

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2026-85-46>

УДК 681.5:629.3

МОВЧАН Юрій

Хмельницький національний університет
<https://orcid.org/0009-0007-0790-364X>

МАЙДАН Павло

Хмельницький національний університет
<https://orcid.org/0000-0003-3319-8730>
maidanps@gmail.com

МАКАРИШКІН Денис

Хмельницький національний університет
<https://orcid.org/0000-0003-3447-811X>
makaryshkinde@khmnu.edu.ua

СОКОЛАН Юлія

Хмельницький національний університет
<https://orcid.org/0000-0002-0273-5719>
sokolan.julia@gmail.com

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ВАНТАЖНОЇ ЛІФТОВОЇ УСТАНОВКИ

Ліфтова установка розглядається в якості єдиної електромеханічної системи, яка, в свою чергу, поділяється на механічну (кабіна, противага, кінематичні зв'язки та редуктор) та електричну (електродвигун і статичний перетворювач) підсистеми. Режим роботи електроприводу ліфтової установки залежить від призначення підйомника і умов використання. Так, для вантажних ліфтових установок характерний більш рівномірний графік навантаження із певною циклічністю через транспортування вантажів. У нерегульованому електроприводі ЛУ зі швидкістю руху до 2 м/с електричною підсистемою є одно- або двошвидкісний асинхронний електродвигун із короткозамкненим ротором. В даний час все більше переходять на використання в будівлях частотно-регульованого асинхронний електродвигун, так як таке рішення дозволяє поліпшити зручність пересування та точність зупинки кабіни, а також має певний енергозберігаючий ефект.

В роботі виконано дослідження характеристик асинхронного електродвигуна для автоматизованого електроприводу вантажної ліфтової установки. Представлено класифікацію електроприводів ліфтових установок з поясненням переваг та недоліків. Природні механічні та електромеханічні характеристики були побудовані за допомогою спеціалізованої програми, що працює в програмному комплексі MATLAB. Оскільки фірми-виробники асинхронних електродвигунів найчастіше не вказують реального опору асинхронних електродвигунів із короткозамкненим ротором, опір даного електродвигуна був розрахований в програмному комплексі MATLAB. Перехідні процеси електроприводу ліфтової установки також було побудовано за допомогою програми перехідних процесів в системі частотний перетворювач – асинхронний електродвигун із задавачем інтенсивності на базі T-подібної схеми заміщення в програмному середовищі MATLAB.

Ключові слова: електропривод, асинхронний двигун, частотний перетворювач, ліфтова установка, MATLAB.

MOVCHAN Yuriy, MAIDAN Pavlo,
MAKARYSHKIN Denys, SOKOLAN Iuliia
Khmelnyskyi National University

MODELING THE OPERATION OF THE ELECTRIC DRIVE OF A FREIGHT ELEVATOR INSTALLATION

An elevator installation is considered as a single electromechanical system, which, in turn, is divided into mechanical (cabin, counterweight, kinematic links, and gearbox) and electrical (electric motor and static converter) subsystems. The operating mode of the elevator's electric drive depends on the purpose of the elevator and the conditions of use. For example, freight elevators are characterized by a more uniform load schedule with a certain cyclicity due to the transportation of goods. In an unregulated electric drive with a speed of up to 2 m/s, the electrical subsystem is a single- or two-speed asynchronous electric motor with a squirrel-cage rotor. Currently, there is a growing trend towards the use of frequency-controlled asynchronous electric motors in buildings, as this solution improves the convenience of movement and the accuracy of the car's stopping, and also has a certain energy-saving effect.

The paper presents a study of the characteristics of an asynchronous electric motor for an automated electric drive of a freight elevator. A classification of electric drives for elevator installations is presented, with an explanation of their advantages and disadvantages. The natural mechanical and electromechanical characteristics were constructed using a specialized program running in the MATLAB software complex. Since manufacturers of asynchronous electric motors often do not indicate the actual resistance of asynchronous electric motors with a squirrel-cage rotor, the resistance of this electric motor was calculated in the MATLAB software package. The transient processes of the electric drive of the elevator installation were also constructed using the transient processes program in the frequency converter-asynchronous electric motor system with an intensity controller based on a T-shaped equivalent circuit in the MATLAB software environment.

