

УДК 621.35

DOI <https://doi.org/10.32782/EIS/2025-107-5>

ТИРИСТОРНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД ТЕХНОЛОГІЧНИХ УСТАНОВОК ЯК ПОТУЖНИЙ СПОЖИВАЧ РЕАКТИВНОЇ ЕНЕРГІЇ

Рухлов Артем Володимирович,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем
ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка»»
ORCID ID: 0000-0001-9430-8396

Рухлова Наталія Юріївна,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри електроенергетики
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0000-0001-9694-8864

Шрамко Юрій Юрійович,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем
ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка»»
ORCID ID: 0000-0002-8141-260X

У роботі виконано порівняльну характеристику найбільш поширених систем електроприводу потужних технологічних установок вугільних шахт: синхронний двигун із високовольтним перетворювачем частоти та «класичним» керуванням збудженням ротора без напівпровідникових елементів, асинхронний двигун за системою асинхронно-тиристорного каскаду та з реостатним регулюванням у колі ротора. Вказані системи застосовуються для регулювання технологічних параметрів (тиск, продуктивність, швидкість тощо) вентиляторних та підйомних установок. Визначені статистичні показники профілів електроспоживання головних вентиляторів підтверджують доцільність застосування систем регульованого електроприводу з погляду зменшення споживання активної електроенергії. Однак водночас показано споживання значного обсягу реактивної потужності, властиве системам на базі тиристорних перетворювачів незалежно від типу двигуна (синхронний або асинхронний). Зазначені тенденції підтверджуються також фактичними кривими зміни енергетичних показників у характерних циклах роботи головного підйому шахти з електроприводом за системою асинхронного тиристорного каскаду та без неї.

Фактичні профілі електроспоживання підтверджують зниження технологічної витрати електроенергії в разі застосування систем регульованого електроприводу. Однак величина такого зниження залежить від режиму роботи стаціонарної установки та наявного діапазону регулювання її технологічних параметрів: чим він ширший, тим ефективність системи вища і навпаки. Для підвищення енергоефективності споживана системою реактивна електроенергія (враховуючи її значний обсяг) має бути скомпенсована за допомогою відповідних фільтрокомпенсуювальних пристроїв, величина генерованої реактивної потужності яких регулюється в масштабі реального часу. Фільтрувальний компонент таких систем покращить проблеми з якістю електроенергії, які також мають місце в разі застосування потужних напівпровідникових перетворювачів.

Ключові слова: тиристорний електропривод, стаціонарні технологічні установки, реактивна електроенергія.

Rukhlov Artem, Rukhlova Nataliia, Shramko Yurii. Thyristor electric drive of technological plants as a powerful consumer of reactive energy

This paper presents a comparative characterization of the most common electric drive systems for powerful technological plants on coal mines: a synchronous motor with a high-voltage frequency converter and "classical" rotor excitation control without semiconductor elements, an induction motor based on an asynchronous-thyristor cascade system and with rheostat control in the rotor circuit. These systems are used to regulate the technological parameters (capacity, pressure, speed, etc.) of ventilation and hoisting units. The determined statistical indicators of the power consumption profiles of the main ventilators confirm the feasibility of using regulated electric drive systems in terms of reducing the active electricity consumption. However, at the same time, the consumption of a significant amount of reactive power is shown, which is inherent in systems based on thyristor converters, regardless of the type of motor (synchronous or asynchronous). These trends are also confirmed by the actual

curves of changes in energy indicators for the typical operation cycles of the main mine hoisting plant with an electric drive using an asynchronous-thyristor cascade system and without it.

The actual power consumption profiles confirm the reduction of technological electricity consumption when using regulated electric drive systems. However, the magnitude of such a reduction depends on the operating mode of the stationary plant and the available range of adjustment of its technological parameters: the wider it is, the higher the system efficiency and vice versa.

To improve energy efficiency, the reactive electricity consumed by the system (given its significant volume) must be compensated by appropriate filter compensating devices, the value of which is regulated in real time. The filtering component of such systems will improve the power quality problems that also occur when using powerful semiconductor converters.

