

УДК 621.313.16

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ЛІФТОВОЇ ПІДЙОМНОЇ УСТАНОВКИ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ВЕКТОРНО КЕРОВАНОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА

Отримано 6 лютого 2022; рекомендовано до публікації 21 березня 2022
Доступно онлайн 29 черв. 2022

М. В. Печеник¹, С. О. Бур'ян², М. Г. Котенко³

Автор для кореспонденції: Сергій Бур'ян
e-mail: sburyan18@gmail.com

¹ канд. техн. наук, професор
<https://orcid.org/0000-0002-4527-1125>

² канд. техн. наук, доцент
<https://orcid.org/0000-0002-4947-0201>

³ магістр

^{1, 2, 3} Національний технічний університет України
«Київський технічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

Ліфтові підйомні установки є одним з основних видів вертикального транспорту людей і вантажів в адміністративних та жилих будівлях. При їх проектуванні та експлуатації до електромеханічних систем пред'являється ряд вимог що стосуються безпеки експлуатації і рівня енергетичної ефективності механізму в цілому.

Задача дослідження полягає в забезпеченні необхідної за умовами Правил безпеки, точності відпрацювання заданого закону руху кабіни підйомної установки в межах робочого циклу. Одним з напрямів вирішення даної задачі є використання нових сучасних систем електропривода серед яких одним з найбільш перспективних являється електромеханічна система з використанням векторно керованого асинхронного електродвигуна.

На прикладі конкретної ліфтової підйомної установки в межах пакета прикладних програм «MATLAB» розроблена модель електромеханічної системи для виконання досліджень її статичних та динамічних режимів роботи.

Дослідження проведено при використанні заданої діаграми швидкості при відсутності періоду дотягування.

На базі аналізу результатів досліджень точності позиціонування підйомної установки та її енергетичних показників обґрунтована доцільність використання електромеханічної системи ліфтової підйомної установки з векторним керуванням. Отриманий рівень точності відпрацювання заданої діаграми руху підйомної установки дозволяє виключити з загального алгоритму руху період дотягування, що в свою чергу призводить до зниження рівня капітальних та експлуатаційних затрат, а також до підвищення рівня продуктивності механізму в цілому. Бібл. 15, рис. 8.

Ключові слова: ліфтова підйомна установка, векторне керування, точність позиціонування, енергетична ефективність, похибка за швидкістю, втрати потужності, статичне навантаження.

RESEARCHING OPERATING MODES OF ELECTROMECHANICAL ELEVATOR SYSTEM USING VECTOR CONTROLLED ASYNCHRONOUS MOTOR

Received 6 Feb. 2022; accepted 21 March 2022
Available online 29 June 2022

Mykola Pechenik¹, Serhii Burian², Maksym Kotenko³

Author for correspondence Serhii Burian
e-mail: sburyan18@gmail.com

¹ Professor, PhD of Technical sciences
<https://orcid.org/0000-0002-4527-1125>

² Associate Professor, PhD of Technical sciences
<https://orcid.org/0000-0002-4947-0201>

³ Master student

^{1, 2, 3} Department of Automation of Electromechanical Systems and Electric Drive of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Igor Sikorsky KPI)

Elevator systems are one of the main types of vertical transportation of people and goods in office and residential buildings. Designing them, electromechanical systems have a number of requirements regarding the safety of operation and the level of energy efficiency of the mechanism in general.

The task of the research is to ensure the accuracy of the specified motion law of the cab within the operating cycle which is required by the terms of the Safety Rules. One of the ways to solve this

problem is using new modern electric drive systems, and one of the most promising is the electromechanical system using vector-controlled induction motor.

Using a specific elevator system within the package of applications "MATLAB" was developed a model of electromechanical system for research its static and dynamic operation modes.

The research was done using a given velocity diagram and the absence of a crawling speed period.

Basing on the analysis of research results of positioning accuracy of the elevator system and its power indicators we can say that expediency of using of electromechanical system of the elevator hoisting installation with vector control is proved. The obtained accuracy level working on the specified movement diagram of the elevator system allows to exclude crawling speed period from the general algorithm of movement what allows to decrease level of capital and operational costs, and also to increase of level of productivity of the mechanism as a whole. Bibl. 15, fig. 8.

