

МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ І ОБЛАДНАННЯМ.

MONITORING, DIAGNOSTICS AND MANAGEMENT OF ENERGY PROCESSES AND EQUIPMENT

УДК 621.31

DOI 10.20535/1813-5420.2.2025.327362

Ю.В. Шерстньов¹, аспірант, ORCID 0009-0003-3210-5552

¹Криворізький Національний Університет

КЕРУВАННЯ РЕАКТИВНОЮ ПОТУЖНІСТЮ НА ОСНОВІ КІБЕРФІЗИЧНОЇ МОДЕЛІ ПІДСТАНЦІ ГІРНИЧОЗБАГАЧУВАЛЬНОГО ПІДПРИЄМСТВА

У статті представлено результати моделювання централізованої системи компенсації реактивної потужності гірничозбагачувального підприємства на основі кіберфізичної моделі у контексті ефективного управління енергоспоживанням. Проаналізовано добові та річні дані обсягів споживання електричної енергії споживачами підстанцій підприємства. Запропоновано інноваційний підхід до моніторингу та оптимізації енергетичних потоків, спрямований на зменшення втрат і 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. Отримані результати показують перспективність запропонованих рішень по компенсації реактивної потужності для підвищення енергоефективності виробництва.

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

Вступ

Енергетична ефективність є ключовим фактором у підвищенні конкурентоспроможності гірничозбагачувальних підприємств (ГЗК), які належать до найбільш енергоємних промислових об'єктів. В поточних реаліях склалася ситуація суттєвого обмеження обсягів споживання електричної потужності. Через це знижується завантаженість 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 централізованої 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 активної енергії. Обґрунтоване впровадження централізованого управління забезпечить гнучке регулювання реактивної потужності та створить умови для підвищення надійності електропостачання й ефективного використання ресурсів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз проведених досліджень свідчить про перспективність впровадження централізованих систем управління перетіканням реактивної потужності [1, 2, 3]. У роботах окремих авторів підтверджено переваги розподіленої компенсації для покращення коефіцієнта потужності в окремих вузлах електроенергетичної системи [1]. 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].

Прогнозування споживання реактивної потужності є складним через стохастичний характер її поведінки. Через це є необхідність використання системи моніторингу та контролю компенсуючими пристроями у реальному часі, або використовувати методи короткочасного прогнозування [4]. У випадку змінного навантаження, що залежить від багатьох факторів (технологічних, сезонних, тощо), прогнозування із високим рівнем точності може забезпечити і двоступеневі алгоритми [5].

Застосування інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) дозволяє більш точно керувати та відслідковувати швидкі зміни в енергетичній системі [6]. При цьому забезпечити оптимальний розв'язок задачі керування можна за допомогою математичних методів оптимізації [7] для забезпечення мінімізації вірогідності інцидентів та збоїв, пов'язаними з обчислювальною та комунікаційною інфраструктурою [8].

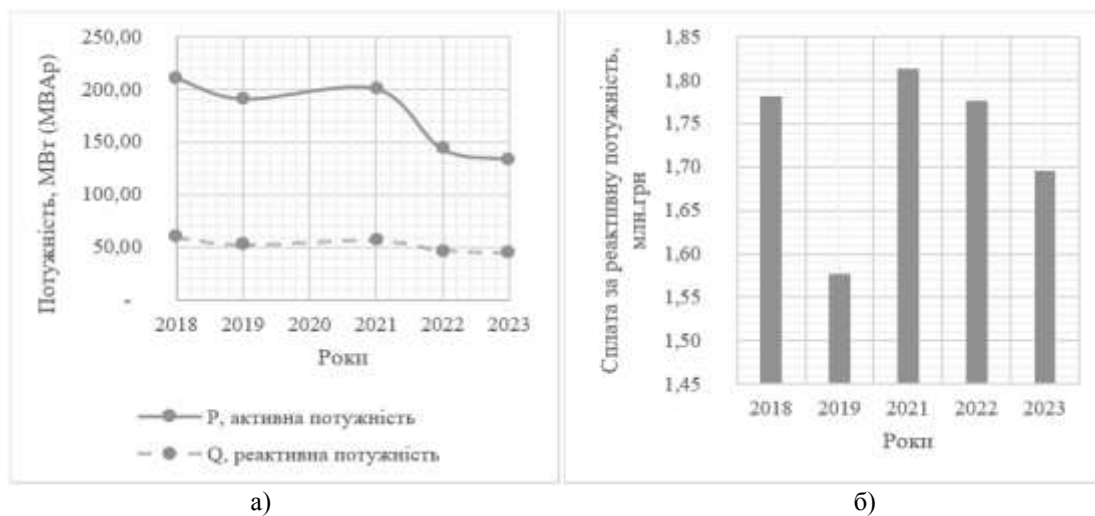
Метою дослідження є удосконалення математичної моделі процесу компенсації реактивної потужності на підприємствах гірничозбагачувального комплексу з урахуванням динаміки енергоспоживання, що дозволить мінімізувати втрати електроенергії, підвищити стабільність роботи електроенергетичної системи та зменшити експлуатаційні витрати.

