

УДК 621.3

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2026.1\(503\).1.27](https://doi.org/10.15589/znп2026.1(503).1.27)

EVALUATION OF POWER LOSSES IN THE ELECTROMAGNETIC DRIVE OF A SPIRAL VIBRATORY ELEVATOR

ОЦІНКА ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРОМАГНІТНОМУ ПРИВОДІ ГВИНТОВОГО ВІБРАЦІЙНОГО ПІДЙОМНИКА

Yurii I. Onufriiev

yurii.onufriiev@nuos.edu.ua

ORCID: 0009-0006-2608-972X

Ю. І. Онупрієв,

аспірант

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv**Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

Abstract. Spiral vibratory elevators are an essential component of modern technological complexes widely used for the vertical transportation of bulk materials. The growing demands for resource conservation necessitate the improvement of their drive mechanisms. Since the operational efficiency of such conveyors depends on the characteristics of vibration exciters, investigating the energy performance of electromagnetic drives is a relevant scientific and technical problem. Solving this issue requires a comprehensive analysis of transient processes with modern simulation modeling tools.

Purpose. The aim of the work is to evaluate the impact of technological load and the total number of electromagnets on power losses in the electromagnetic drive of a spiral vibratory elevator, as well as to determine its energy efficiency indicators. A methodology of mathematical and numerical simulation based on the field-circuit analysis method was applied. A comprehensive simulation model of a controlled electromagnetic drive was developed using a software environment. The developed model comprehensively integrates the dynamic mechanical processes of the elevator and the electromagnetic processes, taking into account the specifics of the pulsed supply voltage of the windings.

Results. The results of the conducted simulation demonstrated that winding losses significantly increase with a higher mechanical load and consistently decrease as the number of electromagnets in the system increases. Conversely, magnetic steel losses are directly proportional to the number of magnets and remain entirely unaffected by fluctuations in the elevator load. It was revealed that using structural steel instead of electrical steel deteriorates the energy efficiency of the device by half. It was established that the specific steel losses of such a magnetic circuit increase by more than 17 times due to its higher electrical conductivity and greater material sheet thickness compared to laminated cores.

Scientific novelty. This study is the first to comprehensively investigate the components of power losses when standard vibratory electromagnets are directly used in the drive system of a spiral elevator. It was proven that under the pulsed power supply of vibrators made of structural steel, eddy current losses rise sharply and become completely comparable to the copper losses in the windings.

Practical importance. Based on the analysis results, the key factors causing the deterioration of the energy efficiency of mass-produced vibratory machines with pulse control were identified. The obtained findings provide a reliable foundation for seeking rational design solutions regarding the modernization of such electromagnets to ensure their high efficiency.

Key words: vibratory machine; controlled electromagnetic drive; magnetic field; simulation model; power losses; energy efficiency.

Анотація. Гвинтові вібраційні підйомники є важливою складовою сучасних технологічних комплексів, які широко застосовуються для вертикального переміщення сипких середовищ. Зростання вимог до ресурсозбереження зумовлює необхідність удосконалення їхніх приводних механізмів. Оскільки ефективність роботи таких конвеєрів залежить від характеристик віброзбудників, дослідження енергетичних показників електромагнітних приводів є актуальною науково-технічною задачею. Її розв'язання вимагає комплексного аналізу перехідних процесів із залученням сучасного інструментарію імітаційного моделювання.

Мета. Метою роботи є оцінка впливу технологічного навантаження та загальної кількості електромагнітів на втрати потужності в електромагнітному приводі гвинтового вібраційного підйомника, а також визначення показників його енергетичної ефективності.

Методика. Застосована методика математичного та числового моделювання з використанням коло-польового методу аналізу. За допомогою програмного середовища створено загальну імітаційну модель керованого елек-

тромагнітного привода. Розроблена модель комплексно поєднує динамічні механічні процеси підйомника та електромагнітні процеси з урахуванням специфіки імпульсної напруги живлення обмоток.