Keywords: elevator system, vector control, positioning accuracy, energetic efficiency, working error by speed, power wastes, static load.

Вступ. На сучасному етапі розвитку суспільства виникає необхідність створення більш сучасних систем вертикального транспорту здатних виконати переміщення людей і вантажів на велику висоту при збільшенні продуктивності ліфтових підйомних установок [1]. Одночасно з цим значно підвищуються вимоги до забезпечення безпечних і комфортних умов переміщення людей та вантажів, а також до умов експлуатації механізмів підйому [2, 3].

Одним із основних прикладів вирішення поставленої задачі є підвищення точності відпрацювання заданої діаграми швидкості переміщення кабіни ліфта у межах робочого циклу, а разом з цим і точності позиціонування кабіни ліфта на рівні приймального майданчика [4].

Іншим не менш важливим напрямом є підвищення рівня енергетичної ефективності функціонування механізму підйому [5, 6]. Питання підвищення рівня безпеки та надійності підйомних установок можуть вирішуватися за рахунок вдосконалення конструктивних елементів, законів керування, використання альтернативних джерел енергії [7, 8, 9].

Існуючі ліфтові підйомні установки як правило забезпечені асинхронними електроприводами у яких питання точного позиціонування вирішується за рахунок використання періоду дотягування (рух з малою постійною швидкістю), в процесі якої забезпечується компенсація накопиченої за період циклу похибки регулювання. Разом з цим наявність вказаного періоду діаграми швидкості призводить до збільшення часу робочого циклу підйому, зниження продуктивності, підвищення капітальних та експлуатаційних витрат [10, 11].

В таких умовах достатньо актуальною являється задача підвищення точності відпрацювання заданої тахограми в межах робочого циклу і забезпечення точного позиціонування кабіни ліфта на необхідному рівні при відсутності періоду дотягування.

Одним із перспективних напрямів вирішення даної задачі являється використання нових сучасних си-

стем електроприводу, в тому числі векторно керованих асинхронних електродвигунів [12, 13].

Разом з цим для розробки рекомендацій по використанню в ліфтових підйомних установках електромеханічних систем з векторним керуванням необхідно провести дослідження рівня точності позиціонування кабіни ліфта в межах приймального майданчика у всьому діапазоні коливань статичного навантаження, а також дати оцінку характеру розподіленню втрат активної потужності за робочий цикл.

Мета та завдання дослідження. На основі аналізу рівня точності позиціонування кабіни ліфтової підйомної установки і характеру втрат активної потужності за робочий цикл у всьому діапазоні коливань навантаження визначити доцільність використання в ліфтових підйомних установках електромеханічних систем з векторно керованими асинхронними електродвигунами.

Матеріали досліджень. Дослідження проведені на базі електромеханічної системи ліфтової підйомної установки функціональна схема якої приведена на рис. 1.

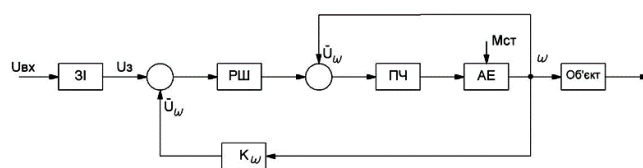


Рис. 1. Функціональна схема електромеханічної системи ліфта

Fig 1. Functional scheme of the elevator system

$U_{вх}$ - вхідний сигнал управління; $ЗІ$ - задатчик інтегровності; $РШ$ - регулятор швидкості; $ПЧ$ - перетворювач частоти; $АЕ$ - асинхронний електродвигун; $U_{шв}$ - сигнал зворотного зв'язку по швидкості; $K_{шв}$ - коефіцієнт передачі ланки зворотного зв'язку по швидкості; ω - кутова швидкість електродвигуна; M_c - момент статичного навантаження; U_z - сигнал завдання за швидкістю.

При використанні загальноприйнятої методики [14, 15] отримано математичний опис елементів електромеханічної системи (двофазну модель асинхронного електродвигуна, перетворювача частоти), виконано синтез регулятора швидкості. При використанні пакета прикладних програм «MATLAB Simulink» розроблена модель для дослідження статичних і динамічних режимів роботи електромеханічної системи ліфтової підйомної установки. Дослідження проведено на прикладі підйомної установки з наступними параметрами: висота підйому – 60м, номінальне навантаження – 1150 кг, потужність електродвигуна – 30 кВт, номінальна кутова швидкість – 102,78 рад/с.

