

ВОЛЯНИК ОЛЕКСІЙ

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

e-mail: volyanyk.oy@knutd.edu.ua<https://orcid.org/0000-0002-7278-0910>**НОСОВ ОЛЕКСІЙ**

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

e-mail: nosov.ov@knutd.edu.ua<https://orcid.org/0009-0009-1105-7532>

АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВ ЗАСТОСУВАННЯ МАГНІТНИХ ПІДШИПНИКІВ У РОЛИКОВИХ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМАХ ПІДПРИЄМСТВ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Мета. Аналіз перспектив застосування магнітних підшипників у роликівих системах підприємств легкої промисловості, визначення переваг та обмежень їх використання порівняно з традиційними опорами.

Методика. Використано методи аналізу, систематизації та узагальнення науково-технічної інформації щодо роликівих транспортних систем і магнітних підшипників. Класифіковано магнітні опори та проведено порівняльний аналіз традиційних і магнітних підшипникових вузлів за навантажувальною здатністю, опором обертанню, зношуванню, ресурсом, потребою в технічному обслуговуванні та конструктивною складністю. З урахуванням умов експлуатації визначено фактори, що впливають на перспективність застосування магнітних підшипників на підприємствах легкої промисловості.

Результати. Систематизовано критерії оцінювання опор з урахуванням переміщення тари, коробок, рулонних матеріалів та інших штучних вантажів на підприємствах легкої промисловості. Визначено, що найбільший потенціал для гравітаційних рольгангів і ділянок із підвищеними вимогами до чистоти мають пасивні та комбіновані опори.

Наукова новизна. Запропоновано систему критеріїв порівняння традиційних і магнітних опор з урахуванням особливостей внутрішньовиробничого транспорту легкої промисловості; визначено межі перенесення результатів досліджень роликів стрічкових конвеєрів на рольганги для штучних вантажів.

Практична значимість. Результати дослідження можуть бути використані під час вибору підшипникових опор для роликівих транспортних систем підприємств легкої промисловості. Визначено умови, за яких застосування магнітних опор доцільно перевірити у гравітаційних рольгангах для переміщення легких штучних вантажів та на ділянках із підвищеними вимогами до чистоти продукції.

Ключові слова: магнітний підшипник; роликів транспортна система; роликів конвеєр; внутрішньовиробничий транспорт; легка промисловість.

ANALYSIS OF THE PROSPECTS FOR USING MAGNETIC BEARINGS IN ROLLER CONVEYOR SYSTEMS AT LIGHT INDUSTRY ENTERPRISES

VOLIANYK OLEKSII, NOSOV OLEKSII

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

Purpose. To assess the prospects for using magnetic bearings in these systems and to identify their advantages and limitations compared with conventional bearing supports.

Methodology. Scientific and technical information on roller conveyor systems and magnetic bearings was analysed, systematised and generalised. Magnetic bearing supports were classified, and conventional and magnetic bearing assemblies were compared in terms of load capacity, rotational resistance, wear, service life, maintenance requirements and structural complexity. Factors affecting the prospects for using magnetic bearings at light industry enterprises were identified with regard to operating conditions.

Results. Criteria for assessing bearing supports were systematised with regard to the transport of containers, boxes, rolled materials and other discrete loads at light industry enterprises. Passive and hybrid supports were found to have the greatest potential for gravity roller conveyors and sections with stricter cleanliness requirements.

Scientific novelty. A set of criteria is proposed for comparing conventional and magnetic supports in view of the specific conditions of in-plant material handling in light industry. The limits of applying findings from studies of belt conveyor rollers to roller conveyors handling discrete loads are identified.

Practical significance. The findings can be used when selecting bearing supports for roller conveyor systems at light industry enterprises. Conditions have been identified under which magnetic supports warrant testing in gravity roller conveyors handling light discrete loads and in sections with stricter product cleanliness requirements.

Keywords: magnetic bearing; roller conveyor system; roller conveyor; intralogistics; light industry.

