Energy Efficiency Testing Methods of Different Types of Elevators. 7th International Conference on Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations (CMMNO). doi: 874-899. 10.1109/CMMiNO53328.2021.9467526
10. Jiang X., Namokel, M., Hu, C., Tian, R., Dong, J. (2020). Research on Energy Saving Control of Elevator . 2020 International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS), 1134-1148. doi: 10.1109/ICCAIS46528.2019.9074551
11. Jörg, X. (2010). "Energy efficiency of elevators" [Energeticheskiy KPD liftov]. Liftiiform, 3, 52-56.
12. Bilbao, E., Barrade, Ph., Etxeberria-Otadui, I., Rufer, A., Luri, S., Gil I. (2019), Optimal Energy Management Strategy of an Improved Elevator With Energy Storage Capacity Based on Dynamic Programming. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 50, no. 2, 1233 - 1244. doi: 10.1109/TIA.2002.803021.

ISSUE OF ENERGY EFFICIENCY ASSESSMENT OF ELEVATORS ELECTRIC DRIVES

A. O. Boyko, O. V. Naidenko, V. I. Tkach, D. I. Kovalsky

¹Odesa Polytechnic National University

Abstract. *The work deals with the possible assessment of the energy efficiency of modern passenger elevators. Special attention is paid to the issue of recuperation, as the most energy-efficient type of braking. A method is proposed that allows you to qualitatively and roughly estimate the possibility of recuperation in arbitrary elevator electric drives, based on the catalog parameters that are present in open sources. The limiting value of the equivalent efficiency coefficient of the elevator electromechanical system, at which there is no energy recovery in the "start-up-braking" cycle, was determined. At the limit value of the coefficient of useful action, energy equal to the kinetic energy of the lifting mechanism is consumed from the network. Kinetic energy, which is released during braking, compensates for energy losses. If the equivalent coefficient of useful action is greater than the limit value, then energy recovery in the elevator electric drive is possible, and the energy consumed from the network is less than the amount of kinetic energy of the elevator lifting mechanism.*

Keywords: *passenger elevator, elevator electric drive, winch, energy efficiency assessment, efficiency factor, energy recovery.*

Отримано 28.06.2024



Бойко Андрій Олександрович, Національний університет «Одеська політехніка», доктор технічних наук, професор, професор кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, 65044, Одеса, просп. Шевченка, 1, НУ «ОП», E-mail: a.o.boyko@op.edu.ua, тел. +38-048-7058581

Boiko Andrii, Odesa Polytechnic National University, Dr. of Science, Professor of department of electricity and energy management. Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine, E-mail: a.o.boyko@op.edu.ua, ph. +38-048-7058581

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0048-9259>



Найденко Олена Валеріївна, Національний університет «Одеська політехніка», кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, просп. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044 E-mail: avnaidenko@op.edu.ua, тел. +38-048-7057388

Olena Naidenko, Odesa Polytechnic National University, PhD technical, associate professor, associate professor of department of electricity and energy management. Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine, E-mail: avnaidenko@op.edu.ua, ph. +38-048-7057388

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5684-5617>



Ткач Володимир Іванович, Державна інспекція енергетичного нагляду України, кандидат технічних наук, начальник Управління держенергонагляду в Одеській області, 65049, вул. Івана Франка, 55, E-mail: volodymyrTkach@gmail.com, тел. (048) 7531040

Volodymyr Tkach, State Energy Inspectorate of Ukraine, Candidate of Technical Sciences, Head of the State Energy Inspection Department in Odessa region, 65049, st. Ivana Franka, 55, E-mail: volodymyrTkach@gmail.com, , ph. (048) 7531040



Ковальський Дмитро Ігорович, Національний університет «Одеська політехніка», здобувач освіти рівня PhD кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, 65044, Одеса, просп. Шевченка, 1, НУ «ОП», E-mail: dmytro.od.ua@gmail.com, тел. (048)7058567,

Dmytro Kovalskiy, Odesa Polytechnic National University, student of the PHD Department of Electrical Supply and Energy Management, 65044, Odessa, prosp. Shevchenka, 1, NU “OP”, E-mail: dmytro.od.ua@gmail.com, , ph. (048)7058567.

ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-4486-4102>