Конструкція підйомної установки побудована за принципом «гойдаючихся майданчиків» і забезпечує завантаження і розвантаження кабіни у підвішеному стані без використання робочого гальмування підйомної машини. При проведенні досліджень використано діаграму швидкості без періоду дотягування. Графік заданої діаграми швидкості та прискорення приведено на рис. 2

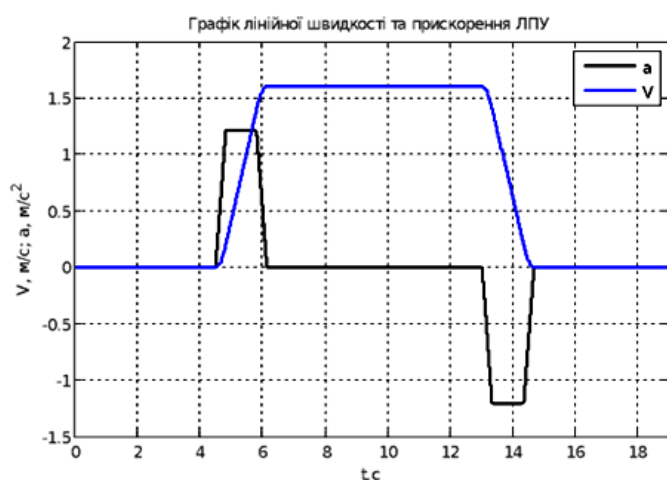


Рис. 2. Графік зміни лінійної швидкості та прискорення ліфтової підйомної установки

Fig. 2. Graph of change of linear speed and acceleration in elevator system

В період $t = 0 - 4,5$ с кабіна ліфта нерухома, відбувається її завантаження;

$t = 4,5 - 6,5$ с – режим пуску до сталої швидкості;

$t = 6,5 - 13$ с – статичний режим руху;

$t = 13 - 14,7$ с – режим гальмування;

При $t = 14,7$ с – відбувається зупинка кабіни. В $t = 14,7$ с фіксуються параметри точної зупинки ліфта

Дослідження проведені при варіаціях статичного навантаження $M_c = M_{сн}$; $M_c = 0,9 M_{сн}$; $M_c = 0,7 M_{сн}$, $M_c = 0,3 M_{сн}$.

Для аналогічних умов виконано дослідження енергетичних характеристик активної потужності P_a , механічної потужності P_m та втрат активної потужності $\Delta P = P_a - P_m$.

Результати досліджень для $M_c = M_{сн}$ та $M_c = 0,3 M_{сн}$ наведені на рисунках 3-8 і в таблиці 1.

