DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.79
УДК 621.31

Інтелектуальна система керування компенсаційними пристроями в електроенергетичній системі гірничозбагачувального підприємства

Шерстньов Юрій Володимирович[1)]
Аспірант каф. Електричної інженерії
ORCID: https://orcid.org/0009-0003-3210-5552; yurasw1@gmail.com.
[1)] Криворізький національний університет, вулиця Віталія Матусевича, 11. Кривий Ріг, 50000, Україна

АНОТАЦІЯ

Сучасні гірничозбагачувальні підприємства характеризуються високою енергоємністю технологічних процесів, значною кількістю електроприводів з нелінійним типом навантаження. Разом з цим до промислових підприємств ставляться вимоги по необхідності підтримання належної якості електроенергії у внутрішній системі електропостачання. Одним із ключових завдань у цьому контексті є ефективне керування перетіканнями реактивної потужності, що дозволяє зменшити втрати електроенергії, оптимізувати режими роботи обладнання та підвищити надійність всіх ланок електроенергетичної системи підприємства. Традиційні системи компенсації, що базуються на статичних налаштуваннях або локальних алгоритмах, не завжди забезпечує ефективність за умов змінного навантаження та коливань технологічних процесів та часто не враховують змінні режими навантаження та мають обмежені можливості до адаптації. У роботі запропоновано підхід до інтелектуального керування джерелами реактивної потужності, що базується на інтеграції синхронних двигунів та конденсаторних батарей у єдину централізовану інтелектуальну систему керування. Проаналізовано добові та річні дані обсягів споживання електричної енергії споживачами підстанцій підприємства. Запропоновано інноваційний підхід до покращення енергетичної ефективності. Встановлено оптимальні умови використання синхронних двигунів та конденсаторних батарей. Модель базується на інтеграції сучасних технологій моніторингу та аналізу даних, що дозволяє адаптуватися до динамічних змін навантаження та оперативно коригувати параметри системи компенсації. Дослідження оцінює вплив розроблених методів на стабільність роботи енергосистеми підприємства та економічну складову впровадження запропонованих рішень. Основою розробленого підходу є застосування адаптивних алгоритмів, які враховують коливання навантаження, параметри якості електроенергії та їх технологічні параметри для раціоналізації процесу компенсації. Особливістю системи є використання механізмів регулювання на основі адаптивного алгоритму, що забезпечує гнучке керування реактивними потоками в умовах швидкозмінних виробничих процесів. Це дозволяє знизити кількість зайвих перемикань обладнання, продовжити термін його роботи, зменшити ймовірність виникнення аварійних режимів та підвищити енергоефективність роботи всієї електроенергетичної системи підприємства. Отримані результати показують перспективність запропонованих рішень по компенсації реактивної потужності для підвищення енергоефективності виробництва. Таким чином, розроблена інтелектуальна система керування компенсаційними пристроями може стати основою для створення «розумних» енергетичних підсистем на базі промислових підприємств, що відповідає сучасним тенденціям розвитку Smart Grid та цифровізації енергетики.

Ключові слова: реактивна потужність; інтелектуальне керування; синхронні двигуни; конденсаторні батареї; гірничозбагачувальне підприємство; енергоефективність

Метою роботи є розробка моделі енергоефективної інтелектуальної адаптивної системи компенсаційними пристроями для підвищення електроенергетичної ефективності (коефіцієнта потужності) живлячих підстанцій на основі інтегрованого використання синхронних двигунів і конденсаторних батарей із застосуванням інтелектуальних алгоритмів раціоналізації їх використання, мінімізації електричних втрат та підвищення техніко-економічної ефективності електроенергетичної системи підприємства.

Однією з пріоритетних задач енергетики, особливо в енергоємних галузях — гірничо-збагачувальних комбінатах (ГЗК), є підвищення ефективності використання електроенергії. Значна частка втрат у цих системах зумовлена реактивною потужністю (РП), яка не виконує корисної роботи, збільшує струмові навантаження на електротехнічне обладнання, знижує коефіцієнт потужності та зменшує пропускну здатність кабельних ліній, що призводить до зростання енергетичних та експлуатаційних витрат. Аналітичні дані свідчать про наявність резервів енергоефективності через впровадження комплексних заходів компенсації РП [1]. Традиційні підходи до оцінки енергоспоживання не враховують в повній мірі динамічну змінність навантажень — сезонну, технологічну та оперативну.