Key words: *thyristor electric drive, stationary technological plants, reactive electric power.*

Актуальність проблеми. Потужні стаціонарні технологічні установки вугільних шахт характеризуються зовсім різними за профілем режимами активного електроспоживання:

- головний вентилятор (ГВ) – рівномірний із низьким значенням стандарту навантаження;
- головний водовідлив – ступеневий із низьким значенням стандарту навантаження;
- головний підйом (ГП) – різкозмінний з високим значенням стандарту навантаження.

Також для таких установок характерні різні типи приводних двигунів – асинхронні з фазним ротором, синхронні та двигуни постійного струму. Однак завдяки відомим перевагам головні вентиляторні та підйомні установки здебільшого обладнуються системами регульованого електроприводу на базі тиристорних перетворювачів основних електричних параметрів: частоти, струму або напруги (системи ПЧСВ, ЕКТЦ, КТЕУ, АТК тощо). Водночас, як свідчить практика, основні переваги таких систем у вигляді високої керованості технологічних параметрів (швидкості, продуктивності, тиску тощо) та певного зниження активного електроспоживання обов'язково «доповнюються» значним зростанням споживання реактивної енергії та генерацією вищих гармонік в електричну мережу підприємства. Варто зазначити, що залежно від параметрів самої системи електропостачання (потужності короткого замикання, амплітудно-частотної характеристики тощо) та показників системи регульованого електроприводу (потужність, пульсність і тип перетворювача тощо) зазначені негативні ефекти можуть значно зменшити позитивні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Загалом, дослідженню різноманітних аспектів систем регульованого електроприводу, в тому числі тиристорного, присвячено велику кількість робіт, як навчальних [1; 2], так і наукових [3–5]. Розв'язання проблеми низької якості електроенергії, що виникає в електричних мережах у разі застосування подібних систем та іншого нелінійного навантаження, всебічно розглядається авторами в роботах [6–9].

Аналізу систем електроприводу, режимів електроспоживання та підвищенню енергоефективності основних стаціонарних технологічних установок вугільних шахт присвячено роботи [10–12]. Однак автори наведених робіт не розглядають профілі реактивного електроспоживання відповідних технологічних процесів у разі застосування тиристорного електроприводу та без нього (за релевантних режимів роботи), що дасть змогу безумовно підтвердити вплив на енергетичні показники (як позитивний, так і негативний) саме напівпровідникового перетворювача.

Тому **метою роботи** є підтвердження негативного впливу тиристорного електроприводу на профіль реактивного електроспоживання стаціонарних технологічних установок за допомогою фактичних даних і визначення шляхів його нівелювання.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для умов вугільних шахт у контексті розв'язуваного науково-практичного завдання системи електроприводу стаціонарних установок незалежно від типу приводного двигуна можна класифікувати за одним критерієм – застосуванням тиристорного перетворювача (ТП). Будова, схемні рішення, конструктивне виконання, автоматизація та режими «класичних» систем (без ТП) досить повно викладено в численних літературних джерелах, наприклад, у роботах [1; 2]. Для підйомних установок із таких систем набув поширення «класичний» асинхронний електропривод із реостатним регулюванням у колі ротора, якому притаманна низка недоліків, найсуттєвішими з яких є неможливість точного підтримання швидкостей дотягування без застосування регульованого механічного гальма та значні втрати електроенергії. Величина цих втрат прямо пропорційна різниці між номінальною і зниженою швидкостями та часу руху на зниженій швидкості. Однак простота, відносно низька вартість і відсутність у минулому інших конкурентоспроможних електроприводів зумовили поширення асинхронного реостатного

приводу на шахтних підйомних установках. Для вентиляторів головного провітрювання все ще застосовується система синхронного електроприводу з незалежним збудженням, основними перевагами якої є відносно невисока вартість і можливість компенсації реактивної потужності під час роботи в режимі перезбудження. Однак певні недоліки призводять до її витіснення іншими системами з використанням ТП: великі пускові струми (особливо для потужних вентиляторів) і значна тривалість пуску, необхідність улаштування системи збудження, низька надійність тиристорних збудників тощо. Регулювання продуктивності вентилятора за «класичного» синхронного електроприводу здійснюється за допомогою механічних пристроїв за постійної частоти обертання ротора двигуна.