Результати проведеного моделювання показали, що втрати в обмотці істотно зростають зі збільшенням механічного навантаження і закономірно знижуються при збільшенні кількості електромагнітів у системі. Натомість втрати в магнітній сталі є прямо пропорційними кількості магнітів і зовсім не змінюються при коливаннях навантаження підйомника. Виявлено, що використання конструкційної сталі замість електротехнічної погіршує енергетичну ефективність пристрою вдвічі. Встановлено, що питомі втрати в сталі такого магнітопровода зростають у більш ніж 17 разів через її вищу електричну провідність та більшу товщину листів матеріалу порівняно з шихтованими осердями.

Наукова новизна. У роботі вперше детально досліджено складові втрат потужності при застосуванні стандартних вібраційних електромагнітів безпосередньо у приводі гвинтового підйомника. Доведено, що при імпульсному живленні вібраторів, виготовлених з конструкційної сталі, втрати на вихрові струми стрімко зростають і стають повністю співвимірними з втратами в міді обмоток.

Практична значимість. За результатами аналізу визначено ключові фактори погіршення енергоефективності серійних вібраційних машин з імпульсним керуванням. Отримані результати формують надійне підґрунтя для пошуку раціональних конструктивних рішень щодо модернізації таких електромагнітів з метою забезпечення їхньої високої ефективності.

Ключові слова: вібраційна машина; керований електромагнітний привод; магнітне поле; імітаційна модель; втрати потужності; енергетична ефективність.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

В сучасній промисловості багато забезпечуються вібраційними машинами. Вібраційні машини використовуються в сучасній промисловості для забезпечення багатьох технологічних процесів, таких як вібраційне транспортування [1], ущільнення сумішей [2], абразивна обробка деталей [3]. Одна зі сфер застосування вібраційного транспортування – лінії переробки зерна та іншої сільськогосподарської продукції [4] з вібраційними конвеєрами та живильниками. В них часто використовується електромагнітний привод, який дає можливість плавно регулювати амплітуду вібрації на заданій частоті, забезпечуючи необхідну швидкість транспортування [5]. Вертикальне транспортування зерна, пластівців та інших сипких продуктів здійснюється гвинтовими вібраційними підйомниками [6]. Тому, моделювання процесів у таких пристроях, зокрема з електромагнітним приводом, і дослідження їх характеристик з метою удосконалення є актуальною науковою задачею.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

В роботах [5, 9] розглядається гвинтовий вібраційний бункерний живильник з електромагнітним приводом, який має аналогічну конструкцію та принцип дії, що й вібраційний гвинтовий підйомник, але є значно меншим за потужністю та розмірами. Наводяться рівняння механіки та електромеханічних процесів у електромагнітному приводі.

В роботі [10] запропоновано модель двомасового гвинтового вібраційного підйомника з керованим електромагнітним приводом, яка описує у взаємозв'язку процеси перетворення сигналів у системі автоматичного керування параметрами вібрації, електромагнітні та електромеханічні процеси у вібраторі при імпульсному живленні його обмотки і процес

формування гвинтової траєкторії руху мас підйомника під дією періодичної імпульсної електромагнітної сили в білярезонансному режимі. Модель реалізовано в середовищі Simulink.

У [11] наведено результати дослідження енергетичних характеристик електромагнітного вібраційного привода при ШІМ-модульованому синусоїдальному живленні обмоток електромагніта. ККД привода визначався з урахуванням ККД перетворювача частоти і ККД електромагнітного вібратора. При розрахунку останнього враховувались втрати потужності в обмотці і в сталі магнітопровода, як сума втрат на гістерезис та вихрові струми. Для моделювання електромагнітних та електромеханічних процесів використовувався коло-польовий метод.

В роботах [12; 13] запропоновано використовувати імпульсну форму напруги живлення вібраційних електромагнітів для підвищення енергетичної ефективності, що було підтверджено числовим моделюванням в роботі [13], а також результатами експериментальних досліджень в роботі [14]. В розрахунках, наведених у [13; 14], використовувалась модель на основі [15] з урахуванням імпульсної форми напруги на виході інвертора.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

В моделі [5, 9] не враховуються особливості впливу електромагнітних процесів, які мають місце при спеціальних формах напруги живлення, зокрема, при імпульсному живленні вібратора. Не враховується також вплив динаміки системи автоматичного керування параметрами вібрації.