Тарифні механізми, які передбачають оплату за надлишкові спожиту та згенеровану в нічні часи РП, стимулюють підприємства впроваджувати заходи з її компенсації [2]. Тому раціоналізація керування компенсуючими пристроями має враховувати не лише технологічні

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

обмеження, а й економічні. Особлива увага повинна приділятися характеристикам синхронних двигунів (їх кількість, температурний стан обмоток, напруга живлення тощо), оскільки параметри роботи синхронних двигунів (СД) впливають на експлуатаційні витрати і обмежують допустимі режими компенсації [3]. Моделювання функціонування компенсуючих пристроїв із урахуванням особливостей електроенергетичних систем ГЗК створює технічну базу для синтезу адаптивних, економічно обґрунтованих алгоритмів управління [4]. Використання інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) підвищує точність контролю й швидкість реакції на зміни енергетичної системи [5], а математичні методи оптимізації забезпечують формалізацію критерію оптимальності й мінімізацію ризику інцидентів, пов'язаних з обчислювальною та комунікаційною інфраструктурою [6, 7]. Отже, інтеграція економічних, тарифних і технологічних факторів у розробку нових адаптивних стратегій керування компенсуючими пристроями є нагальною науково-практичною задачею для підвищення енергоефективності ГЗК [4].

На рис. 1(а–г) подано графіки споживання активної та реактивної електричної енергії і відповідні суми платежів для двох промислових підприємств (вхідні дані скореговано для збереження конфіденційності при збереженні їх пропорційності). При цьому спостерігається відносно плавне щомісячне зростання споживання: активної потужності у межах 2,1-3,7 %, реактивної – 3,5-6 %, що призвело до помітного підвищення коефіцієнта реактивності tan φ з 0,38 до 0,45. Збільшення tan φ, поряд зі змінами тарифів, спричинило зростання нарахувань за недостатню компенсацію реактивної потужності з 0,08% до майже 1 % від оплачуваних величин (еквівалентно зростанню з 750 грн до 51 000 грн у розглянутому періоді) згідно з методикою розрахунку сплати підприємством за спожиту РП. Різке підвищення сплати пов'язане з тим, що в першому півріччі 2025 року середня ціна 1 кВАр·год зросла приблизно на 280% порівняно з другим півріччям 2024 року, тоді як середня ціна активної енергії підвищилась лише на 20 % і одночасно зберігається тенденція подальшого зростання вартості реактивної енергії.

Отже, навіть помірне відносне збільшення споживання РП у поєднанні з тарифними змінами може призвести до непропорційного підвищення економічних витрат, що підкреслює доцільність впровадження заходів компенсації.

В умовах зростаючих вимог до енергоефективності актуальним є впровадження багатокритеріальної системи керування потоками реактивної потужності, що інтегрує сучасні інформаційні та автоматизовані технології. Її функціонування дозволяє оптимізувати розподіл електроенергії в режимі реального часу, знижувати навантаження на мережеві елементи, мінімізувати втрати та забезпечувати ефективний контроль обмінів реактивною потужністю між окремими ділянками системи. Це підвищує надійність електропостачання, стабільність роботи мережі та раціональність використання енергетичних ресурсів.

Енергетичні мережі промислових підприємств мають складну топологію й характеризуються значною кількістю споживачів із динамічно змінним навантаженням, тоді як підстанції виступають інтегрованими вузлами ширших енергосистем. Повноцінне моделювання таких систем ускладнюється обчислювальною складністю й обмеженою ефективністю глобальних підходів, що зумовлює доцільність локалізованого аналізу. У цьому контексті розподільчу підстанцію (РП) доцільно розглядати як окрему функціональну ланку підприємницької енергосистеми, що дозволяє підвищити точність оцінок і результативність керуючих рішень. Тому, на основі типової підстанції, виконано модельні дослідження запропонованої інтелектуальної системи керування.