Вступ. Роликові транспортні системи широко застосовуються для внутрішньовиробничого переміщення штучних вантажів, тари, напівфабрикатів, рулонних матеріалів та готової продукції. На підприємствах легкої промисловості такі системи можуть бути складовими технологічних, складських, пакувальних і логістичних комплексів у текстильному, швейному, взуттєвому та інших виробництвах [1–3]. Простота конструкції, можливість компонування транспортних трас різної конфігурації та інтеграції з автоматизованим обладнанням забезпечують широкі можливості використання роликових конвеєрів і рольгангів у сучасних виробничих системах. У гравітаційних конвеєрах для регулювання руху вантажу застосовують, зокрема, гальмівні ролики [4].

Одним із елементів, що визначає експлуатаційні характеристики роликової транспортної системи, є підшипниковий вузол ролика. У більшості традиційних конструкцій застосовуються підшипники кочення, характеристики яких впливають на опір обертанню ролика, величину пускового моменту, ресурс, рівень вібрацій і шуму, а також потребу в технічному обслуговуванні [5–7]. Особливої уваги ці фактори набувають у системах із великою кількістю роликів, де сумарні втрати в окремих опорах можуть

впливати на енергетичні та експлуатаційні показники транспортного обладнання.

Перспективним напрямом удосконалення опор роликів вважають магнітну підтримку: зменшення контакту може скорочувати механічні втрати, зношування та потребу в змащуванні [8–12]. Однак переваги залежать від робочого навантаження, стійкості ролика, складності конструкції та вартості опори.

Магнітні опори та системи магнітної левітації вже досліджуються для різних транспортних і конвеєрних систем, у тому числі для зниження опору руху та створення безконтактної підтримки рухомих елементів [13–15]. Умови роботи рольганга відрізняються від умов стрічкового конвеєра, тому результати таких досліджень слід оцінювати з урахуванням навантаження, швидкості, частоти пусків і вимог до надійності. Для підприємств легкої промисловості додаткового значення можуть набувати вимоги до чистоти виробничого середовища, мінімізації забруднення продукції мастильними матеріалами, зниження шуму та інтеграції транспортних пристроїв до автоматизованих виробничих і логістичних систем.

Таким чином, актуальним є комплексний аналіз технічних передумов, переваг та обмежень використання різних типів магнітних підшипників у роликових транспортних системах підприємств легкої промисловості

з визначенням напрямів, у яких їх застосування може бути найбільш перспективним.

Метою дослідження є аналіз перспектив застосування магнітних підшипників у роликів транспортних системах підприємств легкої промисловості, визначення технічних передумов, потенційних переваг та обмежень їх використання порівняно з традиційними підшипниковими опорами.

Аналіз попередніх досліджень. Праці українських дослідників окреслюють об'єкти та схеми внутрішньовиробничого транспорту легкої промисловості: взуттєве виробництво розглянуто в [1; 2], а застосування роликів конвеєрів у підготовчому цеху швейного підприємства – у [3]. У праці [4] описано конструкції гальмівних роликів гравітаційних конвеєрів, зокрема магнітних. Вони створюють гальмівний момент і виконують іншу функцію, ніж магнітна опора ролика.

Дослідження традиційних конвеєрних роликів пов'язують опір руху з параметрами ролика й опорного вузла [5]. У роботах [5; 6] вивчається опір обертанню роликів і способи його експериментального визначення. Аналіз відмов підшипників конвеєрних роликів показує важливість умов експлуатації, герметизації та зношування [7]. Ці роботи задають критерії, за якими слід порівнювати механічну й магнітну опори.

Дослідження [8–12] показують залежність силових характеристик і стійкості магнітних опор від геометрії, зазору та способу стабілізації. Ці параметри потрібно враховувати під час оцінювання роликів систем.

Для конвеєрного обладнання запропоновано пасивну систему магнітної левітації [13] та досліджено вплив зазору і навантаження на магнітну підтримку стрічки [14]. У роботі [15] описано ролик стрічкового конвеєра з радіальною магнітною опорою; його осьове переміщення обмежене механічними елементами. Оскільки в рольгангах для штучних вантажів відрізняються навантаження, режим пусків і контакт вантажу з роликами, такі стрічкові конвеєри потребують додаткового аналізу для застосування на підприємствах легкої промисловості.