Keywords: electric drive, asynchronous motor, frequency converter, elevator installation, MATLAB.

Стаття надійшла до редакції / Received 10.11.2025
Прийнята до друку / Accepted 29.12.2025
Опубліковано / Published 05.03.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Мовчан Юрій, Майдан Павло, Макаришкін Денис, Соколан Юлія

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОКІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Загально відомо, що ліфтова установка (ЛУ) розглядається в якості єдиної електромеханічної системи, яка, в свою чергу, поділяється на механічну (кабіна, противага, кінематичні зв'язки та редуктор) та електричну (електродвигун (ЕД) і статичний перетворювач) підсистеми. Кабіни ЛУ є у виробництві - різних габаритних розмірів залежно від вантажопідйомності, розмірів вантажів, що перевозяться, оснащені однією або двома дверима (так звані наскрізні кабіни). Вантажні ЛУ, як відомо, виготовляються не лише різної вантажопідйомності, а і розраховані на дві чи більше зупинок і можуть бути виконані для роботи з провідником або без нього.

Переміщення кабіни ЛУ виконується спеціальним підйомним канатом, що забезпечує передачу зусиль від приводного ЕД кабіни [1, 2].

У нерегульованому електроприводі ЛУ зі швидкістю руху до 2 м/с електричною підсистемою є одно- або двошвидкісний асинхронний електродвигун (АЕД) із короткозамкненим ротором. В даний час все більше переходять на використання в будівлях частотно-регульованого АЕД, так як таке рішення дозволяє поліпшити зручність пересування та точність зупинки кабіни, а також має певний енергозберігаючий ефект [3, 4].

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Як відомо, ліфт – підйомний механізм, призначений для транспортування людей або вантажу по вертикальному напрямку, тому буде розглянуто лише конструкцію вантажного ліфту 12-поверхового житлового будинку. Відомо, що все обладнання ЛУ знаходиться в шахті і машинному відділенні, яке може розташовуватися в залежності від особливостей виконуваної роботи. Підйом кабіни ЛУ здійснюється за допомогою ЕД, який з'єднаний безпосередньо з підйомним механізмом або через редуктор [1, 2].

Найчастіше використовують до встановлення кінематичні схеми з верхнім розташуванням приводного механізму, так як дане розташування приводу підвищує ККД ЛУ за рахунок зниження числа перегинів каната підйомного механізму.

При наявності встановленої противаги система буде врівноважена, оскільки сила тяжіння противаги буде рівною силі тяжіння кабіни ЛУ із вантажем, отже, ЕД необхідно буде лише збільшувати крутний момент, який буде компенсувати силу тертя в механічній передачі. В іншому випадку ЕД необхідно буде розвивати додатковий електромагнітний момент через силу тяжіння кабіни ЛУ, що призводить до збільшення потужності, габаритів, вартості встановленого ЕД [1, 2].

Через нерівномірність навантаження системи ЛУ використання противаги хоч і не повністю, але знижує величину навантаження на встановлений ЕД. Також знижуються масо-габаритні характеристики і величини моментів, які прикладаються до електромагнітного гальма при вимкненому ЕД.

Режим роботи електроприводу ЛУ залежить від призначення підйомника і умов використання. Так, для вантажних ЛУ характерний більш рівномірний графік навантаження із певною циклічністю через транспортування вантажів [1, 2].

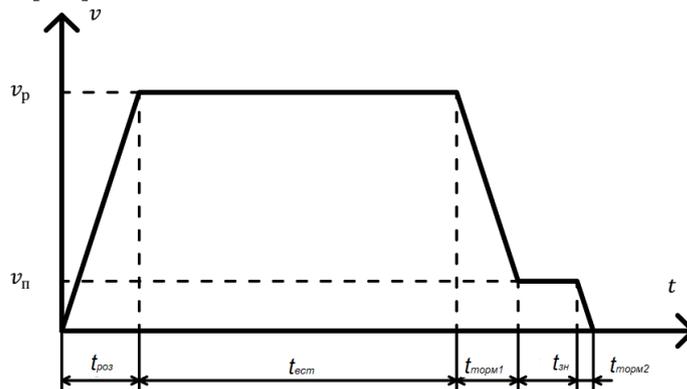


Рис. 1. Циклограма роботи вантажної ліфтової установки

Можна класифікувати наступні часові етапи руху вантажної ЛУ (рис. 1) [1, 2]:

- розгін до встановленого рівня швидкості ($t_{роз}$);
- рух з встановленим рівнем швидкості ($t_{вст}$);
- перехід на знижений рівень швидкості ($t_{торм1}$);
- рух на зниженому рівні швидкості ($t_{зн}$);
- гальмування з необхідною точністю ($t_{торм2}$).

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою роботи є: дослідження характеристик асинхронного електродвигуна для автоматизованого електроприводу вантажної ліфтової установки.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Загально відомо, основні технічні характеристики системи керування (СК) ЛУ:

- вантажопідйомність - максимальна маса вантажу, яку здатна підняти ЛУ;
 - швидкість руху кабіни - визначається зі стандартного ряду величин. Знижений рівень швидкості призначено для точної зупинки кабіни ЛУ. Також для ревізії обладнання шахти ЛУ передбачено ревізійний рівень швидкості до 0,36 м/с [1, 2];
 - висота підйому кабіни - залежить від архітектурних рішень конструкції будівлі.
- Електропривід ЛУ повинен відповідати наступним вимогам [3, 4]:
- забезпечення плавності вертикального руху кабіни ЛУ без будь-яких ривків;
 - можливість роботи на реверс;
 - можливість розгону і гальмування (для ЛУ характерна велика кількість пусків і зупинок);
 - вказана точність зупинки;
 - забезпечення мінімального часу перехідних процесів з урахуванням обмеження по допустимому рівню прискорення;
 - наявність зворотного зв'язку (забезпечує контроль положення і рівня швидкості, а також досягається зручність пересування і необхідна точність зупинки).

Точність зупинки кабіни ЛУ повністю залежить від рівня швидкості руху кабіни, гальмівного моменту і інерції кабіни із розташованим вантажем, тому при великих рівнях швидкостей потрібно знижувати рівень швидкості перед повною зупинкою для забезпечення більш точної зупинки кабіни ЛУ в встановленому діапазоні меж. Діапазон регулювання рівнів швидкості електроприводу зазвичай більше десятка значень. Лише використання замкнених СК електроприводом дозволяє здійснити вказану продуктивність [1, 2].

Класифікація варіантів електроприводів, що використовуються для ЛУ представлена на рисунку 2.