При керуванні РП підстанцій з СД та конденсаторними батареями (КБ) раціонально по-перше, задіювати КБ, через те, що вони мають при компенсації менші втрати активної потужності (відповідно, 0,002-0,0045 кВт/кВАр для КБ та 0,013 кВт/кВАр для СД) [4]. Оскільки потужністю генерації КБ можливо керувати лише дискретно, тобто ступенями, то СД доцільно використовувати в моменти часу, коли компенсаційні можливості КБ вичерпані. Додатковими факторами при синтезі такої системи керування є необхідність раціонального керування СД. При наявності СД у структурі енергосистеми доцільним є

аналіз їхнього потенціалу для компенсації реактивної потужності. Для цього централізована система керування здійснює комплексний моніторинг основних технологічних параметрів СД, серед яких кількість працюючих агрегатів, температура охолоджувального повітря, температура обмоток статора та ротора (опосередковано), а також величина живильної напруги. Постійний контроль цих показників дає змогу своєчасно виявляти відхилення від нормативних режимів і запобігати перевищенню допустимих експлуатаційних меж, що безпосередньо впливає на надійність і довговічність обладнання.

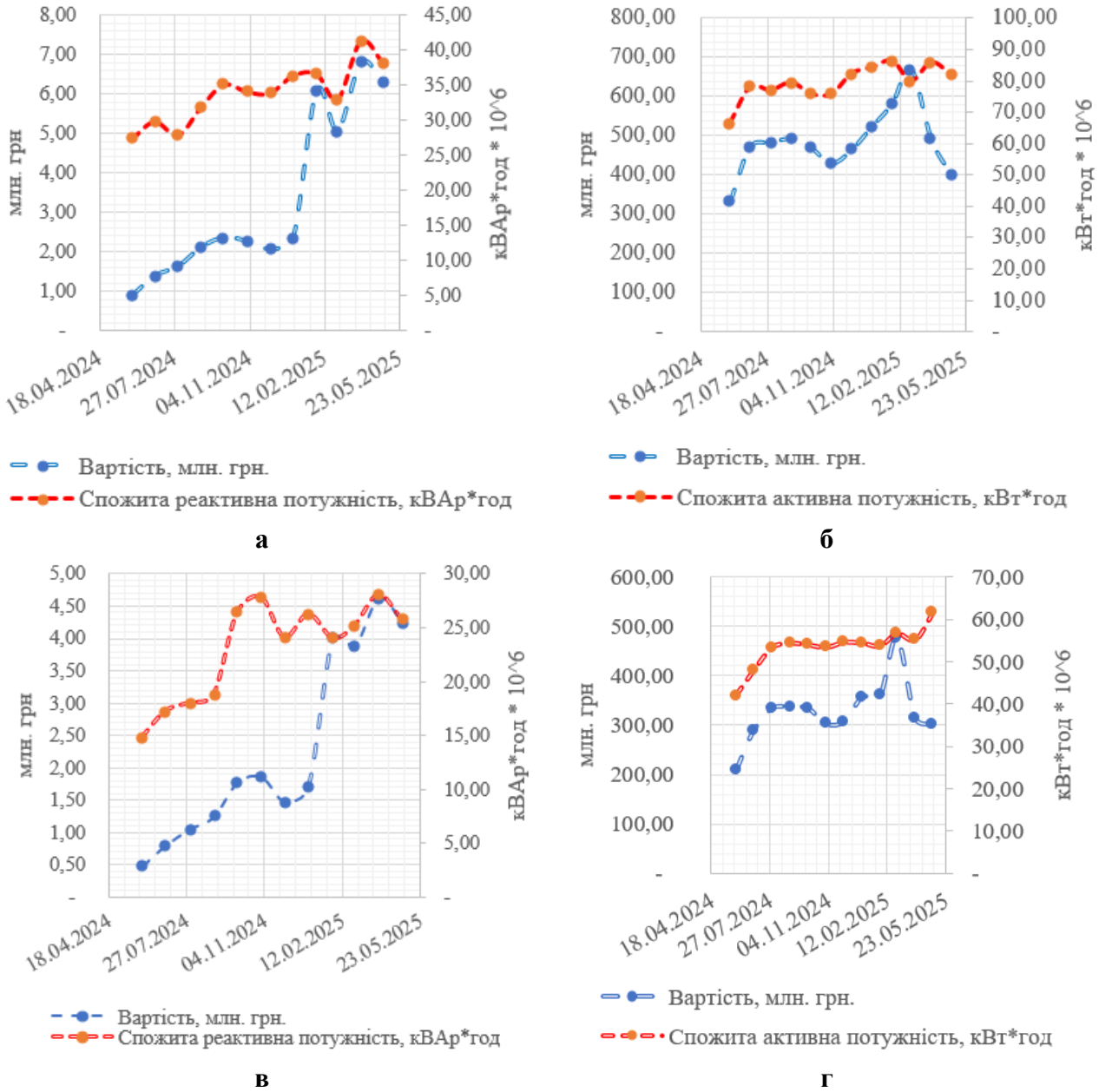


Рис. 1. **Споживання електричної енергії гірничозбагачувальними комбінатами за 2024-2025 роки:**
а – ГЗК № 1, реактивна потужність; б – ГЗК № 1; активна потужність;
в – ГЗК № 2; реактивна потужність; г – ГЗК № 2, активна потужність

Актуальна інформація про стан двигунів використовується як вхідні дані для алгоритмів оптимізації, які визначають доцільність і обсяг їхнього залучення у процес компенсації реактивної потужності. На основі цих даних реалізується оптимальний розподіл навантаження по реактивній потужності між СД, відповідно до критерію рівності їх

відносної повної потужності. Такий підхід дозволяє підвищити ефективність енергоспоживання, знизити нерівномірність режимів роботи двигунів та зменшити інтенсивність їхнього фізичного зносу. Водночас забезпечується адаптивність керування, що сприяє узгодженій роботі СД з іншими компенсуючими пристроями й підвищує загальну енергоефективність електроенергетичної підсистеми підприємства.