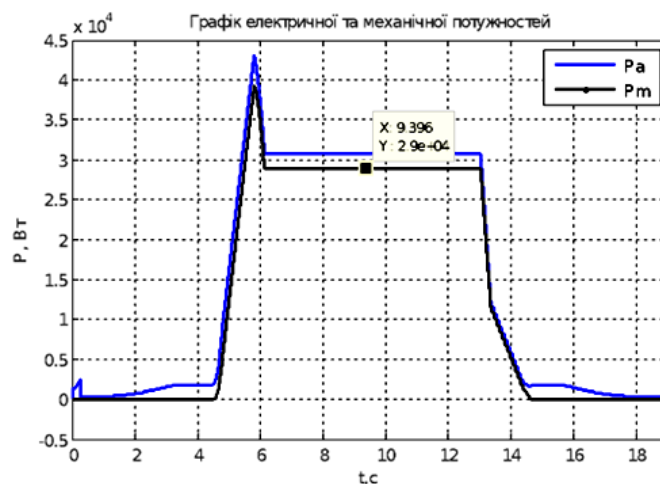


Рис. 3. Графіки електричної та механічної потужностей при $M_c = M_{сн}$

Fig. 3. Graphs of electrical and mechanical power while $M_c = M_{сн}$

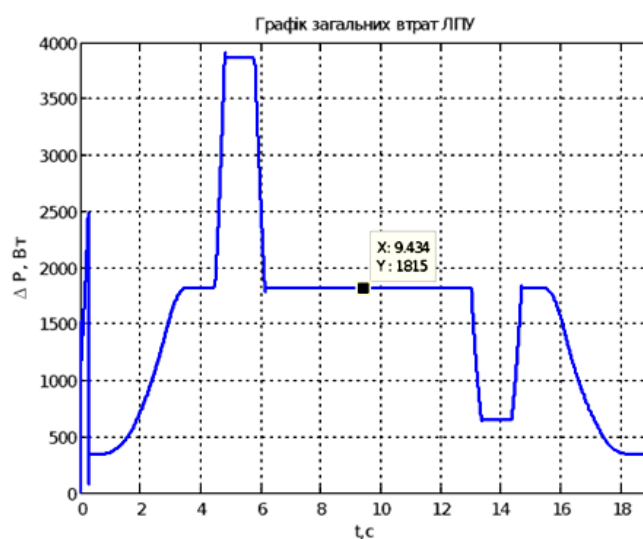


Рис. 4. Графік втрат активної потужності при $M_c = M_{сн}$

Fig. 4. Graph of wastes of active power while $M_c = M_{сн}$

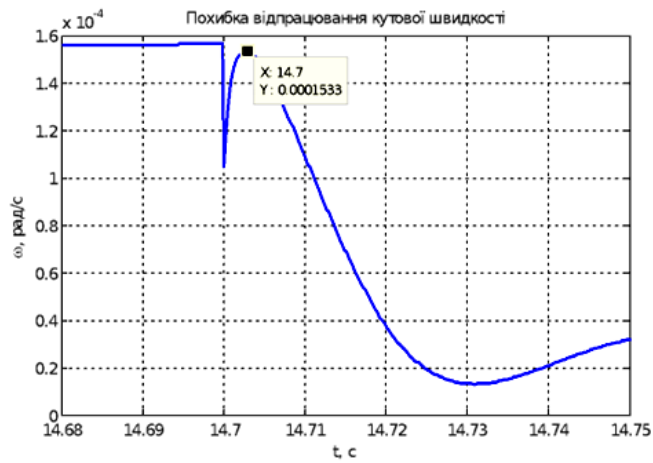


Рис. 5. Графік зміни похибки відпрацювання швидкості в точці зупинки при $M_c = M_{cn}$

Fig. 5. Graph of change of working error by speed in stopping point while $M_c = M_{cn}$

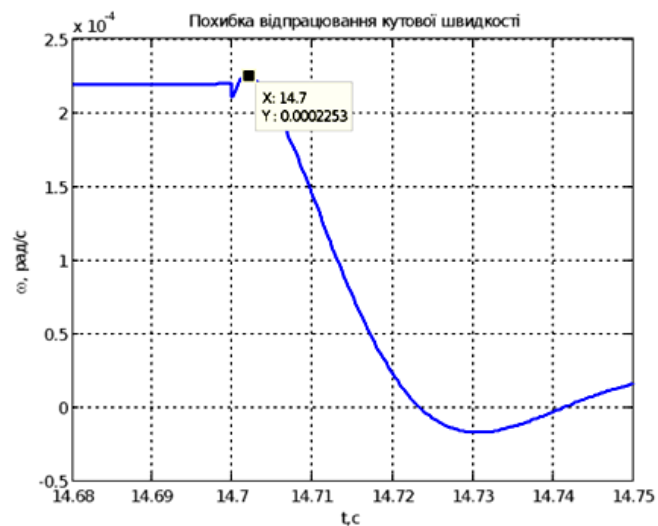


Рис. 6. Графік зміни похибки відпрацювання швидкості в точці зупинки при $M_c = 0,3M_{cH}$

Fig. 6. Graph of change of working error by speed in stopping point while $M_c = 0,3M$

