

8. CoolMOS™ SJ MOSFETs benefits in hard and soft switching SMPS topologies. Semiconductor & System Solutions – Infineon Technologies. URL: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-ProductBrochure_CoolMOS_Benefits_in_Hard_Soft_Switching-ProductBrochure-v07_01-EN.pdf?fileId=db3a3043338c8ac80133aca62ba63047 (accessed 27.01.2025).
9. Khanna V. K. (2003), The Insulated gate bipolar transistor (IGBT): theory and design, ISBN: 978-0-471- 23845-4, Wiley-IEEE Press, Hoboken, NJ, USA.
10. Technology Details – Infineon Technologies. *Semiconductor & System Solutions – Infineon Technologies*. URL: <https://www.infineon.com/cms/en/product/technology/silicon-carbide-sic/technology-details/> (accessed 19.01.2025).
11. Vasylets S., Vasylets K. Improvement of the mathematical model of the IGBT transistor taking into account the nonlinearity of the junction capacitances. Bulletin of the Mykhailo Ostrogradskyi National University of Kyiv. 2018. No. 1. pp. 9–14. (Ukr).
12. B. Mondal, R. T. Pogulaguntla and A. K. B, “Double Pulse Test Set-up: Hardware Design and Measurement Guidelines”, 2022 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Jaipur, India, 2022, pp. 1–6, DOI: 10.1109/PEDES56012.2022.10080339.
13. Q. Zhang, R. Wang and Y. Chen, “Design of a Double Pulse Test Platform for Switching Devices”, 2022 IEEE 3rd China International Youth Conference on Electrical Engineering (CIYCEE), Wuhan, China, 2022, pp. 1–5, DOI: 10.1109/CIYCEE55749.2022.9959070.
14. Double Pulse Testing Power Semiconductor Devices with Oscilloscope & AFG. *Test- und Messgeräte | Tektronix*. URL: <https://www.tek.com/en/documents/application-note/double-pulse-test-tektronix-afg31000-arbitrary-function-generator> (accessed 24.12.2024).
15. NGTB50N120FL2WAG IGBT – Field Stop II / 4 Lead. URL: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/ngtb50n120fl2wa-d.pdf> (accessed 19.05.2024).
16. IMZ120R030M1H CoolSiC™ 1200V SiC Trench MOSFET Silicon Carbide MOSFET. Semiconductor & System Solutions – Infineon Technologies. URL: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IMZ120R030M1H-DataSheet-v02_02-EN.pdf?fileId=5546d46269e1c019016a92fdcc776696 (accessed 25.12.2024).

УДК 621.31.

Шерстньов Ю. В., аспірант, ORCID 0009-0003-3210-5552,
науковий керівник: канд. техн. наук, доцент **Ю. Г. Осадчук**,
Криворізький Національний Університет

АДАПТИВНЕ КЕРУВАННЯ КОМПЕНСАТОРАМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ПІДПРИЄМСТВ ГІРНИЧОЗБАГАЧУВАЛЬНОГО КОМБІНАТУ

ADAPTIVE CONTROL OF REACTIVE POWER COMPENSATORS OF THE MINING AND ENTREPRENEURS PLANT

Анотація. У статті представлено результати моделювання адаптивної системи компенсації реактивної потужності гірничозбагачувального підприємства. Модель базується на вдосконалених принципах моніторингу і контролю енергоспоживанням на підстанціях гірничозбагачувальних підприємств при розбудові кіберфізичної системи. Проаналізовано добові та річні дані обсягів споживання електричної енергії. Запропоновано інноваційний підхід до моніторингу та оптимізації енергетичних потоків,

спрямований на зменшення втрат і покращення енергетичної ефективності. Дослідження оцінює вплив вдосконаленої системи керування компенсаційними пристроями. Отримані результати показують перспективність запропонованих рішень по компенсації реактивної потужності. Бібл. 6, рис. 3.

Ключові слова: гірничозбагачувальні комбінати, енергоефективність, конденсаторні батареї, синхронні двигуни, реактивна потужність, активна потужність.