При цьому граничне значення відносних повних потужностей двигунів, які можна залучити у режим компенсації, визначається наступним чином [3]:

$$S_{\text{гран.}} = \sqrt{\left(\frac{U_н}{U}\right)^2 S_н^2 \left(1 + \frac{t°_{\text{рп}} - t°_{\text{г}}}{\Delta t°_{\text{пр}}}\right) - P_i^2}, \quad (1)$$

де $U_н$ – номінальна напруга двигуна, В; U – значення напруги на затискачах СД, В;
$S_н$ – повна номінальна потужність двигуна, кВА; $t^o_{\text{гр.о.п.}}$ – гранично допустима температура охолоджуючого повітря; $t^o_р$ – поточна температура охолоджуючого повітря; $\Delta t^o_{\text{гран.}}$ – гранично допустиме підвищення температури обмоток статора.

Зазначену систему можна визначити як інтелектуальну, через те, що запропонований адаптивний алгоритм полягає у здатності враховувати широкий спектр факторів, які змінюються у часі, забезпечуючи оптимізацію послідовності залучення КБ (6 кВ та 0,4 кВ) та СД (6 кВ). При цьому зберігається баланс між економічною доцільністю та технічними обмеженнями компенсаторів. Важливим критерієм є запобігання перекомпенсації (особливо в нічні часи), що реалізується як обов'язкова умова у процедурі прийняття рішень. На відміну від стандартних автоматичних регуляторів, що діють у межах вузько визначених алгоритмів, запропонований інтелектуальний алгоритм здатен підлаштовуватися до дій у нових умовах [5, 6]. Також, на відміну від традиційних алгоритмів, що базуються на фіксованих уставках або простих порівняннях з пороговими значеннями, розроблений підхід враховує динаміку навантаження, економічну доцільність впровадження компенсаційних пристроїв, а для СД – їх ряд технологічних параметрів. Зазначені дані слугують основою для оптимального розподілу навантаження між двигунами за критерієм рівності їх повної відносної потужності, що сприяє їх раціональному використанню. В свою чергу, в умовах невизначеності, коли параметри навантаження чи стан СД не можуть бути описані точними моделями, можливе використання нечіткої логіки.