Постановка завдання. Незважаючи на наявність значної кількості досліджень, присвячених удосконаленню роликів транспортних систем, зниженню опору обертанню роликів та розробленню магнітних підшипників різних типів, питання їх застосування саме в роликів транспортних системах підприємств легкої промисловості залишається недостатньо дослідженим. Існуючі роботи щодо використання магнітної левітації в транспортному обладнанні переважно орієнтовані на стрічкові конвеєри та спеціалізовані транспортні системи, умови роботи яких суттєво відрізняються від умов експлуатації рольгангів та інших роликів транспортних пристроїв для переміщення штучних вантажів.

Завданням роботи є порівняння традиційних і магнітних опор роликів за навантажувальною здатністю, опором обертанню, стійкістю, ресурсом, потребою в обслуговуванні та конструктивною складністю з урахуванням умов експлуатації на підприємствах легкої промисловості.

Результати дослідження та обговорення. Роликові транспортні системи використовуються для переміщення переважно штучних вантажів і можуть виконувати функції основного, проміжного або допоміжного внутрішньовиробничого транспорту. Роликові секції можуть входити до складу технологічних і логістичних ліній, використовуватися для передачі вантажів між окремими видами обладнання, накопичення продукції, виконання завантажувально-розвантажувальних операцій та організації складських потоків. У загальній класифікації внутрішньовиробничого транспорту роликів конвеєри належать до поширених засобів безперервного переміщення штучних вантажів і можуть виконуватися як неприводними, так і приводними.

Для підприємств легкої промисловості використання роликів транспортних систем пов'язане насамперед із переміщенням тари, коробок, ящиків, контейнерів, піддонів, рулонних матеріалів, напівфабрикатів та готової продукції. Зокрема, у дослідженнях транспортно-логістичного обладнання сучасного швейного підприємства [3] роликів конвеєри розглядаються як складова

внутрішньовиробничої логістики та рекомундуються для переміщення коробок, ящиків, мішків, піддонів, рулонів та інших штучних вантажів у виробничих і складських приміщеннях. Разом з тим аналогічні функції внутрішнього транспортування та перевантаження характерні й для інших виробництв галузі легкої промисловості, що обумовлює доцільність розгляду роликів систем не в межах окремого технологічного процесу, а як елементу внутрішньовиробничої транспортно-логістичної системи.

За способом приведення роликів у рух виокремлено основні групи – неприводні (гравітаційні) та приводні роликові конвеєри. У неприводних системах обертання роликів і переміщення вантажу відбуваються під дією складової сили ваги на похилій трасі або внаслідок зовнішнього прикладеного зусилля. У приводних системах обертання частини або всіх роликів забезпечується приводом через відповідну механічну передачу. За конфігурацією траси роликові системи можуть мати прямолінійні, поворотні та комбіновані ділянки. Така різноманітність конструкцій обумовлює відмінності у вимогах до опор роликів залежно від функціонального призначення конкретної транспортної системи.

Підшипниковий вузол передає навантаження від вантажу й ролика на раму конвеє-

ра. Від його конструкції залежать опір обертанню, стійкість ролика та потреба в обслуговуванні. Для порівняння з магнітною опорою важливі характеристики не лише підшипника, а й вузла в зборі. Особливого значення опір обертанню набуває для неприводних систем, де рушійна сила обмежена силою ваги вантажу або зусиллям оператора і не компенсується безпосереднім приводом кожного ролика.

На основі аналізу конструкцій і умов функціонування роликів транспортних систем можна виділити сукупність вимог, які є визначальними при оцінюванні можливості використання альтернативних підшипникових опор. До них належать здатність сприймати робоче навантаження, низький опір обертанню, забезпечення стійкого положення ролика, достатній ресурс, низька інтенсивність зношування, мінімальна потреба у технічному обслуговуванні, конструктивна простота та прийнятна вартість. Для окремих умов виробництва додаткового значення можуть набувати відсутність потреби у змащуванні, зменшення шуму і вібрацій, стійкість до забруднення та можливість роботи в умовах підвищених вимог до чистоти.

З точки зору подальшого аналізу перспектив застосування магнітних підшипників зазначені вимоги доцільно об'єднати у декілька груп (Табл. 1).