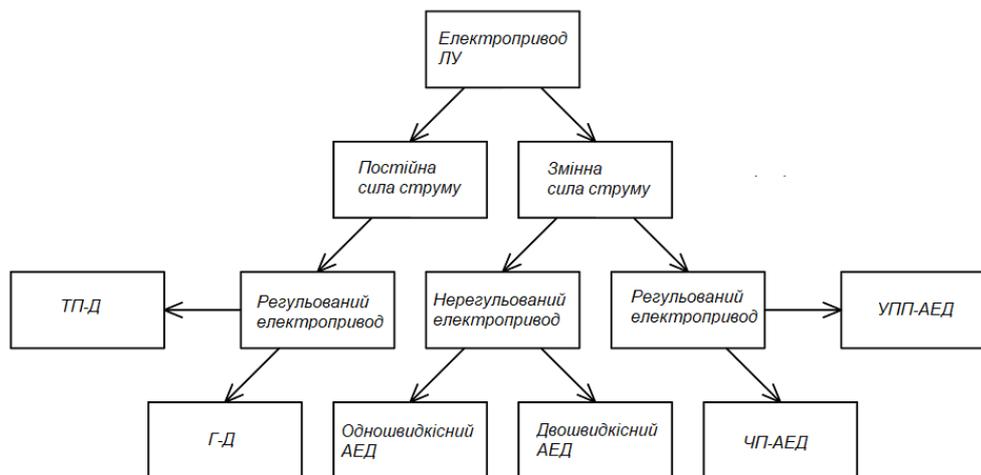


Рис. 2. Загальний вигляд класифікації електроприводів ліфтових установок

Нерегульований електропривід ЛУ змінної сили струму (рис. 2) - найпростіша система електроприводу ЛУ має в складі АЕД із короткозамкненим ротором, який виконується з відносно великим значенням пускового моменту при невеликому значенні пускової сили струму і має підвищене ковзання. Пуск даного АЕД здійснюється безпосередньо подачею номінального рівня напруги на обмотку статора, а гальмування відбувається зняттям рівня напруги з обмотки статора і накладенням механічного гальма, що в свою чергу призводить до зносу колодок гальма. Також до недоліків даної системи електроприводу можна додати недостатньо високу точність зупинки, оскільки при різному завантаженні кабіни це призводить до різних величин гальмівного шляху. Тому дану систему використовують, зазвичай, в тихохідних ліфтах (швидкість руху до 0,5 м/с) при невеликій інтенсивності роботи і достатньо низькій висоті підйому [1, 2].

Найбільш поширена система електроприводу для ЛУ із двошвидкісним АЕД (рис. 2), який оснащено на статорі двома обмотками з різними значеннями пар полюсів, що дозволяє при подачі номінального рівня напруги на відповідну обмотку забезпечити необхідний рівень швидкості руху ЛУ (робочий або знижений) [3, 4].

Регульований електропривід ЛУ постійної сили струму (рис. 2) - в електроприводі постійної сили струму використовують, зазвичай, дві системи, а саме тиристорний перетворювач - електродвигун (ТП-ЕД) чи генератор - електродвигун (Г-ЕД), причому перша система електроприводу більш поширена, ніж друга. Це

обумовлено малою інерційністю ТП в порівнянні з Г постійної сили струму, більш високим значенням ККД системи ТП-ЕД, ніж у системи Г-ЕД, меншим шумом і вібрацією за рахунок відсутності додаткового обертового перетворювача [3, 4].

Однак система електроприводу ТП-ЕД володіє цілим рядом недоліків: за рахунок наявності напівпровідникових ключів знижується коефіцієнт потужності системи електроприводу, виникають вищі гармонічні складові, отже, використання даної системи електроприводу при слабкій мережі живлення неактуально [1, 2].

Також через односторонню провідність напівпровідникових ключів для використання реверсу ЕД необхідно ускладнювати схему керування електроприводом. У такому випадку використовують реверсивний перетворювач, що оснащено двома комплектами напівпровідникових мостів.

ТП забезпечує плавну зміну рівня напруги на якорі ЕД постійної сили струму, отже, плавну зміну рівня швидкості. Електропривод постійної сили струму володіє хорошими регульовальними характеристиками і може забезпечити оптимальну діаграму руху з високою точністю зупинки кабіни ЛУ [1, 2].

Регульований електропривід ЛУ змінної сили струму (рис. 2) - широке використання отримали регульовані асинхронні електроприводи ЛУ (із рівнями швидкості руху в діапазоні від 1 до 2 м/с), оскільки дані системи дозволяють підтримувати величину прискорення в перехідних процесах на рівні, близькому до допустимого, і практично виключити розкид діаграм руху при зміні завантаження кабіни. Таким чином, зменшуючи час переміщення кабіни і підвищуючи продуктивність ЛУ [1, 2].

Перевагою ЧП є відсутність стрибків сили струму в перехідних режимах, що дає збільшення терміну служби ЕД і апаратури комутації за рахунок зниження динамічного навантаження на механічні частини електроприводу ЛУ [3, 4].

Регулювання координат здійснюється за допомогою зміни величин частоти і рівня напруги за наступним законом $U/f = const$ таким чином механічна характеристика ЕД при збереженні величини критичного моменту переміщається вздовж осі ординат. Для отримання необхідної величини частоти використовується широтно-імпульсна модуляція (ШІМ), де імпульси рівнів напруги мають однакову амплітуду, а ширина змінюється з метою зміни середнього значення рівня напруги, отже, для отримання близького до синусоїдального значення рівня напруги необхідно спочатку створювати короткі, потім широкі і потім знову короткі імпульси. Оскільки частота ШІМ достатньо висока (приблизно 6 кГц), то АЕД внаслідок своєї інерційності не буде реагувати на швидко зміну рівня напруги [5, 6].