Abstract. The article presents the results of modeling a centralized reactive power compensation system for a mining and processing enterprise. The model is based on advanced principles of energy consumption monitoring and control at substations of mining and processing plants in the development of a cyber-physical system. Daily and annual electricity consumption data have been analyzed. An innovative approach to energy flow monitoring and optimization is proposed, aimed at reducing losses and improving energy efficiency. The study evaluates the impact of the improved control system for compensation devices. The obtained results demonstrate the feasibility of the proposed solutions for reactive power compensation. Ref. 6, Fig. 3.

Keywords: mining and processing plants, energy efficiency, capacitor banks, synchronous motors, reactive power, active power.

Вступ. Енергетична ефективність є ключовим фактором у підвищенні конкурентоспроможності гірничозбагачувальних підприємств (ГЗК), які належать до найбільш енергоємних промислових об'єктів. Зараз наявна ситуація суттєвого обмеження обсягів споживання електричної потужності. Через це знижується навантаженість трансформаторів, асинхронних двигунів, що призводить до збільшення частки реактивної потужності (РП). Додатково можливі відключення “природних” компенсаторів – синхронних двигунів (СД). В такій ситуації виникає необхідність створення багатокритеріальної адаптивної системи обліку та контролю перетіканням реактивної потужності, що базується на інтеграції інформаційних і автоматизованих технологій (тобто розглядати мережу як кіберфізичну систему (КФС)). Така система дозволить оптимізувати розподіл РП в режимі реального часу, зменшити навантаження на мережі та знизити втрати електричної енергії.

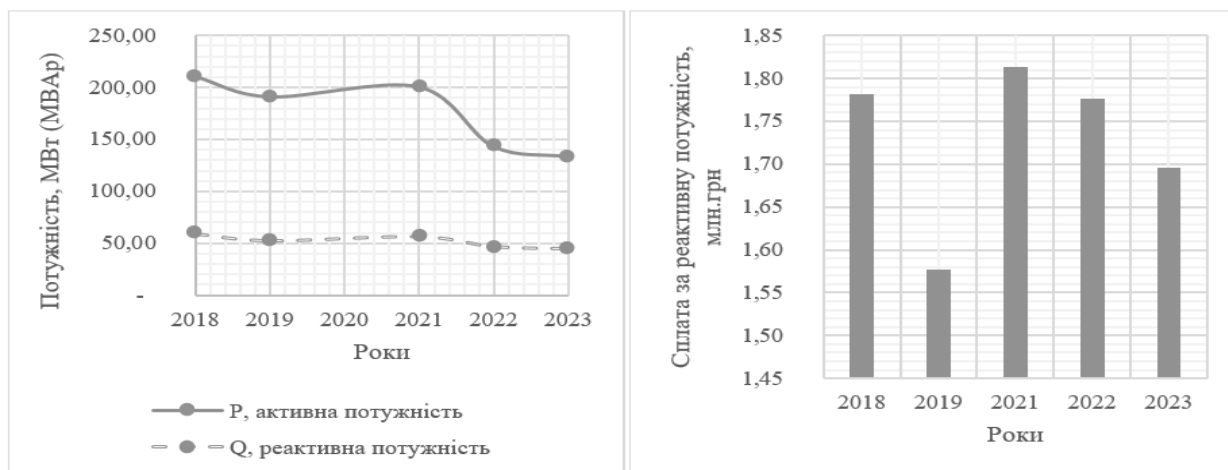
Метою досліджень є удосконалення моделі процесу компенсації реактивної потужності на підприємствах гірничозбагачувального комплексу з урахуванням динаміки енергоспоживання, що дозволить підвищити електроенергетичну ефективність живлячих підстанцій.

Матеріал і результати досліджень. Аналіз проведених досліджень свідчить про перспективність впровадження адаптивних систем керувань перетіканням реактивної потужності [1–3]. Водночас автоматизовані централізовані системи керування перетіканням реактивної потужності в промислових мережах демонструють підвищення енергоефективності на 15–20 % залежно від специфічних умов [2]. Завдяки централізованому управлінню забезпечується більш точне регулювання розподілу реактивної потужності [3].

Аналіз тенденцій у споживанні електроенергії є важливим етапом оцінки енергетичної ефективності підприємства. На рис. 1 наведено динаміку електроспоживання та сплата за спожиту реактивну потужність споживачами ГЗП № 1 гірничозбагачувального підприємства N. Ситуація при наявності

стабільного, або підвищеного співвідношення активної та реактивної потужності створює значні виклики для управління енергетичними ресурсами, оскільки підвищене реактивне навантаження негативно впливає на ефективність експлуатації трансформаторів і електродвигунів, які часто працюють у недовантаженому режимі.