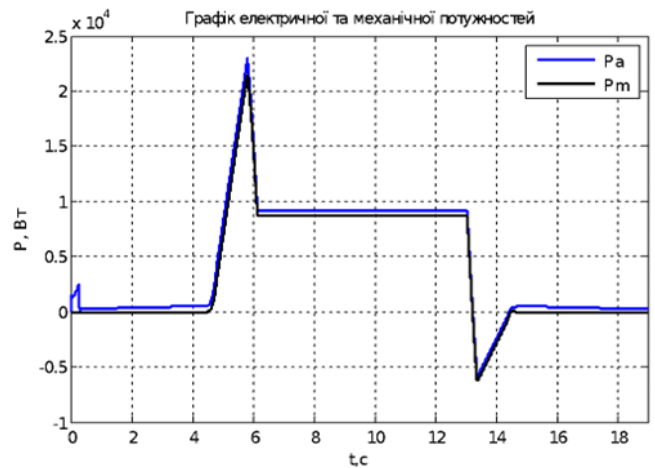


Рисунок 7. Графік електричної та механічної потужностей при $M_c = 0,3M_{cH}$

Fig 7. Graphs of electrical and mechanical power while $M_c = 0,3M_{cH}$

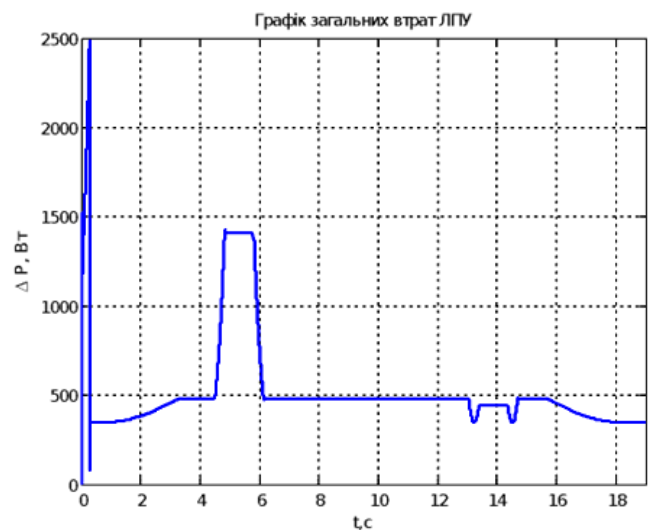


Рисунок 8. Графік загальних втрат в ЛПУ при $M_c = M_{cH}$

Fig. 8. Graph of wastes of active power while $M_c = M_{cH}$

Таблиця 1

M_c, H	$P_a, Вт$	$P_m, Вт$	$\Delta P, Вт$	$\Delta P_{\%}, \%$	$\tilde{\omega} \cdot 10^{-4}$ рад/с
$0.3M_H = 87$	9180	8700	480	5.22	2.25
$0.5M_H = 145$	15214	14500	714	4.69	1.96
$0.7M_H = 203$	21587	20300	1067	4.94	1.67
$0.9M_H = 261$	27636	26100	1536	5.55	1.34
$M_H = 290$	30815	29000	1815	5.88	1.53

$$\Delta P = P_a - P_m; \quad \Delta P_{\%} = \frac{P_a - P_m}{P_a} \cdot 100\%.$$

Аналіз отриманих результатів дослідження показує, що при використанні електромеханічної системи ліфтової підйомної установки з векторним керуванням та відсутності в заданій діаграмі швидкості періоду дотягування максимальна динамічна похибка кутової швидкості в точці зупинки кабіни ліфта на рівні посадкового майданчика коливається в межах від $2.25 \cdot 10^{-4}$ рад/с до $1.53 \cdot 10^{-4}$ при коливаннях статичного навантаження підйомної установки в межах від 0,3Мсн до Мсн. Час відпрацювання динамічної похибки не перевищує 0.08 с. Рівень похибки по швидкості в точці зупинки кабіни повною мірою задовольняє вимогам правил безпеки при переміщенні людей за допомогою ліфтових підйомних установок.

Втрати активної потужності ΔP при тому ж діапазоні зміни навантаження не перевищують 6% від споживаної активної потужності, що є цілком прийнятним для електромеханічних систем вертикальних підйомних установок. Результати досліджень енергетичних характеристик в межах всього діапазону коливання навантаження електромеханічної системи дозволяє визначити вимоги до проектування джерел енергозабезпечення підйомних установок побудованих на основі відновлювальної генерації.

Висновки.