Для головного підйому як системи тиристорного електроприводу в основному застосовуються «тиристорний перетворювач (керований випрямляч) – двигун постійного струму» (ТП-ДПТ) та «асинхронний тиристорний каскад» (АТК). В електроприводах за системою ТП-ДПТ регулювання кутової швидкості двигуна здійснюється зміною напруги живлення ланцюга його якоря (так званий вентильний перетворювач напруги). Виконання цієї функції фазовим способом у діапазоні від нуля до номінального значення покладено на ТП (керований випрямляч) [1; 2]. Характерним прикладом системи ТП-ДПТ є використання електропривода комплектного тиристорного постійного струму серії ЕКТЦ (подібна серія – КТЕУ) з мікропроцесорною системою керування, призначеною для механізмів, які працюють у режимах регулювання частоти обертання (швидкості), положення, моменту, потужності, а також струму збудження. У системі АТК нерегульований діодний випрямляч у ланцюзі ротора (відповідно до вентильного каскаду) на тиристорний (керований) випрямляч. Це забезпечує додаткові переваги завдяки керованості роторного перетворювача, а саме двонаправленість потоку енергії. Електропривод АТК забезпечує незалежне керування швидкістю і моментом двигуна шляхом регулювання струму ротора (струму мережевого перетворювача), що дозволило досягти регульованих властивостей, порівнянних з електроприводом постійного струму.

Для електроприводу головних вентиляторів вугільних шахт здебільшого використовуються дві системи з ТП: асинхронний тиристорний каскад на базі асинхронного двигуна з фазним ротором і високовольтний синхронний перетворювач частоти (ПЧСВ) із ланкою постійного струму. Система ПЧСВ призначена для

регулювання частоти обертання механізмів із приводними синхронними двигунами (СД) напругою 6 (10) кВ потужністю від 1 до 10 МВт з усіма відомими перевагами та недоліками перетворювачів частоти [10; 11].

Профілі електроспоживання технологічних установок відповідають головно змінному або добовому часовому інтервалу. Для наочного порівняння на рис. 1 наведено фактичні добові графіки електричних навантажень (ГЕН) головного вентилятора із СД номінальною потужністю 3200 кВт із системою регульованого електроприводу на базі ПЧСВ та без неї, а на рис. 2 – для іншої вентиляторної установки потужністю 1250 кВт за тих самих варіантів.

Доцільність застосування систем регульованого електроприводу оцінюють здебільшого з погляду підвищення енергетичної ефективності та технологічних переваг. Якщо переваги, пов'язані з керуванням технологічним процесом, не викликають сумнівів, то перший фактор (особливо в частині зниження технологічної витрати електроенергії) не настільки очевидний. У цьому випадку величина такого зниження залежить від режиму роботи установки та наявного діапазону регулювання її технологічних параметрів: чим він ширший, тим ефективність застосування регульованого електроприводу вища і навпаки.

Розглянуті ГЕН характеризуються дуже малим стандартом активного навантаження (до 0,5%) і мінімальним споживанням реактивної потужності для систем без ПЧСВ (не більш 10 квар. на рис. 2б) або її генерацією (рис. 1б), що пояснюється відповідним режимом збудження синхронного двигуна.

У табл. 1 наведено усереднені параметри профілів електроспоживання вентиляторних установок, що визначені для вибірок із кількістю реалізацій: ГВ з потужністю 3200 кВт та ПЧСВ – 7 реалізацій, СД – 14; головний вентилятор потужністю 1250 кВт з ПЧСВ – 24, СД – 12 реалізацій.