Таблиця 1

Основні критерії оцінювання підшипникових опор роликів транспортних систем

№	Група критеріїв	Основні характеристики
1	Навантажувальні	радіальна та осьова навантажувальна здатність; жорсткість опори; здатність сприймати змінні навантаження
2	Кінематичні та силові	опір початку руху; опір усталеному обертанню; допустима частота обертання; стабільність положення ролика
3	Динамічні	рівень вібрацій і шуму; поведінка при зміні навантаження
4	Експлуатаційні	ресурс; зношування; потреба у змащуванні; періодичність технічного обслуговування; надійність
5	Конструктивно-технологічні	габарити; складність конструкції; можливість інтеграції в типову конструкцію ролика; технологічність виготовлення і монтажу
6	Енергетичні	механічні втрати; додаткове енергоспоживання; необхідність постійного живлення
7	Виробничі умови	вплив пилу, волокон, вологи та температури; вимоги до чистоти виробничого середовища

Наведена система критеріїв показує, що оцінювання перспективності магнітних підшипників у роликів транспортних

системах не може ґрунтуватися лише на можливості зменшення тертя. Для транспортного обладнання масового застосування

суттєвими є також навантажувальна здатність, стійкість обертового елемента, конструктивна складність, надійність та вартість. Водночас специфіка окремих виробництв легкої промисловості може підвищувати значущість таких властивостей, як чистота і відсутність мастильних матеріалів, низький рівень зношування та зменшена потреба у технічному обслуговуванні.

Підшипники кочення залишаються основним типом опор роликів транспортних систем завдяки відпрацьованій конструкції, високій навантажувальній здатності, стандартизації та відносно невисокій вартості. Опір обертанню залежить також від ущільнень, мастила, внутрішнього зазору, навантаження й температури. Експериментальні дослідження показують, що для роликів однакової конструкції зміна типу та параметрів підшипникового вузла може суттєво впливати на опір обертанню. Зокрема, у роботі [5] для досліджених конструкцій отримано значення опору від 1,9 до 6,7 Н залежно від параметрів підшипникового вузла.

Ця обставина має принципове значення для оцінювання магнітних підшипників. Їх

доцільність необхідно визначати не порівняно з довільною традиційною конструкцією, а з раціонально підібраним підшипником кочення, оскільки частина втрат може бути зменшена шляхом удосконалення традиційного опорного вузла. Відповідно, сам факт наявності механічного контакту в підшипнику кочення ще не є достатньою підставою для його заміни магнітною опорою.

Основною потенційною перевагою магнітних підшипників є можливість повного або часткового усунення механічного контакту між обертовими та нерухомими елементами. Для пасивних постійно-магнітних опор це може зменшувати складову опору, пов'язану з контактом у підшипнику, і потребу в змащуванні безконтактної частини опори. У досліді [15] порогова маса підвісного вантажу, за якої починалося обертання ролика, становила в середньому 150 г для ролика з магнітною опорою та 200 г для порівнюваного ролика з механічною опорою (рис. 1). Різниця становила 50 г, або 25% від значення для механічної опори.

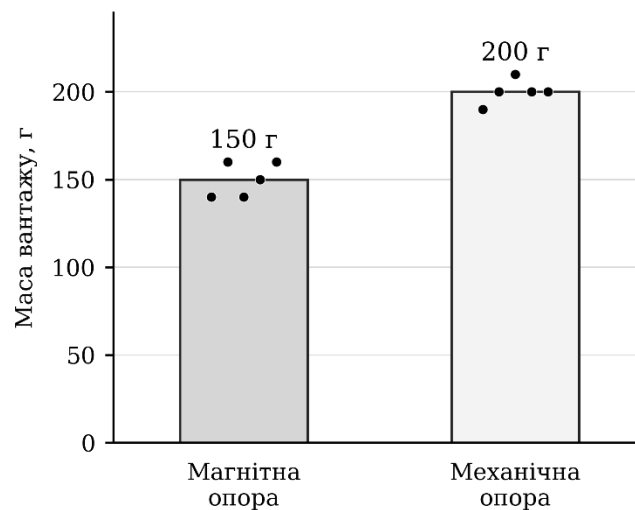


Рис. 1. Порогова маса підвісного вантажу для початку обертання ролика з магнітною та механічною опорами (за даними [15]; точки – окремі вимірювання, $n = 5$ для кожної опори)

Наведений результат підтверджує принципову можливість зменшення опору обертанню за допомогою магнітної підтримки, однак не може безпосередньо переноситися на роликові транспортні системи підприємств легкої промисловості.