Аналіз результатів досліджень електромеханічної системи показав що використання електромеханічних систем ліфтових підйомних установок з векторним керуванням дозволяє забезпечити заданий рівень точності відпрацювання діаграми швидкості незалежно від рівня завантаження кабіни ліфта. Величина динамічної похибки за швидкістю незалежно від завантаження кабіни не перевищує рівня що встановлено правилами безпеки та нормами експлуатації та дозволяє відмовитись від періоду дотягування.

Рівень втрат активної потужності у всьому діапазоні зміни статичного навантаження відповідає вимогам енергоефективності підйомних установок циклічної дії.

Враховуючи вищенаведене можна рекомендувати при проектуванні нових та реконструкції діючих ліфтових підйомних установок використання електромеханічних систем з векторно керованими асинхронними електродвигунами.

Отримані режими роботи електроприводу можуть бути використані при формуванні локальної енергетичної системи ліфтової підйомної установки, побу-

дованої на базі засобів відновлювальної енергетики.

ПОСИЛАННЯ

1. F. Shuangchang, C. Jie, and C. Xiaoqing, "Analysis of the hidden danger for old elevator safety" at *Proc. 2020 3rd International Conference on Electron Device and Mechanical Engineering (ICEDME)*, IEEE, 2020, pp. 605–608.
2. C. Y. Lee, and C. H. Lim, "Risk analysis and rescue operation for machine roomless lift: A case study" at *Proc. 2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, IEEE, 2014. pp. 1265–1269.
3. J. Sinay et al. "Lifts as Part of Smart Buildings" at *Proc. 4th EAI International Conference on Management of Manufacturing Systems*, Springer, Cham, 2020. pp. 53–60.
4. S. Feng et al. "Design of measuring device bracket for distance between elevator car and shaft wall" at *Proc. 2021 3rd International Conference on Intelligent Control, Measurement and Signal Processing and Intelligent Oil Field (ICMSP)*, IEEE, 2021, pp. 322–325.
5. T. Tukia, S. Uimonen, M. Lehtonen, M. L. Siikonen and C. Donghi, "Evaluating and improving the energy efficiency of counterbalanced elevators based on passenger traffic", at *Proc. 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, IEEE, 2016. pp. 1–6.
6. D. Erica et al. "Analysis of Regenerative Cycles and Energy Efficiency of Regenerative Elevators", at *Proc. 2021 International Conference on Electrical Drives & Power Electronics (EDPE)*, IEEE, 2021, pp. 212–219.
7. F. Sui et al. "Study on Elevator Absolute Positioning System Based on Magnetic Grid Ruler", at *Proc. 2020 39th Chinese Control Conference (CCC)*, IEEE, 2020. pp. 2561–2566.
8. M. Pechenik, S. Burian, H. Zemlianukhina, and H. Voyat, "Analysis of the Given Law Accuracy of a Mine Skip Lifting Unit Movement Using a Vector-Controlled Electric Drive System" at *Proc. 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, IEEE, 2020, pp. 1–4.
9. L. Arias, D. Mosquera, E. Rivas, and A. Cortes, "Integrated management system for self-sufficient and energy-sustainable buildings" at *Proc. 2021 Fifth World Conference on Smart Trends in Systems Security and Sustainability (WorldS4)*, IEEE, 2021, pp. 36–44.
10. В. В. Григоров, В. В. Стрижак. та ін. *Ліфти: навчальний посібник*, Х.: НТУ «ХПІ», 2016.
11. М. В. Печеник, С. О. Бур'ян, О. А. Войтко, "Підвищення точності відпрацювання заданого циклу руху шахтної клітьової підйомної установки", *Вісник НТУ «ХПІ»*, Харків, 2017, № 27 (1249), – с. 62–65.
12. B. K. Bose, "Energy, environment, and advances in pow-