В роботі [10] враховано особливості процесів при імпульсному живленні, а також вплив динаміки системи керування на роботу вібраційного підйомника. Але не досліджено в достатній мірі його енергетичні

характеристики в залежності від навантаження та параметрів привода. Зокрема, не досліджено втрати потужності при застосуванні стандартних вібраційних електромагнітів, вплив їх параметрів та кількості на енергетичну ефективність пристрою.

Метою дослідження є оцінка впливу навантаження та кількості електромагнітів на втрати потужності в електромагнітному приводі гвинтового вібраційного підйомника та його енергетичну ефективність.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ

ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єкт дослідження – електромагнітні, електро-механічні та механічні процеси у гвинтовому вібраційному підйомнику з електромагнітним приводом.

Предмет дослідження – втрати потужності та енергетичні характеристики електромагнітного привода гвинтового вібраційного підйомника з електромагнітним приводом при імпульсній напрузі живлення.

Методи дослідження – аналіз, математичне та числове моделювання із застосуванням коло-польового методу.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Візьмемо за основу імітаційну модель механіки вібраційного підйомника, запропоновану в [10], та імітаційну модель процесів у електромагніті з системою керування, представлену в [13; 14]. В останній робимо заміну моделі електромагніта, що використовувався в [14] для вібраційного конвеєра, моделлю електромагніта ЕМ68-08(ЕМК2) [16], що використовуватиметься для гвинтового вібраційного підйомника. Модель електромагніта створювалась за допомогою коло-польового методу за методикою, подібною до [17], з урахуванням особливостей електромагніта. Поєднавши 3 підсистеми в Simulink, як це зроблено в [10], отримуємо загальну імітаційну модель керованого електромагнітного привода вібраційного пристрою.

Як вхідний сигнал подаємо приписане значення амплітуди вібрації 2,5 мм, а частоту обираємо в межах 23..24 Гц такою, що відповідає максимуму ККД привода і в той самий час задовольняє умовам транспортування зерна. Підбором коефіцієнтів в'язкого тертя b_{z_1} , b_{z_2} , b_{α} , b_{α_2} [10] задаємо необхідну вихідну (механічну) потужність привода, для якої визначаємо його ККД і складові втрат.

Втрати потужності та ККД розраховуємо за рівняннями, що використовувались у [11; 13]. При цьому, враховуючи, що струм однополярний, і магнітне поле не змінює напрямку, втратами на гістерезис нехтуємо. Механічна потужність на виході привода:

$$P_{out} = \frac{1}{T_I} \int_t^{t+T_I} F(t)v(t)dt,$$

де F і v – миттєві значення сумарної електромагнітної сили вібраторів і швидкості відносного переміщення якоря і осердя (однакові для всіх електромагнітів); T_I – період коливаний, що дорівнює періоду струму.

Активна потужність, що споживається вібратором:

$$P_{el} = \frac{1}{T_I} \int_t^{t+T_I} u(t)i(t)dt,$$

де u та i – миттєві значення напруги на обмотці вібратора і струму в обмотці. Втрати в обмотці (в міді):

$$P_c = \frac{1}{T_I} \int_t^{t+T_I} (i(t))^2 R dt,$$

де R – активний опір обмотки. Втрати в сталі на вихрові струми:

$$P_{st} = \frac{1}{T_I} \int_t^{t+T_I} (\dot{i}_{e.c}(t))^2 R_{e.c}^* dt,$$

де $\dot{i}_{e.c}^*$ і $R_{e.c}^*$ – приведені до обмотки вібратора створена вихровими струмами магніторухливі сила і еквівалентний опір контурів замикання вихрових струмів відповідно. Втрати в перетворювачі частоти:

$$P_{conv} = P_{rect} + P_r + P_{inv},$$

де P_{rect} , P_r і P_{inv} – втрати у випрямлячі, дроселі та інверторі відповідно:

$$P_{rect} = 2U_{diod}I_{rect};$$

$$P_r = 1,5R_rI_{rect}^2;$$

$$P_{inv} = 2I_{inv} \cdot \left(\frac{U_d \omega}{I_s U_s \cdot 2\pi} (E_a + E_{off} + E_{rec}) + \frac{1}{2} (U_E + U_F) \right);$$