Дану СК виконують замкнутою з метою отримання високих динамічних властивостей, близьких до характеристик регульованого електроприводу постійної сили струму (рис. 2) [5, 6].

Для електроприводу вантажної ЛУ в 12-поверховому житловому будинку задано умовно «середній» цикл роботи для розрахунку і вибору оптимального ЕД. Ним виявився АЕД із короткозамкненим ротором, для заданого типу механізму розрахований і обраний АЕД з короткозамкненим ротором серії АМТК з повторно-короткочасним режимом роботи ($S_3=100\%$). Даний вид АЕД спеціально призначений для роботи з частотним перетворювачем.

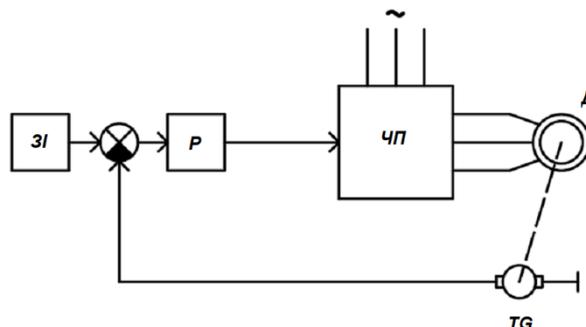


Рис. 3. Загальний вигляд замкнутої система керування асинхронним електроприводом ЛУ:
 ЗІ – задавач інтенсивності; Р – П-регулятор; ЧП – частотний перетворювач; Д – АЕД; ТГ – давач рівня швидкості (тахогенератор)

Метою проведення розрахунку характеристик електроприводу ЛУ є забезпечення технологічних завдань, закладених у вимоги до вибраного електроприводу: технологічні швидкості робочого та зворотного ходу в усталеному режимі повинні бути забезпечені із вказаним ступенем точності [5, 6].

За допомогою природної характеристики оцінюють можливості АЕД при його роботі в механічній системі [1, 2]:

- витримувати граничні значення сили струму (чи моменту), які АЕД може розвивати короткочасно;
- забезпечувати переведення АЕД в генераторний режим та ін.

Природні механічні та електромеханічні характеристики були побудовані за допомогою спеціалізованої програми, що працює в програмному комплексі MATLAB (рис. 4). Оскільки фірми-виробники

АЕД найчастіше не вказують реального опору АЕД з короткозамкненим ротором, опір даного АЕД був розрахований в програмному комплексі MATLAB [7, 8].

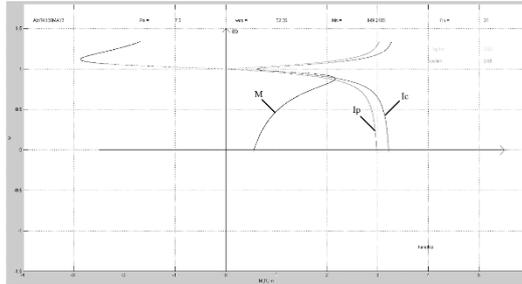


Рис. 4. Графічні залежності природних механічної та електромеханічної характеристик АЕД

Розрахунок перехідних процесів потрібно виконати для наступних характеристик [9, 10]:

- оцінки механічних і електричних перевантажень;
- визначення характеру і часу протікання;
- правильного вибору потужності АЕД, ЧП і апаратури СК;
- оцінки відповідності потужностей вимогам технологічного процесу робочого органу.

Для формування необхідного закону зміни рівня напруги керування на вході СК підключається спеціальний задавач інтенсивності (ЗІ), який здатний змінювати стрибок рівня напруги керування за лінійним законом. При досягненні необхідного рівня напруги керування вихід ЗІ припиняє наростання рівня напруги керування, таким чином на ЧП подається необхідний закон зміни рівня напруги, де в свою чергу значення рівня напруги керування визначає встановлену швидкість руху АЕД.