Як бачимо, реалізація такого самого режиму провітрювання шахти, але за відсутності тиристорного електроприводу, спричиняє збільшення навантаження двигуна. Однак якщо для СД потужністю 3200 кВт воно незначне (у середньому на 2–2,5% до $\approx 85\%$), то для двигуна 1250 кВт величина такого збільшення вже суттєва (середнє значення 20–25% до $\approx 75\%$). Це свідчить про те, що перший ГВ навіть із системою ПЧСВ уже працює в режимі, близькому до номінального, коли діапазон регулювання його технологічних параметрів практично відсутній. Зниження добового активного електроспоживання

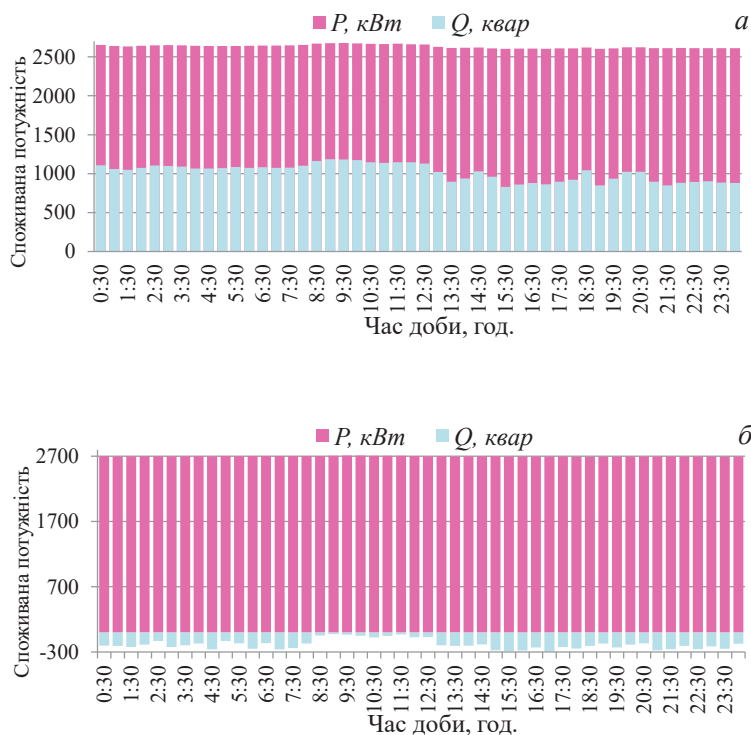


Рис. 1. Фактичні добові профілі електроспоживання ГВ із синхронним двигуном потужністю 3200 кВт та системою ПЧСВ (а) і «класичним» регулюванням (б)