I_{rect} і I_{inv} – середні значення струмів на виходах випрямляча і інвертора; U_{diod} – пряме падіння напруги на діоді випрямляча; U_d – середня випрямлена напруга; ω – частота струму на виході інвертора; E_{on} , E_{off} та E_{rec} – втрати енергії відповідно при відкритті та закритті транзистора і відновленні зустрічного діода при стандартних значеннях струму та напруги I_{st} та U_{st} , наведених у довіднику; U_{CE} – пряме падіння напруги на відкритому транзисторі; U_{IF} – пряме падіння напруги на зустрічному діоді інвертора. ККД вібратора визначається як ККД двигуна електропривода:

$$\eta_{mot} = \frac{P_{out}}{P_{el}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_c + P_{st}}.$$

ККД перетворювача частоти:

$$\eta_{conv} = \frac{P_{el}}{P_{el} + P_{rect} + P_{dr} + P_{inv}}.$$

ККД привода:

$$\eta = \eta_{mot} \eta_{conv}.$$

Моделювання повторюємо при варіюванні величиною вихідної потужності P_{out} для різної кількості електромагнітів n .

На рис. 1–5 наведено графіки отриманих результатів моделювання: діюче значення струму обмотки вібратора (рис. 1), втрати в міді (рис. 2), втрати в сталі (рис. 3), втрати у перетворювачі (рис. 4) і ККД привода (рис. 5).

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Для кожної отриманої характеристики, що відповідає певному числу електромагнітів, робоча область визначається діапазоном зміни діючого значення струму одного електромагніта I_{1RMS} до номінального значення I_n (рис. 1). При цьому для будь-яких n ККД в межах робочої області монотонно зростає, не досягаючи максимуму

(рис. 5). Це означає, що в даному випадку раціональний вибір кількості електромагнітів для певної вихідної потужності визначається умовою забезпечення максимуму значення I_{1RMS} при обмеженні величиною I_n .

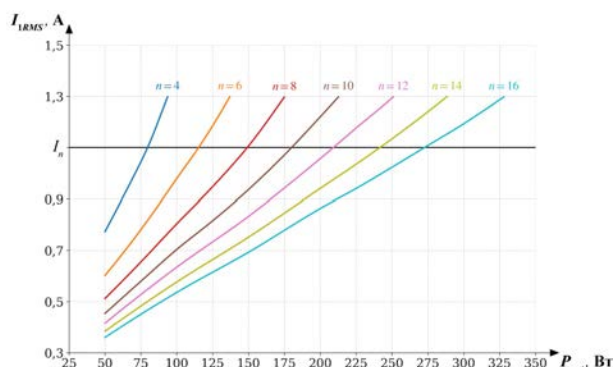


Рис. 1. Графіки залежності струму від вихідної потужності

Втрати в міді (рис. 2) істотно залежать від вихідної потужності (навантаження) і знижуються при збільшенні кількості електромагнітів. Оскільки струм I_{1RMS} при збільшенні навантаження зростає майже лінійно (рис. 1), залежність втрат в міді від вихідної потужності є близькою до квадратичної.