У дослідженій конструкції магнітна опора сприймала радіальне навантаження, тоді як осьове положення ролика забезпечувалося механічними елементами. Крім того, необхідна радіальна сила понад 120 Н забезпечувалася шістьма парами кільцевих

магнітів при повітряному зазорі 1 мм, що демонструє залежність навантажувальної здатності від габаритів і параметрів магнітної системи.

Для рольгангів вирішальними можуть бути опір початку руху, ресурс, чистота та витрати на обслуговування. Тому висновки, отримані для високошвидкісних роторів, слід перевіряти в режимі роботи конкретної транспортної лінії.

У гравітаційному рольгангу зменшення пускового опору потенційно полегшує рух легких вантажів, але це потрібно перевірити за робочого навантаження й заданого ухилу. Для приводної лінії необхідно визначити частку втрат в опорах роликів у загальному енергоспоживанні разом із втратами привода й передачі.

Для підприємств легкої промисловості вибір опори слід пов'язувати з конкретним транспортованим об'єктом: коробками з готовою продукцією, тарою з напівфабрикатами або упакованими рулонними матеріалами. На ділянках переміщення легких штучних вантажів важливо перевірити вплив опору роликів на початок руху; для важкої тари визначальними стають несуча здатність і стійкість опори. Поблизу технологічних та пакувальних операцій окремим критерієм є ризик потрапляння мастила на матеріали чи вироби.

У транспортних лініях із великою кількістю роликів або підвищеними вимогами до чистоти зменшення контактного зношування та потреби в мастилі може мати самостійну експлуатаційну цінність. Проте ресурс і чистоту необхідно оцінювати для повного опорного вузла: допоміжні механічні елементи можуть потребувати обслуговування й змащування. Можливий вплив магнітної опори на шум і вібрації також потребує вимірювання на готовому конвеєрі, де діють привод і контакт вантажу з роликами.

Для типових рольгангів пріоритетними для перевірки є конструкції без постійного живлення, у яких магнітна система сприймає

частину навантаження. Їх застосування обмежують стійкість ролика, несуча здатність, габарити магнітів і вартість. Використання опор з активним керуванням може бути виправданим у спеціалізованому обладнанні, якщо керування положенням ролика є окремою технологічною вимогою.

Висновки.

1. Аналіз пасивних, активних і гібридних магнітних підшипників показав, що їх використання потенційно дозволяє зменшити або усунути механічний контакт в опорі, знизити інтенсивність зношування та потребу у змащуванні. Водночас практичне застосування магнітних опор обмежується необхідністю забезпечення стійкого положення ролика, достатньої навантажувальної здатності, конструктивного розміщення магнітних елементів, а також їх вартістю.

2. Найбільший потенціал для застосування в роликівих транспортних системах мають пасивні та комбіновані магнітні опори, які дають можливість використати переваги безконтактного або частково безконтактного сприйняття навантаження без суттєвого ускладнення системи керування. Повністю активні магнітні підшипники для стандартних роликівих конвеєрів мають обмежену перспективність через необхідність використання електромагнітів, датчиків, силової електроніки та систем автоматичного керування.

3. Найбільш перспективними умовами застосування магнітних підшипників визначено гравітаційні рольганги, системи з підвищеними вимогами до чистоти виробничого середовища, а також транспортні системи, для яких зменшення опору руху, зношування та обсягів технічного обслуговування має підвищену експлуатаційну значущість. Для звичайних роликівих конвеєрів загального призначення доцільність використання магнітних підшипників значною мірою визначатиметься співвідношенням отриманого технічного ефекту та збільшення вартості опорного вузла.