- er electronics ISIE'2000", *Proc. of the 2000 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, IEEE, 2000, vol. 15, pp. 688–701.
13. М. В. Печеник, С. О. Бур'ян, О. А. Войтко, "Дослідження точності позиціонування шахтної підйомної установки з частотним керуванням", *Електромеханічні та енергетичні системи. Методи моделювання та автоматизації. Збірник матеріалів XV Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і співробітників КрНУ*, Кременчук, с. 33–34, 2017.
 14. С. М. Пересада, С. М. Ковбаса, "Узагальнений алгоритм прямого векторного керування асинхронним двигуном", *Технічна електродинаміка*, № 4, с. 17–22, 2002.
 15. P. G. Kovalchik, and F. T. Duda, "Speed and position sensors for mine hoists and elevators" at *IAS '95. Conference Record of the 1995 IEEE Industry Applications Conference Thirtieth IAS Annual Meeting*, IEEE, 1995, vol. 3, pp. 2054–2056.
 6. D. Erica et al. "Analysis of Regenerative Cycles and Energy Efficiency of Regenerative Elevators", at *Proc. 2021 International Conference on Electrical Drives & Power Electronics (EDPE)*, IEEE, 2021, pp. 212–219.
 7. F. Sui et al. "Study on Elevator Absolute Positioning System Based on Magnetic Grid Ruler", at *Proc. 2020 39th Chinese Control Conference (CCC)*, IEEE, 2020. pp. 2561–2566.
 8. M. Pechenik, S. Burian, H. Zemlianukhina, and H. Voyat, "Analysis of the Given Law Accuracy of a Mine Skip Lifting Unit Movement Using a Vector-Controlled Electric Drive System", at *Proc. 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, IEEE, 2020, pp. 1–4.
 9. L. Arias, D. Mosquera, E. Rivas, and A. Cortes, "Integrated management system for self-sufficient and energy-sustainable buildings" at *Proc. 2021 Fifth World Conference on Smart Trends in Systems Security and Sustainability (WorldS4)*, IEEE, 2021, pp. 36–44.
 10. O. Grigorov, V. Strizhak et al, *Elevators: Tutorial* [in Ukrainian], H.: NTU «HPI», 2016. 172 p.
 11. M. Pechenik, S. Buryan, and O. Voitko, Enhancing the accuracy of determining of the male cycle of magnetic cell accessories [in Ukrainian], *Bulletin of NTU «HPI»*, Kharkiv, № 27 (1249), pp. 62–65, 2017.
 12. B. K. Bose, "Energy, environment, and advances in power electronics ISIE'2000", *Proc. of the 2000 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, IEEE, 2000, vol. 15, pp. 688–701.
 13. M. Pechenik, S. Buryan, O. Voitko, "Investigation of the positioning accuracy of a mine hoist with frequency control" [in Ukrainian], *Elektromekhanichni ta enerhetychni systemy. Metody modeliuвання ta avtomatyzatsii. Zbirnyk materialiv XV Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii molodykh uchenykh i spivrobitnykiv KrNU*, Kremenichuk, 2017, pp.33–34.
 14. S. Peresada, S. Kovbasa, "Generalized algorithm of direct vector control of an induction motor", [in Ukrainian], *Technichna electrodynamika*, № 4, pp. 17–22, 2002.
 15. P. G. Kovalchik, and F. T. Duda, "Speed and position sensors for mine hoists and elevators" at *IAS '95. Conference Record of the 1995 IEEE Industry Applications Conference Thirtieth IAS Annual Meeting*, IEEE, 1995, vol. 3, pp. 2054–2056.

REFERENCES

1. F. Shuangchang, C. Jie, and C. Xiaoqing, "Analysis of the hidden danger for old elevator safety" at *Proc. 2020 3rd International Conference on Electron Device and Mechanical Engineering (ICEDME)*, IEEE, 2020, pp. 605–608.
2. C. Y. Lee, and C. H. Lim, "Risk analysis and rescue operation for machine roomless lift: A case study" at *Proc. 2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, IEEE, 2014. pp. 1265–1269.
3. J. Sinay et al. "Lifts as Part of Smart Buildings" at *Proc. 4th EAI International Conference on Management of Manufacturing Systems*, Springer, Cham, 2020. pp. 53–60.
4. S. Feng et al. "Design of measuring device bracket for distance between elevator car and shaft wall" at *Proc. 2021 3rd International Conference on Intelligent Control, Measurement and Signal Processing and Intelligent Oil Field (ICMSP)*, IEEE, 2021, pp. 322–325.
5. T. Tukia, S. Uimonen, M. Lehtonen, M. L. Siikonen and C. Donghi, "Evaluating and improving the energy efficiency of counterbalanced elevators based on passenger traffic", at *Proc. 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, IEEE, 2016. pp. 1–6.