Крім того, підприємство несе додаткові фінансові витрати не лише за фактично спожиту реактивну потужність, а й за її недокомпенсацію. Аналіз представлених графіків свідчить про суттєве скорочення обсягів електроспоживання в останні роки. Зокрема, у 2022 році зафіксовано найбільше зниження – на 28,5 % для активної та на 17,44 % для реактивної потужності споживачів ГЗП № 1. Однак, з огляду на зростання тарифів, загальні витрати на оплату реактивної потужності зменшилися лише на 2 %, що підкреслює необхідність удосконалення системи компенсації для підвищення економічної ефективності енергоспоживання.



а)

б)

Рисунок 1. Статистичні дані по ГЗП № 1 за різні роки: а) – споживання електричної енергії споживачами ГЗП за 2018–2023 рр.; б) – плата за реактивну потужність за 2018–2023 рр.

Електричні мережі промислових підприємств є досить складними структурами з великою кількістю споживачів з різкозмінним характером навантаження. В свою чергу, самі підстанції є також складовими ще більшої енергетичної системи. Врахування усіх складових у такому випадку буде дуже складним та нераціональним по відношенню до затрачених розрахункових потужностей. Тому доцільним для подальшого моделювання буде розглянути окрему структуру розподільної підстанції (РП), як частину енергетичної системи підприємства. Кіберфізичні системи (КФС) поєднують комп'ютерні алгоритми з фізичними процесами, забезпечуючи моніторинг, управління, аналіз і оптимізацію роботи електрообладнання.

Для керування компенсаційними пристроями пропонується адаптивний алгоритм. Рівень генерації реактивної потужності конденсаторними батареями регулюється дискретно. У випадку наявності синхронних двигунів

в активі підприємства, оцінюється доцільність їх використання у процесі компенсації реактивної потужності. Для цього централізована система моніторить технологічні показники СД (їх число, температуру охолоджуючого повітря, температуру обмоток статора та побічно ротора, живлячу напругу) з метою не перевищення допустимих значення цих параметрів [4].

Враховавши особливості запропонованої КФС, було створено модель у середовищі Simulink програмного забезпечення Matlab (версія 2017a). Цю модель наведено на рис. 2. Така структура повністю відповідає загальноприйнятій в цей час концепції автоматизації промислових виробництв та відомим актуальним стандартам [5]. Таким чином, на основі виконаного аналізу можливо створити модель та дослідити енергоефективність запропонованої системи.