Стала часу ЗІ (рис. 3) не залежить від навантаження, оскільки при спуску порожньої кабіни ЛУ механічна стала часу і динамічний момент будуть змінюватись пропорційно моменту інерції самого електроприводу [9, 10].

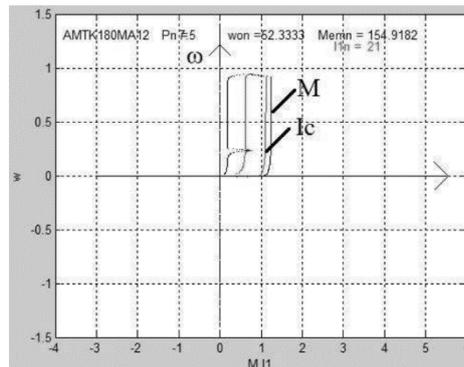


Рис. 5. Графічна залежність динамічних механічної та електромеханічної характеристик при русі кабіни ЛУ вгору

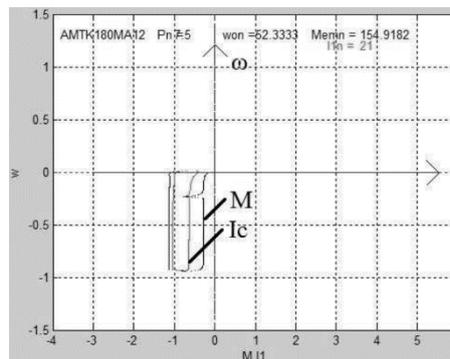


Рис. 6. Графічна залежність динамічних механічної та електромеханічної характеристик при русі кабіни ЛУ вниз

Перехідні процеси електроприводу ЛУ побудуємо за допомогою програми перехідних процесів в системі ЧП-АЕД із ЗІ на базі Т-подібної схеми заміщення в програмному середовищі MATLAB (рис. 5 та 6) [7, 8].

Відповідно, за графічними залежностями обох перехідних процесів видно (рис. 5 та 6), що перевантаження за моментом приблизно в $1,25M_{ном}$, що менше критичного моменту, за силою струму приблизно $1,1I_{ном}$.

В ході побудови графічних залежностей перехідних процесів з'ясувалося, що під час розгону АЕД не вистачає пускового моменту, тому використовувалося форсування рівня напруги при пуску АЕД, рівне 5%.

Також інтегральні показники були розбиті на ділянки при русі кабіни ЛУ вгору та вниз [9, 10]:

- розгін до робочого рівня швидкості і рух на робочому рівні швидкості (7,75 с);
- перехід на знижений рівень швидкості і рух на зниженому рівні швидкості (1,6 с);
- гальмування до повної зупинки (0,2 с).

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

За допомогою спеціалізованих програм в програмному середовищі MATLAB були обчислені обмоткові дані обраного АЕД з короткозамкненим ротором, побудовані природні та штучні механічні та електромеханічні характеристики, побудовані перехідні процеси в системі ЧП-АЕД із ЗІ на базі Т-подібної схеми заміщення.

У побудові статичних характеристик через задані точки використовувався метод регулювання $U/f = const$. Отримані характеристики проходять через необхідні координати.

Були побудовані перехідні процеси електроприводу ЛУ за необхідними навантажувальними діаграмами рівнів швидкості і моменту і розраховані інтегральні показники заданого циклу роботи. Виконана необхідна перевірка на перевантажувальну здатність, продуктивність, нагрів АЕД і ЧП.