Література

1. Ковальов Ю. А., Плешко С. А., Лавренчук В. І. Аналіз об'єктів транспортування в логістичних системах

References

1. Kovalov, Yu. A., Pleshko, S. A., & Lavrenchuk, V. I. (2016). Analiz ob'ektiv transportuvannia v lohistychnykh systemakh vzuttievoho vyrobnytstva [Analysis of

взуттєвого виробництва. *Легка промисловість*. 2016. № 2. С. 25–27. URL: <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/2000>.

2. Ковальов Ю. А., Плешко С. А., Лавренчук В. І. Стан і аналіз логістичних схем вантажопотоків взуттєвих підприємств. *Легка промисловість*. 2016. № 3. С. 31–33. URL: <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/7052>.

3. Рубанка М. М., Ковальов Ю. А., Рубанка А. І. Інноваційні технології при виготовленні швейних виробів: обладнання підготовчого цеху. *Технології та інжиніринг*. 2023. № 4 (15). С. 38–52. DOI: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.4.4>.

4. Ковальов Ю. А., Плешко С. А., Рубанка М. М., Савенко А. А. Аналіз конструкцій гальмівних роликів гравітаційних конвеєрів. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС–2023): матеріали тез доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції, Чернігів, 25–26 травня 2023 р. Чернігів: НУ "Чернігівська політехніка", 2023. Т. 1. С. 75–77. URL: <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/23550>.*

5. Kulinowski P., Kasza P., Zarzycki J. Influence of Design Parameters of Idler Bearing Units on the Energy Consumption of a Belt Conveyor. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, No. 1. Art. 437. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13010437>.

6. Kulinowski P., Kasza P., Zarzycki J. Methods of Testing of Roller Rotational Resistance in Aspect of Energy Consumption of a Belt Conveyor. *Energies*. 2023. Vol. 16, No. 1. Art. 26. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16010026>.

7. Vasić M., Stojanović B., Blagojević M. Failure analysis of idler roller bearings in belt conveyors. *Engineering Failure Analysis*. 2020. Vol. 117. Art. 104898. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104898>.

8. Paden B., Groom N. J., Antaki J. F. Design Formulas for Permanent-Magnet Bearings. *Journal of Mechanical Design*. 2003. Vol. 125, No. 4. P. 734–738. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.1625402>.

9. Ravaud R., Lemarquand G., Lemarquand V. Force and Stiffness of Passive Magnetic Bearings Using Permanent Magnets. Part 1: Axial Magnetization. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2009. Vol. 45, No. 7. P. 2996–3002. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2009.2016088>.

10. Ravaud R., Lemarquand G., Lemarquand V. Force and Stiffness of Passive Magnetic Bearings Using Permanent Magnets. Part 2: Radial Magnetization. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2009. Vol. 45, No. 9. P. 3334–3342. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2009.2025315>.

11. Hamler A., Goričan V., Štumberger B., Jesenik M., Trlep M. Passive magnetic bearing. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2004. Vol. 272–276. P. 2379–2380. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2003.12.972>.

12. Vennemann J. Super Twisting Sliding Mode Control with Compensated Current Controller Dynamics on Active Magnetic Bearings with Large Air Gap.

transportation objects in logistics systems of footwear production]. *Lehka promyslovist*, 2, 25–27. URL: <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/2000> [in Ukrainian].

2. Kovalov, Yu. A., Pleshko, S. A., & Lavrenchuk, V. I. (2016). Stan i analiz lohystychnykh skhem vantazhopotokiv vzuttyevykh pidpriemstv [State and analysis of logistics schemes of cargo flows of footwear enterprises]. *Lehka promyslovist*, 3, 31–33. URL: <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/7052> [in Ukrainian].

3. Rubanka, M. M., Kovalov, Yu. A., & Rubanka, A. I. (2023). Innovatsiini tekhnolohii pry vyhotovlenni shveinykh vyrobiv: obladnannia pidhotovchoho tsekhу [Innovative technologies in the production of sewing products: preparation department equipment]. *Tekhnolohii ta inzhynirynh*, 4 (15), 38–52. DOI: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.4.4> [in Ukrainian].