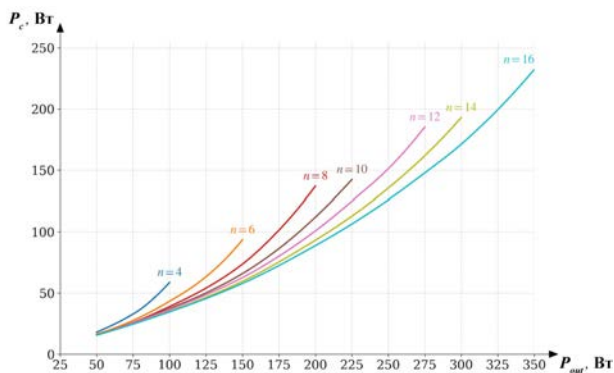


Рис. 2. Графіки залежності втрат у міді від вихідної потужності

Втрати в сталі (рис. 3) не залежать від навантаження і прямо пропорційні кількості електромагнітів. Це пояснюється тим, що на кожен електромагніт подаються однакові імпульси напруги, ширина яких залежить від навантаження, а амплітуда залишається постійною. А саме від амплітуди імпульсів напруги залежить максимальна швидкість зміни магнітного потоку (на початку та в кінці імпульсів), яка обумовлює величину вихрових струмів.

Втрати у перетворювачі частоти (рис. 4) практично лінійно зростають зі збільшенням навантаження внаслідок майже лінійного зростання струму. Зі збільшенням кількості електромагнітів вони також лінійно зростають через підвищення сумарного струму, обумовлене зростанням втрат у сталі вібраторів.

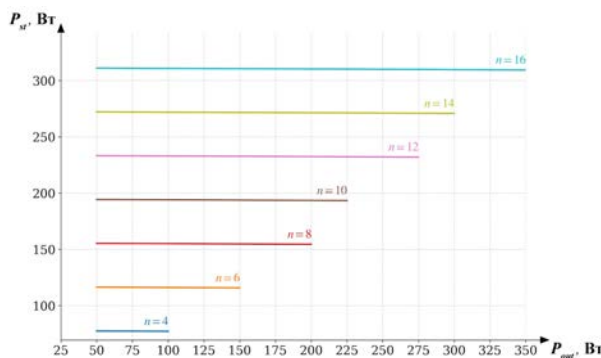


Рис. 3. Графіки залежності втрат у сталі від вихідної потужності

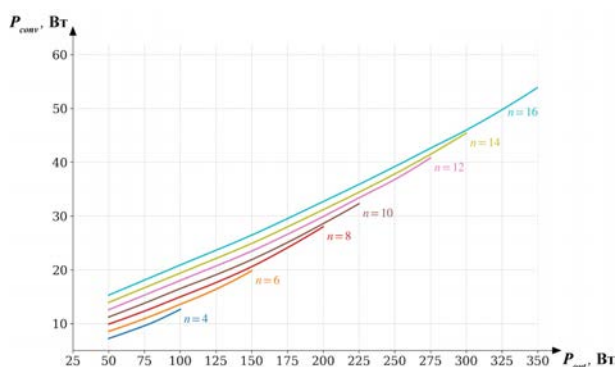


Рис. 4. Графіки залежності втрат у перетворювачі частоти від вихідної потужності

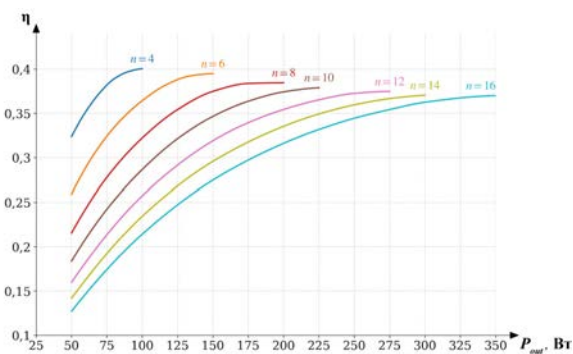


Рис. 5. Графіки залежності ККД привода від вихідної потужності

Отримані значення ККД привода (рис. 5) є вдвічі меншими, ніж розрахований у [10] ККД привода цього самого вібропідйомника, але з двома електромагнітами, в яких використовувалась шихтована електротехнічна сталь 3413 товщиною 0,35 мм. Двократне погіршення енергетичної ефективності можна пояснити двома факторами, пов'язаними з матеріалом магнітопровода електромагніта ЕМ68-08(ЕМК2), який виконаний з шихтованої конструкційної сталі 1010 товщиною 0,8 мм (з метою забезпечення механічної міцності). По-перше, сталь 1010 має приблизно на 20%