Таким чином, інтелектуальність алгоритмів, закладених у модель, виражається у поєднанні адаптації, прогнозування та багатокритеріальної оптимізації, що разом формує раціональне керування процесом компенсації реактивної потужності.

У випадку СД існують ефективні сучасні інструменти для локального керування СД як компенсатора. Проте запропонована інтелектуальна система керування компенсаційними пристроями принципово відрізняється від традиційних мікропроцесорних рішень на основі автоматичного регулювання збудження (АРЗ) тим, що вона не обмежується лише локальним регулюванням параметрів окремого СД. Її концепція передбачає інтегроване управління всією сукупністю компенсуючих пристроїв, зокрема КБ та СД, у межах розподільчої підстанції (РП) або, за можливості, навіть декількох вузлів [7].

Її ключовою особливістю є адаптивність, тобто можливість підлаштування керування компенсаційними пристроями залежно від динаміки навантажень. Крім цього, передбачено координацію роботи різних компенсаторів із пріоритетом використання тих засобів, які забезпечують найнижчі втрати активної енергії при компенсації (відповідно, саме тому в першу чергу враховуються КБ). У моделі враховано обмеження по струму та нагріву обмоток СД, однак управління цими обмеженнями інтегрується у загальний оптимізаційний алгоритм, а не виконується локально.

Додатково можна зазначити, що запропонована система підходить під використання у випадках застарілого обладнання, коли відсутні АРЗ для СД, що видно на прикладі потужних приводів гірничо-збагачувальних комплексів. Використовуючи структуру, наведену в даній

роботі є можливість раціонального використання наявних СД (незалежно від того, чи нова або застаріла система їх керування) у процесі компенсації реактивної потужності.

Таким чином, запропонована централізована система є не просто розширенням функціоналу існуючих цифрових регуляторів, а вона створює багаторівневу структуру з властивостями адаптації й раціоналізації. У результаті забезпечується більш ефективне використання компенсуючих пристроїв та зменшення сумарних витрат підприємства на оплату електричної енергії. Отже, використавши вищенаведені принципи, виконаємо модельні дослідження запропонованої системи. На рис. 2 представлена модель такої системи.