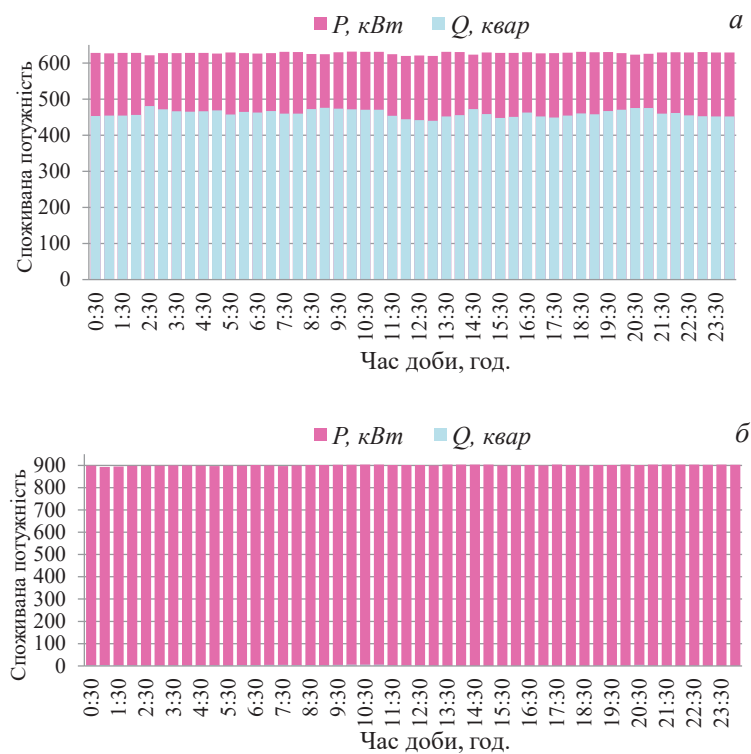


Рис. 2. Фактичні добові профілі електроспоживання ГВ із синхронним двигуном потужністю 1250 кВт та системою ПЧСВ (а) і «класичним» регулюванням (б)

Таблиця 1

Усереднені значення параметрів фактичних добових профілів електроспоживання ГВ

Параметр	Позначення	Величина параметру для			
		ГВ потужністю 3200 кВт		ГВ потужністю 1250 кВт	
		з ПЧСВ	без ПЧСВ	з ПЧСВ	без ПЧСВ
Витрата електроенергії: активної, кВт·год реактивної, квар·год.	W_p W_Q	63100 24400	64800 -4400	15020 11050	21600 57
Математичне сподівання потужності: активної, кВт реактивної, квар.	P_c^* Q_c^*	2630 (82,2) 1020	2700 (84,3) -180	627 (50,2) 461	900 (72,4) 2,4
Середньоквадратичне відхилення: активної, кВт (%) реактивної, квар.	σP^* σQ	23 (0,7) 109	4,1 (0,1) 74,8	3 (0,2) 10	2,6 (0,2) 1,4
Коефіцієнт потужності	$\cos\varphi$	0,93	0,998 (вип.)	0,81	1,0

* У дужках вказані значення у відсотках від номінальної потужності двигуна

становить усього $\approx 3\%$. Для другого вентилятора стан інший, оскільки зниження завантаження двигуна на 20–25% із застосуванням системи ПЧСВ підтверджує широкий діапазон зміни технологічних параметрів вентилятора (тиску і продуктивності). Для таких умов зниження добового активного електроспоживання становить уже значущі $\approx 30\%$. Однак зміни в споживанні реактивної енергії для обох установок величезні.

Для підтвердження зростання реактивного електроспоживання наочнішими будуть фрагменти замірів у вигляді кривих зміни енергетичних показників у характерних циклах роботи головного підйому із двигуном 800 кВт і системою АТК (рис. 3, а). Форма кривих свідчить, що значне споживання реактивної потужності спостерігається в періоди неусталеного руху скіпа, тобто в процесі його розгону, гальмування і розвантаження.

У процесі сталого руху скіпа накидів споживання реактивного навантаження не спостерігається, а його величина порівнянна з активною. Наведені фрагменти зміни фактичних енергетичних показників ще раз підтверджують тезу про те, що «глибоке» регулювання технологічних параметрів стаціонарних установок за допомогою тиристорних перетворювачів значно знижує коефіцієнт потужності [11].

На підтвердження цього на рис. 3б наведено криві зміни потужностей у нетиповому циклі вугільного підйому, що виконується під час спуску негабаритного вантажу, в разі використання «класичного» реостатного регулювання асинхронного двигуна потужністю 800 кВт замість системи АТК. Порівняння цих кривих із даними рис. 3а свідчить про значно менше

споживання реактивної потужності ніж із застосуванням системи АТК.