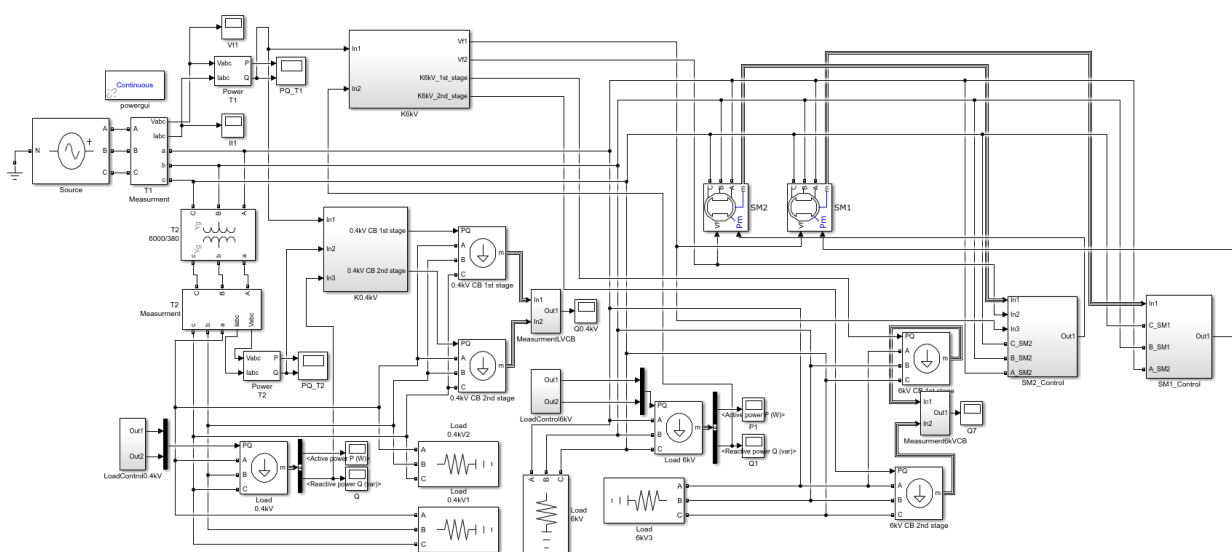


Рисунок 2. Модель адаптивної системи керування компенсаційними пристроями у Simulink

На рис. 3а), б) наведено графіки споживання електричної енергії при наявності та відсутності пристроїв компенсації (пунктиром показана активна потужність, суцільною лінією – реактивна потужність). Дані взято з лічильника на вході.

Як можна побачити на рис. 3 б), адаптивна система керування компенсаційними пристроями ефективно знижує споживання реактивної потужності. Проте повністю забезпечити “нуль-перетікання” майже неможливо, оскільки в даній моделі, як і в реальних електроенергетичних системах підприємств, наявні потужні СД 6 кВ та КБ 0,4 кВ та 6 кВ, що викликають тривалі перехідні процеси. Їх параметри впливають на ефективність компенсації реактивної потужності та на стабільність роботи мережі [6]. В реальних системах додатково буде впливати й характеристики комутаційної апаратури (час перемикавання, опір, тощо). Таким чином, аналіз

перехідних процесів у таких системах є перспективним для подальших досліджень.

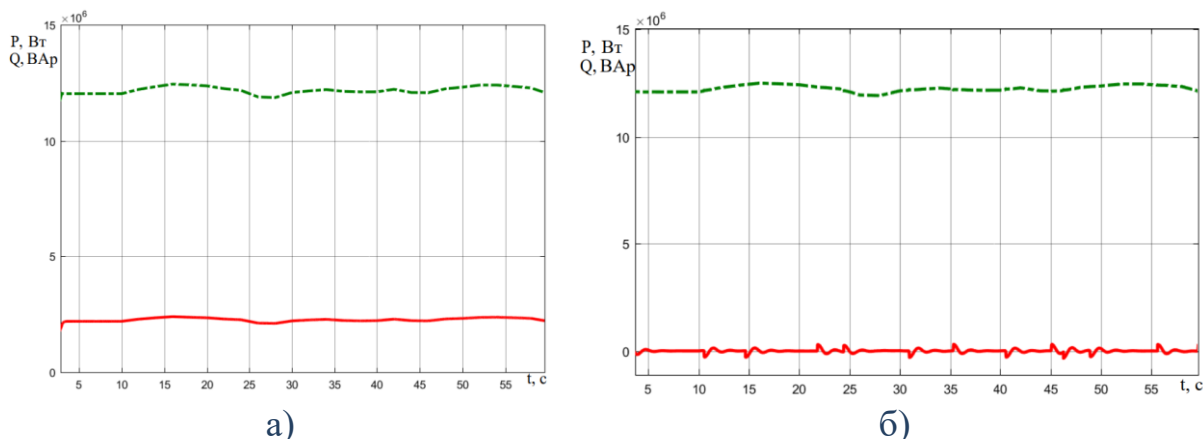


Рисунок 3. Графіки споживання електричної енергії при наявності та відсутності пристроїв компенсації: а) – Споживання електричної енергії без компенсації; б) – Споживання електричної енергії з адаптивною системою обліку та контролю перетіканням реактивної потужності

Додатково при залученні у компенсацію СД та КУ спостерігається відносно незначне підвищення споживання активної потужності (приблизно 0,34 %). Проте в такому випадку додаткова сплата за активну потужність буде приблизно в 3,7 рази менша, ніж за РП до впровадження заходів з компенсації.