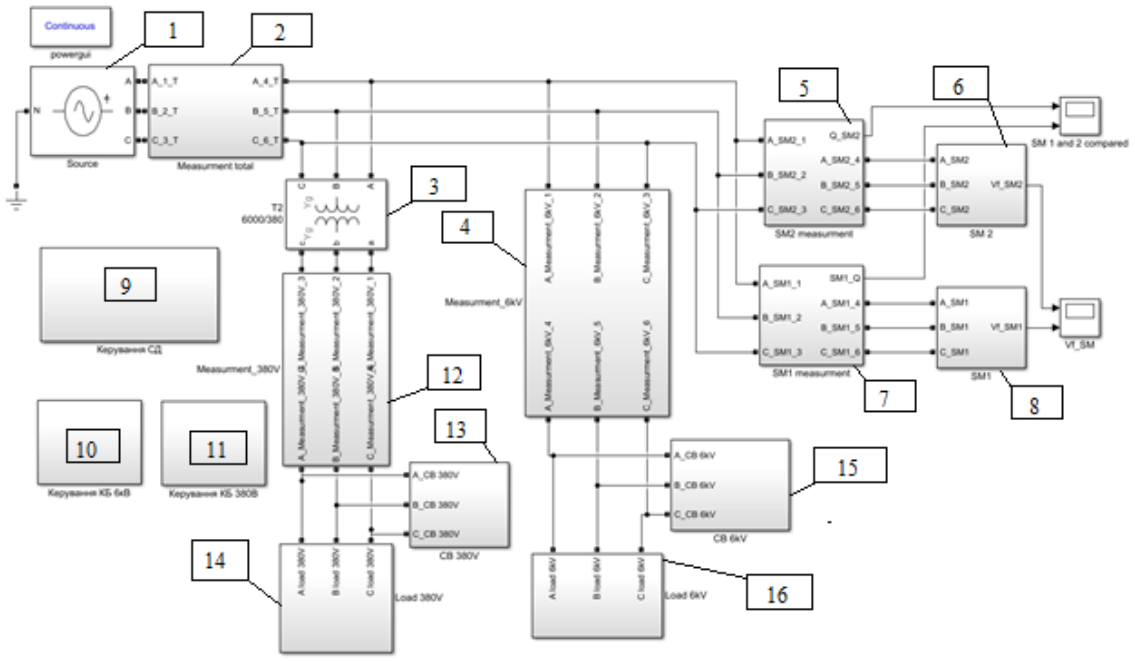
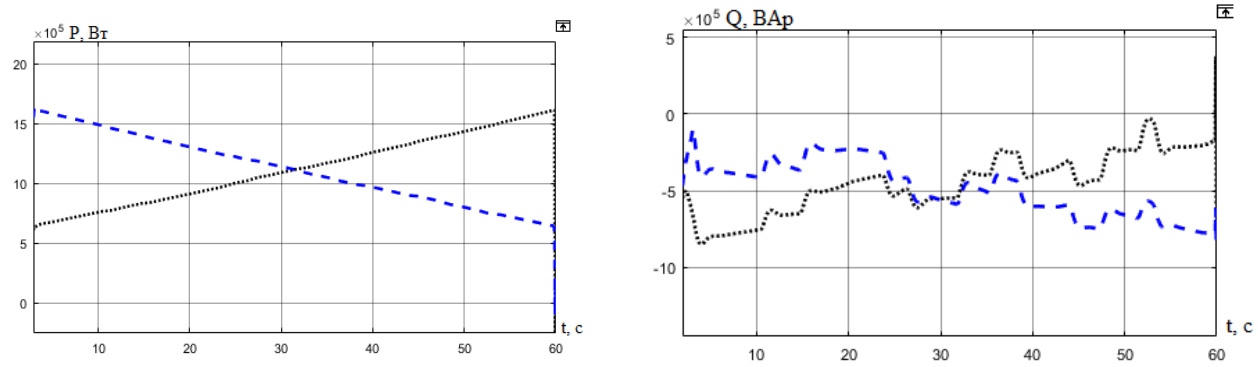


Рис. 2. **Модель інтелектуальної системи керування перетікання реактивної потужності:**
джерело 6кВ (поз.1); лічильники активної та реактивної потужності (поз.2, поз.4 та поз.12); навантаження 0,4кВ та 6кВ (поз.14 та поз.16 відповідно); конденсаторні батареї 0,4кВ та 6кВ (поз.13 та поз.15 відповідно); трансформатор 6000/380В (поз.3); підсистеми керування СД (поз.9); підсистема керування КБ 6кВ та 0,4кВ (поз.10 та поз.11відповідно); СД (поз. 6, поз.8); лічильники активної та реактивної потужності СД (поз. 5, поз. 7)

Відповідно, результати моделювання показані на рис. 3 та рис. 4.