4. Kovalov, Yu. A., Pleshko, S. A., Rubanka, M. M., & Savenko, A. A. (2023). Analiz konstrukttsii halmivnykh rolykiv hravitatsiinykh konveieriv [Analysis of brake roller designs for gravity conveyors]. *Kompleksne zabezpechennia yakosti tekhnolohichnykh protsesiv ta system (KZiaTPS–2023): materialy tez dopovidei XIII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, Chernihiv, 25–26 travnia 2023 r. (Vol. 1. pp. 75–77). Chernihiv: NU "Chernihivska politehnika". URL: <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/23550> [in Ukrainian].*

5. Kulinowski, P., Kasza, P., & Zarzycki, J. (2021). Influence of Design Parameters of Idler Bearing Units on the Energy Consumption of a Belt Conveyor. *Sustainability*, 13 (1), 437. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13010437>.

6. Kulinowski, P., Kasza, P., & Zarzycki, J. (2023). Methods of Testing of Roller Rotational Resistance in Aspect of Energy Consumption of a Belt Conveyor. *Energies*, 16 (1), 26. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16010026>.

7. Vasić, M., Stojanović, B., & Blagojević, M. (2020). Failure analysis of idler roller bearings in belt conveyors. *Engineering Failure Analysis*, 117, 104898. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104898>.

8. Paden, B., Groom, N. J., & Antaki, J. F. (2003). Design Formulas for Permanent-Magnet Bearings. *Journal of Mechanical Design*, 125(4), 734–738. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.1625402>.

9. Ravaud, R., Lemarquand, G., & Lemarquand, V. (2009). Force and Stiffness of Passive Magnetic Bearings Using Permanent Magnets. Part 1: Axial Magnetization. *IEEE Transactions on Magnetics*, 45 (7), 2996–3002. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2009.2016088>.

10. Ravaud, R., Lemarquand, G., & Lemarquand, V. (2009). Force and Stiffness of Passive Magnetic Bearings Using Permanent Magnets. Part 2: Radial Magnetization. *IEEE Transactions on Magnetics*, 45 (9), 3334–3342. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2009.2025315>.

11. Hamler, A., Goričan, V., Štumberger, B., Jesenik, M., & Trlep, M. (2004). Passive magnetic bearing. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, (272–276), 2379–2380. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2003.12.972>.

12. Vennemann, J. (2023). Super Twisting Sliding Mode Control with Compensated Current Controller Dynamics on Active Magnetic Bearings with Large Air

Electronics. 2023. Vol. 12, No. 4. Art. 950. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12040950>.

13. Ohji T., Ichiyama S., Amei K., Sakui M., Yamada S. A new conveyor system based on a passive magnetic levitation unit having repulsive-type magnetic bearings. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2004. Vol. 272–276. P. E1731–E1733. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2003.12.984>.

14. Wang S., Hu K., Li D.-Y. Analysis and experimental research on air gap characteristics of permanent magnet low-resistance belt conveyor. *IET Science, Measurement & Technology*. 2018. Vol. 12, No. 4. P. 472–478. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2017.0269>.

15. Wu H., Ren Y., Yang S., Wang N., Song C., Hu Y. Design of Permanent Magnet Levitation Roller for Belt Conveyor. *Proceedings of the 15th International Symposium on Magnetic Bearings* (ISMB15). 2016. P. 805–810. URL: https://www.magneticbearings.org/app/uploads/publications/ismb15/ismb15_submission_107.pdf.

Gap. *Electronics*, 12 (4), 950. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12040950>.

13. Ohji, T., Ichiyama, S., Amei, K., Sakui, M., & Yamada, S. (2004). A new conveyor system based on a passive magnetic levitation unit having repulsive-type magnetic bearings. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, (272–276), E1731–E1733. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2003.12.984>.

14. Wang, S., Hu, K., & Li, D.-Y. (2018). Analysis and experimental research on air gap characteristics of permanent magnet low-resistance belt conveyor. *IET Science, Measurement & Technology*, 12 (4), 472–478. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2017.0269>.

15. Wu, H., Ren, Y., Yang, S., Wang, N., Song, C., & Hu, Y. (2016). Design of Permanent Magnet Levitation Roller for Belt Conveyor. *Proceedings of the 15th International Symposium on Magnetic Bearings* (ISMB15) (pp. 805–810). URL: https://www.magneticbearings.org/app/uploads/publications/ismb15/ismb15_submission_107.pdf.