References

1. Lifty : navch. posibnyk / O. V. Hryhorov [ta in.] ; Nats. tekhn. un-t "Kharkiv. politekhn. in-t". – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – 172 s.
2. Pravyla budovy i bezpechnoi ekspluatatsii liftiv : NPAOP 0.00-1.02-08; Zatv. 01.09.2008 №190 / Derzhavnyi komitet Ukrainy z promyslovoi bezpeky, okhorony pratsi ta hirnychoho nahliadu – Kh. : Vyd-vo «Industriia», «Osнова», 2008. – 192 s.
3. Elektrichni mashyny. Kurs lektsii [Elektronnyi resurs] : navchalnyi posibnyk dlia zdobuvachiv stupenia bakalavra za osvitoiu prohramoiu «Elektromekhanichni systemy avtomatyzatsii, elektropyvod ta elektromobilnist» spetsialnosti 141 Elektroenerhetyka elektrotekhnika ta elektromekhanika / Yu. A. Haidenko ; KPI im. Ihoria Sikorskoho. – Elektronni tekstovi dani (1 fail: 12,47 Mbait). – Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2024. – 211 s. – Nazva z ekrana.
4. Elektrichni mashyny i aparaty: navchalnyi posibnyk / Yu.M. Kutsenko, V.F. Yakovliev ta in. – K.: Ahrarna osvita, 2013. – 449 s. ISBN 978-966-2007-38-1.
5. Shavolkin O. O. Sylovi napivprovodnykovi peretvoriuvachi enerhii [Elektronnyi resurs] : navchalnyi posibnyk / O. O. Shavolkin ; Kharkiv. nats. un-t. misk. hosp-va im. O. M. Beketova. – Kharkiv : KhNUMH im. O. M. Beketova, 2015. – 403 s. – rezhym dostupu: <http://elib.chdtu.edu.ua/e-books/4154>
6. Senko, V. I. Inventory i peretvoriuvachi chastoty [Elektronnyi resurs] : monohrafiia / Senko V. I., Trubitsyn K. V., Chybelis V. I. ; Vydavnytstvo Lira-K. – Elektronni tekstovi dani (1 fail: 4,27 Mbait). – Kyiv : Vydavnytstvo Lira-K, 2020. – 300 s. – Nazva z ekrana.
7. MATLAB v kursy vyshchoi matematyky: navchalnyi posibnyk / N. M. Hoblyk, A. V. Kunynets, Ya. M. Pelekh; Ministerstvo osvity i nauky Ukrainy, Natsionalnyi universytet "Lvivska politekhnika". — Lviv: SPOLOM, 2024. — 243 storinky: iliustratsii, tablytsi, hrafiiky; 24,5 sm. — ISBN 978-617-8450-26-7.
8. Optymizatsiia tekhnolohichnykh protsesiv v seredovyshchi MATLAB [Elektronnyi resurs] : navch. posib. dlia zdobuvachiv stupenia bakalavr za osvitoiu prohramoiu «Avtomatyzatsiia, kompiuterno-intehrovani tekhnolohii» spetsialnosti 174 (151) «Avtomatyzatsiia, kompiuterno-intehrovani tekhnolohii ta robototekhnika» / A. I. Zhuchenko, L. R. Ladiieva, R. M. Dubik, Ye. O. Tiurina ; KPI im. Ihoria Sikorskoho. – Elektronni tekstovi dani (1 fail: 4,08 Mbait). – Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho. – 2024. – 161 s. – Nazva z ekrana.
9. Bun, V. P. Teoriia avtomatichnoho keruvannia [Elektronnyi resurs] : pidruch. dlia zdobuvachiv stupenia bakalavra za spets. «Avtomatyzatsiia, kompiuterno-intehrovani tekhnolohii ta robototekhnika». U 2-kh ch. Ch. 1 / V. P. Bun, T. H. Bahan ; KPI im. Ihoria Sikorskoho. – Elektronni tekstovi dani (1 fail: 2,23 Mbait). – Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho, Vyd-vo «Politekhnika», 2025. – 160 s. – Nazva z ekrana.
10. Teoriia avtomatichnoho upravlinnia. Navchalnyi posibnyk [Elektronnyi resurs] : navch. posib. dlia stud. spetsialnosti 151 «Avtomatyzatsiia ta kompiuterno-intehrovani tekhnolohii», osvitno-profesiina prohrama «Avtomatyzatsiia ta kompiuterno-intehrovani tekhnolohii kiber-enerhetychnykh system» ; KPI im. Ihoria Sikorskoho ; ukklad.: O. Y. Shtifzon, P. V. Novikov, V. P. Bun. – Elektronni tekstovi dani (1 fail: 2,25 Mbait). – Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2020. – 144 s. – Nazva z ekrana.