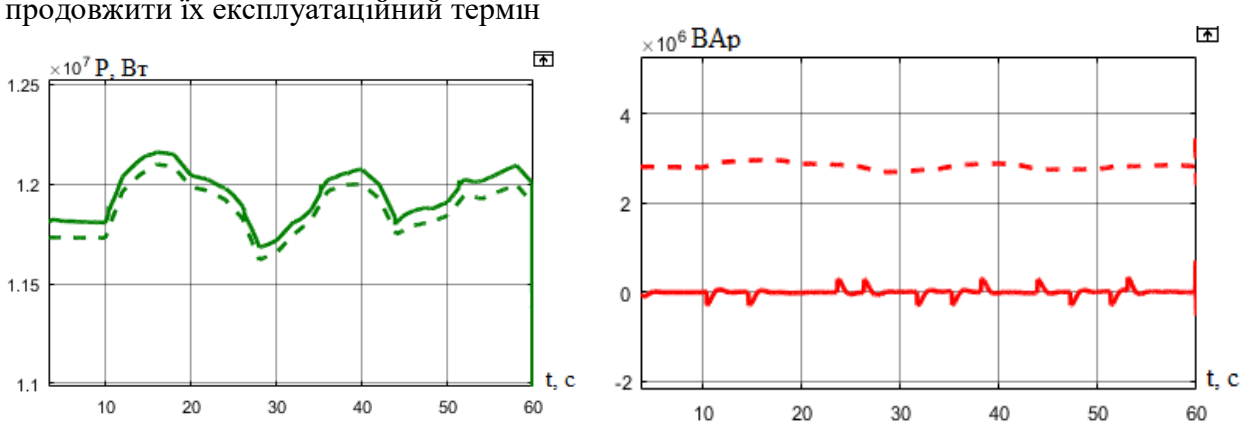


а **б**

Рис. 3. **Показники споживання активної та реактивної потужності синхронними двигунами (синя пунктирна лінія – СД № 1; чорна точкова лінія – СД № 2): а – активна потужність; б – реактивна потужність**

Як можна побачити з рис. 3, система забезпечує рівномірний розподіл компенсаційного навантаження по відносно рівній повній потужності між СД шляхом регулювання струму збудження СД, враховуючи їх фактичне завантаження. На рис. 3 можна побачити, що зміна відбувається, враховуюче поточне активне завантаження СД №1 та №2. (для СД №1 (а), зміна завантаження склала з 65 до 35 %; для СД №2 (б), зміна завантаження склала з 35 до 65%). Це свідчить про здатність системи адаптувати режими роботи СД відповідно до їх завантаження.

Таким чином забезпечується раціоналізація роботи СД, що потенційно дозволить продовжити їх експлуатаційний термін



а **б**

Рис. 4. **Рівні споживання активної та реактивної потужності на вводі системи (штрихова лінія – до використання компенсаційних пристроїв; суцільна лінія – після використання компенсаційних пристроїв):**
а – активна потужність; б – реактивна потужність

Як можна побачити з рис. 4 (а, б), система ефективно знижує загальне фіксоване значення реактивної потужності на вводі системи. Також спостерігається, що залучення СД і КБ до компенсації супроводжується незначним підвищенням споживання активної потужності (~0,34%). Однак додаткові нарахування за активну енергію в такому випадку будуть приблизно в 3 рази менші, ніж сплата за реактивну потужність до впровадження компенсуючих пристроїв.

У підсумку можна зазначити, що неможливо забезпечити ідеальне «нуль-перетікання» через наявність у ній двох потужних синхронних двигунів та двоступеневих КБ для шин 6 кВ і 0,4 кВ. У такому конфігураційному наборі метою керування є мінімізація балансового значення реактивної потужності на вводі системи, тобто компенсація наявними засобами [4].

Висновки. В результаті дослідження встановлено, що інтелектуальна система керування компенсаційними пристроями дозволяє раціонально використовувати компенсуючі пристрої, адаптивно координуючи при цьому роботу КБ і СД з урахуванням їхніх технологічних параметрів, дозволяє значно зменшити балансового значення реактивної потужності на вводі системи, знизити фінансове навантаження на підприємство та оптимізувати експлуатаційні режими обладнання.

Отже, розроблена модель енергоефективної інтелектуальної адаптивної системи компенсаційними пристроями для підвищення електроенергетичної ефективності (коефіцієнта потужності) живлячих підстанцій на основі інтегрованого використання синхронних двигунів і конденсаторних батарей із застосуванням інтелектуальних алгоритмів раціоналізації їх використання, забезпечує мінімізацію електричних втрат та підвищення техніко-економічної ефективності електроенергетичної системи підприємства.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бурбело М., Слободян Р. «Стратегія керування джерелами реактивної потужності у розподільних електричних мережах для оптимізації втрат електроенергії». *Вісник*

Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. Кременчуг: КрНУ. 2024; 1: 209–214. DOI: https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.1.28.