Висновки. В результаті дослідження встановлено, що адаптивна система обліку та керування реактивною потужністю на основі адаптивних систем дозволяє раціонально використовувати компенсуючі пристрої. При цьому КБ та СД використовуються раціонально, в залежності від їх технологічних параметрів та необхідного значення РП для компенсації. У результаті система забезпечує максимально приближене до нульового значення споживання РП з мережі, значно знижуючи сплату підприємством за електричну енергію. Таким чином, інтеграція адаптивної системи керування з іншими елементами енергетичного менеджменту підприємства дозволяє не лише знижувати втрати, а й оптимізувати загальну електроенергетичну структуру, підвищуючи стабільність та надійність електропостачання.

Список використаних джерел

1. Salim Adolfo G. Y., Vladimir S. S., Kelly B. S., John E. Candelo-Becerra, Jorge de la Cruz Comprasion of Reactive Power Compensation Methods in an Industrial Electrical System with Power Quality Problems // *Electricity*, 2024. vol. 5, issue 3. pp. 642–661. DOI: 10.3390/electricity5030032.
2. Lionginas L. The methods of reactive power compensation in the 25kV, 50Hz contact network // *Transport Problems*, 2018. vol. 13, issue 5. pp. 59–68. DOI: 10.21307/tp.2018.13.1.6.

3. Alireza A., Hossein H. An improved centralized/decentralized accurate reactive power sharing method in AC microgrids // International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023. vol. 148. 108908. DOI: 10.1016/j.ijepes.2022.108908.
4. Осадчук Ю. Г., Учитель А. Д., Жуков С. А. та ін. Підвищення енергетичної ефективності потужних електроприводів турбомеханізмів гірничо-металургійних комплексів. Монографія. – Кривий Ріг: Редакційно-видавничий центр ГВУЗ “КНУ”, 2018. – 345 с. ISBN 978-966-132-050-4.
5. ДСТУ EN 62264-1:2019. Інтегрування систем керування підприємством та виробництвом. Частина 1. Моделі та термінологія. [Чинний від 2019-09-01]. Вид. офіц. Київ: ДП “УкрНДНЦ”, 2019. 77 с.
6. Mohammed B., Samer S., Yuting T., Joydeep M. Reactive power compensation for reliability improvement of power systems. 2016 DOI: 10.1109/TDC.2016.7519910.

References

1. Salim Adolfo G. Y., Vladimir S. S., Kelly B. S., John E. Candelo-Becerra, Jorge de la Cruz Comparison of Reactive Power Compensation Methods in an Industrial Electrical System with Power Quality Problems // Electricity, 2024. vol. 5, issue 3. pp. 642–661. DOI: 10.3390/electricity5030032.
2. Lionginas L. The methods of reactive power compensation in the 25kV, 50Hz contact network // Transport Problems, 2018. vol. 13, issue 5. pp. 59–68. DOI: 10.21307/tp.2018.13.1.6.
3. Alireza A., Hossein H. An improved centralized/decentralized accurate reactive power sharing method in AC microgrids // International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023. vol. 148. 108908. DOI: 10.1016/j.ijepes.2022.108908.
4. Osadchuk Y. G., Uchitel A. D., Zhukov S. A. et al. Increasing the energy efficiency of powerful electric drives of turbomechanisms of mining and metallurgical complexes. Monograph. – Kryvyi Rih: Editorial and Publishing Center of the State University of Mining and Metallurgy “KNU”, 2018. – 345 p. ISBN 978-966-132-050-4. (Ukr).
5. DSTU EN 62264-1:2019. Integration of enterprise and production management systems. Part 1. Models and terminology. [Valid from 2019-09-01]. Official edition. Kyiv: State Enterprise "UkrNDNC", 2019. 77 p. (Ukr).
6. Mohammed B., Samer S., Yuting T., Joydeep M. Reactive power compensation for reliability improvement of power systems. 2016 DOI: 10.1109/TDC.2016.7519910.

УДК 621.317.318

Довгий С. С., аспірант, ORCID 0009-0003-9428-7240,
науковий керівник: канд. техн. наук, доцент **О. В. Коцар**,
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

ПІДВИЩЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ЕНЕРГОМОНІТОРИНГУ МСП ЧЕРЕЗ БЕНЧМАРКІНГ

IMPROVING THE CREDIBILITY OF SME ENERGY MONITORING VIA BENCHMARKING

Анотація. Переважна більшість МСП беруть участь у програмах підвищення рівня енергетичної ефективності задля посилення конкурентоспроможності на ринку в першу чергу за рахунок розширення виробничих потужностей, а не підвищення