меншу індукцію насичення [18], і тому для створення тієї самої електромагнітної сили потрібний істотно більший струм i , відповідно, більші втрати в міді. По-друге, вона має в 3,3 рази більшу електричну провідність [19], що в стільки ж разів збільшує питомі втрати на вихрові струми. В свою чергу, більша товщина листа також призводить до їх зростання, причому в квадратичній залежності від товщини [20], тобто в $(0,8/0,35)^2 = 5,2$ разів. Таким чином, питомі втрати в сталі електромагніта EM68-08(EMK2) є в 17,2 рази вищими, ніж електромагніта, взятого для розрахунків у роботі [10]. І, якщо там вони були на порядок меншими за втрати в міді, то в даному випадку вони є співвимірними.

ВИСНОВКИ

При застосуванні вібраційних електромагнітів з магнітопроводами з шихтованої конструкційної сталі в електроприводах з імпульсним живленням їх ККД є вдвічі меншим у порівнянні з електромагнітними вібраторами, виготовленими з шихтованої електротехнічної сталі з високим вмістом кремнію, і визначається переважно втратами на вихрові струми. Проте саме конструкційна сталь застосовується у вібраційних електромагнітах, що випускаються серійно. Це відкриває певний напрямок для подальших досліджень, пов'язаний у пошуку раціональних рішень щодо використання таких електромагнітів у керованих електроприводах вібраційних пристроїв із імпульсним живленням з метою забезпечення їх високої енергетичної ефективності.