Зауважимо, що за умови несинусоїдальності напруги й струму в електричній мережі (що спостерігається під час роботи тиристорного електропривода) компенсація реактивної потужності за допомогою найбільш розповсюджених батарей статичних конденсаторів значно ускладнюється або взагалі виявляється неможливою. Це пов'язано з декількома основними факторами. По-перше, батареї конденсаторів можуть довгий час працювати за перевантаження струмами вищих гармонік, які не перевищують 30%, та за підвищеної до 10% напруги. Однак опір саме конденсаторів значно зменшується зі зростанням частоти, тому в цих умовах термін їх роботи скорочується (особливо це стосується батарей, що приєднуються до мережі безпосередньо, тобто без захисних реакторів). По-друге, значення ємності конденсаторів та індуктивності електричної мережі можуть спровокувати в системі електропостачання режим, близький до резонансу струмів на частоті будь-якої з гармонік. Звичайно, що такий режим спричиняє перевантаження батарей конденсаторів та вихід їх із ладу. По-третє, різкозмінний режим споживання реактивної потужності (короткотривалі стрибки і провали, див. рис. 3) у разі застосування систем регульованого електропривода робить неефективним використання нерегульованих або ступенево регульованих конденсаторних установок. Для таких умов необхідне впровадження фільтрокомпенсуювальних пристроїв, величина генерованої реактивної потужності яких регулюється в масштабі реального часу [9].

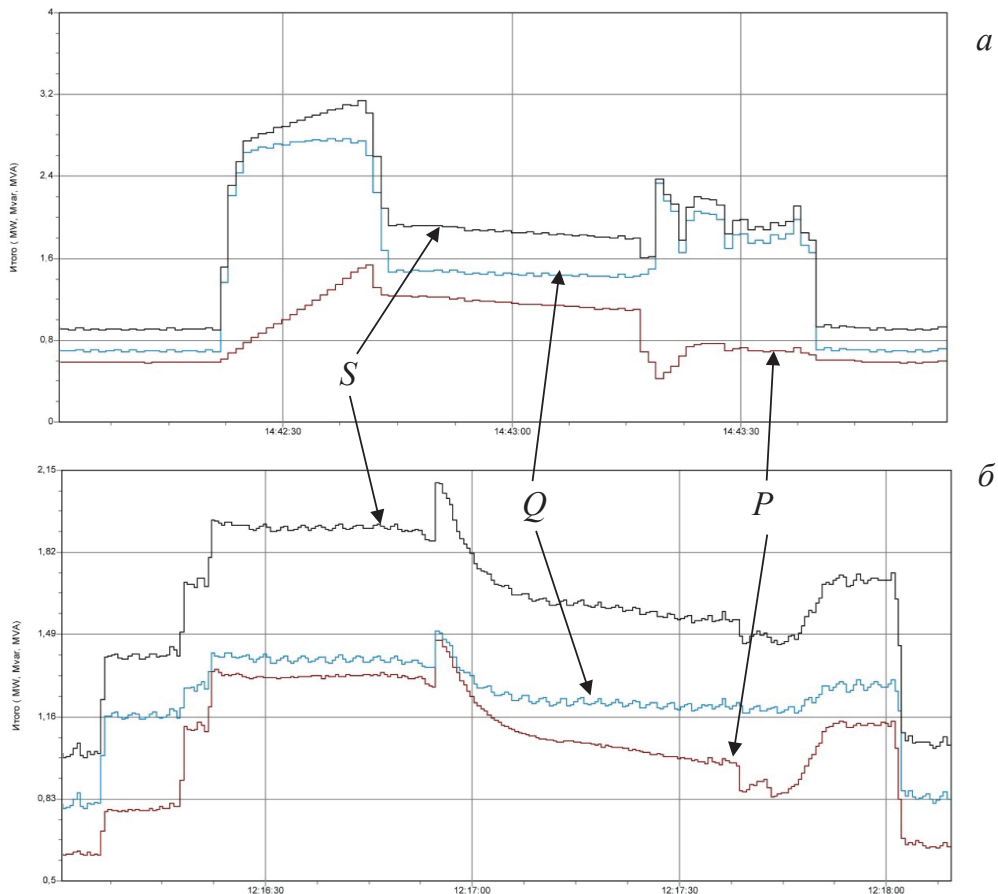


Рис. 3. Криві зміни потужностей у циклі УП із системою асинхронного приводу

Висновки і перспективи подальших досліджень. Дослідження підтверджують, що використання тиристорних перетворювачів у системах електроприводу технологічних установок (наприклад, головних вентиляторів та підйомних машин) суттєво збільшує споживання реактивної енергії. Це призводить до зниження коефіцієнта потужності та погіршення якості електроенергії в мережі підприємства. Величина потенціалу зниження активного електроспоживання за таких умов залежить