2. «Про затвердження Методики обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії: Наказ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 06.02.2018 № 87». *Офіційний вісник України*. 2018; 33: 172.

3. «Спосіб підвищення енергоефективності технічних систем технологічних агрегатів з синхронними приводами: пат. 157230 Україна: u 2024 01359; заявл. 14.03.2024; опубл. 19.09.2024, Бюл. № 38». – URL: https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1818445.

4. Шерстньов Ю. В., Осадчук Ю. Г. «Розробка алгоритму оптимізації рівнів споживання електричної енергії підстанцій гірничо-збагачувального комбінату за допомогою інтелектуальних систем». *Вісник Криворізького Національного Університету, Збірник наукових праць*. 2024; 58: 116–128. DOI: https://doi.org/10.31721/2306-5451-2024-1-58.

5. Mohammed B., Samer S., Yuting T., Joydeep M. "Reactive power compensation for reliability improvement of power systems". *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*. 2016. p. 1–5. DOI: https://doi.org/10.1109/TDC.2016.7519910.

6. Wei N., Li Ch., Peng X., Zeng F., Lu X. „Conventional models and artificial intelligence-based models for energy consumption forecasting: A review". *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2019; 181: 106187. doi:10.1016/j.petrol.2019.106187

7. Li L., Qin J., Hu H., Zhang Q., Luo L. "Optimized operational approach for multi-type reactive power compensation to enhance the grid integration strength of newenergy clusters". *Front, Energy Res.* 2024; Vol. 11:1342770. DOI: https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1342770.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.79
UDC 621.31

Intelligent control system for compensation devices in the electric power system of a mining and processing plant

Yuriy V. Sherstnov
Postgraduate Student of the Department of Electrical Engineering
ORCID: https://orcid.org/0009-0003-3210-5552; yurasw1@gmail.com
[1)] Kryvyi Rih National University, 11, Vitaly Matusevich Str. Kryvyi Rih, 50027, Ukraine

ABSTRACT

Modern mineral processing plants are characterized by high energy intensity of technological processes and numerous electric drives with nonlinear load characteristics. At the same time, industrial facilities are required to maintain appropriate power quality within their internal supply systems. An essential task in this context is effective management of reactive power flows, which reduces electrical energy losses, optimizes equipment operating modes, and improves the reliability of all links in the plant's power system. Conventional compensation systems based on static settings or local algorithms often fail to perform efficiently under variable loading and fluctuating process conditions, since they typically do not account for changing load regimes and have limited adaptive capability. This work proposes an approach to intelligent control of reactive power sources based on integration of synchronous motors and capacitor banks into a unified, centralized intelligent control system. Daily and annual electrical energy consumption data for the plant's substation consumers were analyzed to inform the design. An innovative strategy for improving energy efficiency is proposed, and optimal conditions for deploying synchronous motors and capacitor banks are identified. The model relies on the integration of modern monitoring technologies and data analysis tools, enabling adaptation to dynamic load changes and prompt adjustment of compensation system parameters. The study evaluates the developed methods' impact on system stability and on the economic feasibility of implementation. The approach is grounded in adaptive algorithms that consider load variability, power quality indices and relevant technological parameters to rationalize the compensation process. A key feature of the system is regulation based on an adaptive algorithm that provides flexible control of reactive flows under rapidly changing production conditions; this reduces unnecessary switching operations, extends equipment service life, lowers the probability of fault regimes, and increases the overall energy efficiency of the plant's power system. The obtained results demonstrate the promise of the proposed reactive power compensation solutions for enhancing production energy efficiency. Consequently, the developed intelligent control system for compensation devices can serve as a foundation for building "smart" energy subsystems at industrial enterprises, aligning with contemporary Smart Grid and power-sector digitalization trends.

Keywords: Reactive power; intelligent control; synchronous motors; capacitor banks; mineral processing plant; energy efficiency