REFERENCES

- [1] Shenbor, V., Borovets, V., & Brusentsov, V. (2013). Syntez hnuchkykh vibratsiinykh transportno-tehnologichnykh system [Synthesis of flexible vibratory transport and technological systems]. *Materialy 11-ho Mizhnarodnoho sympoziumu ukrainskykh inzheneriv-mekhanikiv u Lvovi* (p. 97). NU "Lvivska politehnika".
- [2] Nozhenko, V. Yu., & Somka, O. O. (2023). Tekhniko-ekonomichna efektyvnist vibratsiinoi mashyny z chastotno-rehulovanyim elektropyvodom [Technical and economic efficiency of a vibratory machine with a frequency-controlled electric drive]. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho*, (4), 153-159. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2023.4.19>
- [3] Buhrov, D. (2024). Analiz doslidzhen ta suchasnykh metodiv modeliuvannya protsesiv vibroabrazyvnoi obrobky detalei [Analysis of research and modern methods of modeling the processes of vibro-abrasive machining of parts]. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho*, (5), 78-82. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.5.11>
- [4] Omelianov, O. M. (2017). Osoblyvosti zastosuvannya mekhanichnykh kolyvan v tekhnologichnykh protsesakh [Features of the application of mechanical vibrations in technological processes]. *Vibratsii v tekhnici ta tekhnologiiakh*, 87(4), 129-134.
- [5] Lanets, O. S. (2008). *Vysokoefektyvni mizhrezonansni vibratsiini mashyny z elektromahnitnym pryvodom (teoretychni osnovy ta praktyka stvorennia)* [Highly efficient inter-resonant vibratory machines with electromagnetic drive (theoretical foundations and creation practice)]. Vydavnytstvo Natsionalnoho universytetu "Lvivska politehnika".
- [6] Keppler, S., Bakalis, S., Leadley, C. E., & Fryer, P. J. (2016). Processing of barley grains in a continuous vibrating conveyor. *Journal of Food Engineering*, 187, 114-123. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.04.010>
- [7] Chubyk, R. V., & Yaroshenko, L. V. (2011). *Kerovani vibratsiini tekhnologichni mashyny* [Controlled vibratory technological machines]. VNAU.
- [8] Misljen, P. J., Despotovic, Z. V., & Matijevic, M. S. (2016). Modeling and control of bulk material flow on the electromagnetic vibratory feeder. *Automatika*, 57(4), 936-947. <https://doi.org/10.7305/automatika.2017.03.1766>
- [9] Lanets, O. S., Kachmar, R. Ya., & Borovets, V. M. (2016). Obgruntuvannya parametriv vibratsiinoho bunkernoho zhyvylynka z elektromahnitnym pryvodom [Justification of the parameters of a vibratory hopper feeder with an electromagnetic drive]. *Avtomatyzatsiia vyrobnychkykh protsesiv u mashynobuduvanni ta pryladobuduvanni*, (50), 54-76.
- [10] Cherno, O., & Onufriiev, Iu. (2025). Modeliuvannya rukhu dvomasovoho hvyntovoho vibratsiinoho pidiomnyka z kerovanyim elektromahnitnym pryvodom [Modeling the motion of a two-mass spiral vibratory elevator with a controlled electromagnetic drive]. *Visnyk KrNU imeni Mykhaila Ostrohradskoho*, 151(2), 238-244. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2025.2.31>
- [11] Cherno, O. O., & Monchenko, M. Yu. (2016). Energy efficiency of the vibratory device electromagnetic drive system. *Tekhnichna elektrodynamika*, (1), 20-25. <https://doi.org/10.15407/techned2016.01.020>
- [12] Despotovic, Z., & Ribic, A. (2012). The increasing energy efficiency of the vibratory conveying drives with electromagnetic excitation. *International Journal of Electrical and Power Engineering*, 6(1), 38-42. https://www.researchgate.net/publication/232237535_The_Increasing_Energy_Efficiency_of_the_Vibratory_Conveying_Drives_with_Electromagnetic_Excitation
- [13] Cherno, O. O., Hurov, A. P., & Ivanov, A. V. (2023). Energy characteristics of the electromagnetic vibration drive with pulse power supply of vibrator coils. *Tekhnichna elektrodynamika*, (2), 53-60. <https://doi.org/10.15407/techned2023.02.053>
- [14] Ivanov, A. V. (2024). *Enerhoefektyvni elektromahnitni pryvody vibratsiinykh transportuiuchykh prystroiv* [Energy-efficient electromagnetic drives of vibratory transporting devices] [Doctoral dissertation, natsionalnyi universytet korablebuduvannia]. eir.nuos.edu.ua. <https://eir.nuos.edu.ua/items/2e138aee-d2c0-4f7b-acd2-7f39f799d613>
- [15] Cherno, O. O. (2020). *Enerhoefektyvni kerovani elektromahnitni pryvody vibratsiinoho obladnannia. Teoriia i praktyka* [Energy-efficient controlled electromagnetic drives of vibratory equipment. theory and practice] [Extended abstract of Doctoral dissertation, Kremenchutskyi natsionalnyi universytet].
- [16] All.biz. (n.d.). *Vibromagnet EM68-08(EMK2)*. Retrieved February 21, 2026, from <https://all.biz/vibromagnet-of-em-68-emk-g15526979UA>