від необхідного (або наявного) діапазону регулювання технологічних параметрів конкретної установки: чим він ширший, тим ефективність застосування регульованого електроприводу вища й навпаки. Традиційні батареї статичних конденсаторів неефективні в умовах несинусоїдальності напруги та різкозмінного навантаження, характерного для тиристорних приводів. Це вимагає впровадження більш складних фільтрокомпенсуючих пристроїв із динамічним регулюванням.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Васи́лега П.О. Електропривод робочих машин : підручник. Суми : Сумський державний університет, 2022. 290 с.
2. Возняк О.М., Штуць А.А., Колісник М.А. Сучасні системи електроприводів. *Теорія та практика* : навч. посібник. Вінниця : ТВОРИ, 2021. Ч. 1. 280 с.
3. Stadnik M., Semenchenko D., Semenchenko A., Belytsky P. Improving energy efficiency of coal transportation by adjusting the speeds of a combine and a mine face conveyor. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies SNIP*, 2019. № 1. С. 60–70.
4. Стаднік М.І., Видмиш А.А. Дослідження пуску стрічкових конвеєрів. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, 2018. С. 98–104.
5. Квашнін В.О., Бабаш А.В., Квашнін В.В. Розробка та дослідження моделі електроприводу рециркуляційного насоса зі скалярною системою керування. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2021. № 34(110). С. 39–48.

6. Визначення показників якості напруги у промислових системах електропостачання при обмеженій потужності енергосистеми / Ю.А. Папаїка та ін. *Електротехніка та Електроенергетика*, 2024. № 3. С. 36–44. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2024-3-4>.
7. Чорна В.О., Кудряшов О.О. Порівняльний аналіз ефективності пасивного та активного фільтрів вищих гармонік в мережі з нелінійним навантаженням. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2024. Вип. 48. С. 83–91. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.48.2024.310686>.
8. Варецький Ю., Гайдзіца М., Коваль О. Проблема перенапруг на силових фільтрах у промислових електричних мережах. *Електроенергетичні та електромеханічні системи*. 2023. № 1(6). С. 20–30. DOI: <https://doi.org/10.23939>.
9. Рухлов А.В., Рухлова Н.Ю. Ефективність застосування фільтрокомпенсуючого пристрою на прикладі головної підйомної установки вугільної шахти. *Abstracts of XXIII International Scientific and Practical Conference «The current state of the organization of scientific activity in the world»*. Madrid, Spain, June 10-12, 2024. P. 559–563. URL: <https://eu-conf.com/events/the-current-state-of-the-organization>.
10. Рухлов А.В., Рухлова Н.Ю., Кириченко М.С. Профілі електроспоживання головних вентиляторів вугільних шахт. *Збірник наукових праць НГУ*. 2024. № 77. С. 111–117. DOI: <https://doi.org/10.33271/csrpmu/77.111>.
11. Разумний Ю.Т., Рухлов А.В., Крамаренко С.А. Енергетичні показники сучасних вугільних підйомних установок шахт. *Гірнична електромеханіка та автоматика*. 2014. № 92. С. 48–53.
12. Razumnyi Yu. T., Rukhlova N. Yu., Rukhlov A. V. Energy efficient work of a coal mine dewatering plant. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2015. № 2. 74–79. URL: <https://nvngu.in.ua/index.php/uk/arkhiv-zhurnal/za-vipuskami/1044-2015/zmist-2-2015/>

REFERENCES:

1. Vasyleha, P. O. (2022). *Elektropryvod robochyykh mashyn: pidruchnyk* [Electric drive of working machines: a textbook]. *Sumy: Sumskyi derzhavnyi universytet*, 290 [in Ukrainian].
2. Vozniak, O. M., Shtuts, A. A., & Kolisnyk, M. A. (2021). *Suchasni systemy elektropryvodyv. Teoriia ta praktyka. Chastyna 1: navch. posibnyk* [Modern electric drive systems. Theory and practice. Part 1: study guide]. *Vinnytsia: TVORY*, 280 [in Ukrainian].
3. Stadnik, M., Semenchenko, D., Semenchenko, A., & Belytsky, P. (2019). Improving energy efficiency of coal transportation by adjusting the speeds of a combine and a mine face conveyor. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies SNIP*. 1, 60–70.
4. Stadnik, M. I., & Vydmysh, A. A. (2018). *Doslidzhennia pusku strichkovykh konveieriv* [Study of the start-up of belt conveyors]. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*. 98–104 [in Ukrainian].
5. Kvashnin, V. O., Babash, A. V., & Kvashnin, V. V. (2021). *Rozrobka ta doslidzhennia modeli elektropryvodu retsyrkuliatyinoho nasosu zi skaliarnoiu systemoiu keruvannia* [Development and study of a model of a recirculation pump electric drive with a scalar control system]. *Elektrotekhnichni ta kompiuterni systemy*. 34(110), 39–48 [in Ukrainian].
6. Papaika, Yu. A., Lysenko, O. H., Malyshko, M. M., & Udovik, O. V. (2024). *Vyznachennia pokaznykiv yakosti napruhy u promyslovykh systemakh elektropostachannia pry obmezhenii potuzhnosti enerhosystemy* [Determination of voltage quality indicators in industrial power supply systems with limited power system capacity]. *Elektrotekhnika ta Elektroenerhetyka*. 3, 36–44 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2024-3-4>
7. Chorna, V. O., & Kudriashov, O. O. (2024). *Porivnialnyi analiz efektyvnosti pasyvnogo ta aktyvnoho filtriv vyshchyykh harmonik v merezhi z nelineinym navantazhenniam* [Comparative analysis of the efficiency of passive and active high-pass filters in a network with a nonlinear load]. *Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky*. 48, 83–91 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.48.2024.310686>
8. Varetskyi, Yu. O., Haidzitsa, M., & Koval, O. O. (2023). *Problema perenapruh na sylovykh filtrakh u promyslovykh elektrychnykh merezhakh* [The problem of overvoltages on power filters in industrial power grids]. *Elektroenerhetychni ta elektromekhanichni systemy*. 1(6), 20–30 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.23939>
9. Rukhlov, A. V., & Rukhlova, N. Yu. (2024). *Efektyvnist zastosuvannia filtrokompensovalnoho prystroiu na prykladi holovnoi pidiomnoi ustanovky vuhilnoi shakhty* [Efficiency of using a filter compensating device on the example of the main hoisting unit of a coal mine]. *Abstracts of XXIII International Scientific and Practical Conference «The current state of the organization of scientific activity in the world»*. Madrid, Spain, June 10-12, 559–563 [in Ukrainian]. URL: <https://eu-conf.com/events/the-current-state-of-the-organization>

10. Rukhlov, A. V., Rukhlova, N. Yu., & Kyrychenko, M. S. (2024). Profili elektrospozhyvannia holovnykh ventyliatoriv vuhilnykh shakht [Power consumption profiles of main fans at the coal mines]. *Zbirnyk naukovykh prats NHU*. 77, 111–117 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/77.111>
11. Razumnyi, Yu. T., Rukhlov, A. V., & Kramarenko, S. A. (2014). Enerhetychni pokaznyky suchasnykh vuhilnykh pidiomnykh ustanovok shakht [Energy performance of modern coal hoisting units on mines]. *Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka*. 92, 48–53 [in Ukrainian].
12. Razumnyi, Yu. T., Rukhlova, N. Yu., & Rukhlov, A. V. (2015). Energy efficient work of a coal mine dewatering plant. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2, 74–79. URL: <https://nvngu.in.ua/index.php/uk/arkhiv-zhurnalu/za-vipuskami/1044-2015/zmist-2-2015/>