- [17] Chernov, O. O., Hurov, A. P., & Buhrim, L. I. (2018). Osoblyvosti pobudovy matematychnykh modelei elektromahnitnykh vibratsiynykh pryvodiv [Features of constructing mathematical models of electromagnetic vibratory drives]. *Elektromekhanichni i enerhozberhailuchi systemy*, 43(3), 45-51. <https://doi.org/10.30929/2072-2052.2018.3.43.45-51>
- [18] Cullity, B. D., & Graham, C. D. (2008). *Introduction to magnetic materials* (2nd ed.). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470386323>
- [19] ASM International. (1990). *ASM handbook: properties and selection: irons, steels, and high-performance alloys* (Vol. 1). ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v01.9781627081610>
- [20] Chapman, S. J. (2011). *Electric machinery fundamentals* (5th ed.). McGraw-Hill Education.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Шенбор, В., Боровець, В., & Брусенцов, В. (2013). Синтез гнучких вібраційних транспортно-технологічних систем. *Матеріали 11-го Міжнародного симпозиуму українських інженерів-механіків у Львові* (с. 97). НУ "Львівська політехніка".
- [2] Ноженко, В. Ю., & Сьомка, О. О. (2023). Техніко-економічна ефективність вібраційної машини з частотно-регульованим електроприводом. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, (4), 153-159. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2023.4.19>
- [3] Бугров, Д. (2024). Аналіз досліджень та сучасних методів моделювання процесів віброабразивної обробки деталей. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, (5), 78-82. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.5.11>
- [4] Омелянов, О. М. (2017). Особливості застосування механічних коливань в технологічних процесах. *Вібрації в техніці та технологіях*, 87(4), 129-134.
- [5] Ланець, О. С. (2008). *Високоєфективні міжрезонансні вібраційні машини з електромагнітним приводом (теоретичні основи та практика створення)*. Видавництво Національного університету "Львівська політехніка".
- [6] Keppler, S., Bakalis, S., Leadley, C. E., & Fryer, P. J. (2016). Processing of barley grains in a continuous vibrating conveyor. *Journal of Food Engineering*, 187, 114-123. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.04.010>
- [7] Чубик, Р. В., & Ярошенко, Л. В. (2011). *Керовані вібраційні технологічні машини*. ВНАУ.
- [8] Misljen, P. J., Despotovic, Z. V., & Matijevic, M. S. (2016). Modeling and control of bulk material flow on the electromagnetic vibratory feeder. *Automatika*, 57(4), 936-947. <https://doi.org/10.7305/automatika.2017.03.1766>
- [9] Ланець, О. С., Качмар, Р. Я., & Боровець, В. М. (2016). Обґрунтування параметрів вібраційного бункерного живильника з електромагнітним приводом. *Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні*, (50), 54-76.
- [10] Черно, О., Онуфрієв, Ю. (2025). Моделювання руху двомасового гвинтового вібраційного підйомника з керованим електромагнітним приводом. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*, 151(2), 238-244. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2025.2.31>
- [11] Chernov, O. O., Monchenko, M. Yu. (2016). Energy efficiency of the vibratory device electromagnetic drive system. *Технічна електродинаміка*, (1), 20-25. <https://doi.org/10.15407/techned2016.01.020>
- [12] Despotovic, Z., & Ribic, A. (2012). The increasing energy efficiency of the vibratory conveying drives with electromagnetic excitation. *International Journal of Electrical and Power Engineering*, 6(1), 38-42.
- [13] Chernov, O. O., Hurov, A. P., & Ivanov, A. V. (2023). Energy characteristics of the electromagnetic vibration drive with pulse power supply of vibrator coils. *Технічна електродинаміка*, (2), 53-60. <https://doi.org/10.15407/techned2023.02.053>
- [14] Іванов, А. В. (2024). *Енергоефективні електромагнітні приводи вібраційних транспортуючих пристроїв* [Дисертація доктора філософії, Національний університет кораблебудування]. eir.nuos.edu.ua. <https://eir.nuos.edu.ua/items/2e138aee-d2c0-4f7b-acd2-7f39f799d613>
- [15] Черно, О. О. (2020). *Енергоефективні керовані електромагнітні приводи вібраційного обладнання. теорія і практика* [Автореферат дисертації доктора технічних наук, Кременчуцький національний університет].
- [16] All.biz. (б. д.). *Вібромагніт EM68-08(EMK2)*. Отримано 21 лютого 2026, з <https://all.biz/vibromagnet-of-em-68-emk-g15526979UA>
- [17] Черно, О. О., Гуров, А. П., & Бугрім, Л. І. (2018). Особливості побудови математичних моделей електромагнітних вібраційних приводів. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, 43(3), 45-51. <https://doi.org/10.30929/2072-2052.2018.3.43.45-51>
- [18] Cullity, B. D., & Graham, C. D. (2008). *Introduction to magnetic materials* (2nd ed.). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470386323>
- [19] ASM International. (1990). *ASM handbook: properties and selection: irons, steels, and high-performance alloys* (Vol. 1). ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v01.9781627081610>
- [20] Chapman, S. J. (2011). *Electric machinery fundamentals* (5th ed.). McGraw-Hill Education.

© Онуфрієв Ю. І.

Дата першого надходження статті до видання: 23.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 22.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)