Завдання дослідження: проаналізувати річну та добову динаміку споживання активної та реактивної потужності для визначення раціональних рівнів компенсації; розробити модель централізованої системи моніторингу та керування компенсаційними пристроями; провести моделювання і оцінити ефективність розробленої системи.

Матеріал і результати досліджень

Аналіз річних тенденцій у графіках споживання електричної енергії є ключовим етапом у розумінні поточної ситуації. На рис. 1 зображено споживання електричної енергії споживачами та сплата за неї на ГЗП №1 підприємства N. Ситуація, коли реактивна потужність залишається сталою, створює виклики для управління енергетичними ресурсами. Зокрема, високий рівень реактивного навантаження призводить до неефективного використання трансформаторів і електродвигунів, які працюють у режимі недозавантаженості.

Також підприємство сплачує не лише за фактичний рівень спожитої реактивної потужності, але й додаткові кошти за недокомпенсацію. На даних графіках помітне суттєве зниження обсягів споживання електричної енергії за останні роки (найбільший спад спостерігався у 2022-му році, на 28,5% для активної та 17,44% для реактивної потужності споживачами ГЗП №1). При цьому через збільшення тарифів, сплата за реактивну потужність знизилася лише на 2%.



а) - споживання електричної енергії споживачами ГЗП за 2018-2023рр.; б) - сплата за реактивну потужність за 2018-2023рр.

Рисунок 1 – Статистичні дані по ГЗП №1 за різні роки

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 нерациональним по відношенню до затрачуваних розрахункових потужностей. Тому доцільним буде розглянути окрему структуру розподільної підстанції (РП), як частину енергетичної системи підприємства.

Для цього були проаналізовані схеми електричні принципи живильних мереж, і було виявлено наступне: найбільш розповсюдженим варіантом (у випадку РП дробильно-збагачувальної фабрики (ДЗФ)) є наступне: наявність асинхронних двигунів (АД) на шинах 0,4кВ та 6кВ; наявність СД на шинах 6кВ; наявність конденсаторних батарей (КБ) на шинах 0,4кВ та 6кВ.

Рівень генерації конденсаторних батарей 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 [9]. При цьому граничне значення відносних повних потужностей двигунів, які можна залучити у режим компенсації, визначається наступним чином [10]:

$$S_{\text{гран.}} = \sqrt{\left(\frac{U_{\text{н}}}{U}\right)^2 S_{\text{н}}^2 \left(1 + \frac{t_{\text{гр.о.п.}}^{\circ} - t_{\text{р}}^{\circ}}{\Delta t_{\text{гран.}}^{\circ}}\right)}, \quad (1)$$

де $U_{\text{н}}$ – номінальна напруга двигуна, В; U – значення напруги на затискачах СД, В; $S_{\text{н}}$ – повна номінальна потужність двигуна, кВА; $t_{\text{гр.о.п.}}^{\circ}$ – гранично допустима температура охолоджуючого повітря; $t_{\text{р}}^{\circ}$ – поточна температура охолоджуючого повітря; $\Delta t_{\text{гран.}}^{\circ}$ – гранично допустиме підвищення температури обмоток статора.

Централізована система керування перетіканням реактивної потужності має враховувати стохастичну природу добових коливань споживання активної та реактивної потужності. З огляду на випадковий характер цих змін, ефективна система має бути здатною швидко й точно адаптуватися до змін енергетичного навантаження в реальному часі.

Централізована система, зображена на рис. 2 побудована на основі інтелектуальної обробки даних із лічильників, розміщених на вузлових точках електромережі. Ці лічильники постійно відслідковують балансні значення перетікання реактивної потужності (для синхронних двигунів – їх технологічні параметри). Система використовує принципи адаптивного управління, що дозволяють автоматично регулювати роботу компенсуючих пристроїв відповідно до змін у споживанні енергії.

Централізована система змінює компенсуючу здатність СД №1...СД №N (регулюючи $U_{\text{зб.сд.1...}} U_{\text{зб.сд.N}}$) та переключаючи ступені КБ ($\text{КБ}_{\text{бкв}}$ та $\text{КБ}_{\text{0,4кв}}$). Рациональніше використовувати насамперед конденсаторні батареї (КБ), оскільки їхні втрати становлять у середньому 0,002–0,0045 кВт/кВАр, тоді як для синхронних двигунів (СД) цей показник сягає 0,013 кВт/кВАр. За наявності синхронних двигунів оцінюється їх доцільність у процесі компенсації реактивної потужності. Центрالیзована система моніторить кількість СД, температуру охолоджуючого повітря, температуру обмоток статора і ротора, а також живильну напругу, не допускаючи перевищення граничних значень цих параметрів. Зібрані дані використовуються для оптимального регулювання СД, що забезпечує рівномірне завантаження по відносній повній потужності кожного двигуна [10]. В результаті такого контролю загальне балансне значення $Q_{\text{з.б.}}$ (МВАр·год) в ідеалі повинно дорівнювати нулю, що означає те, що система не генерує та не споживає реактивну потужність з мережі.

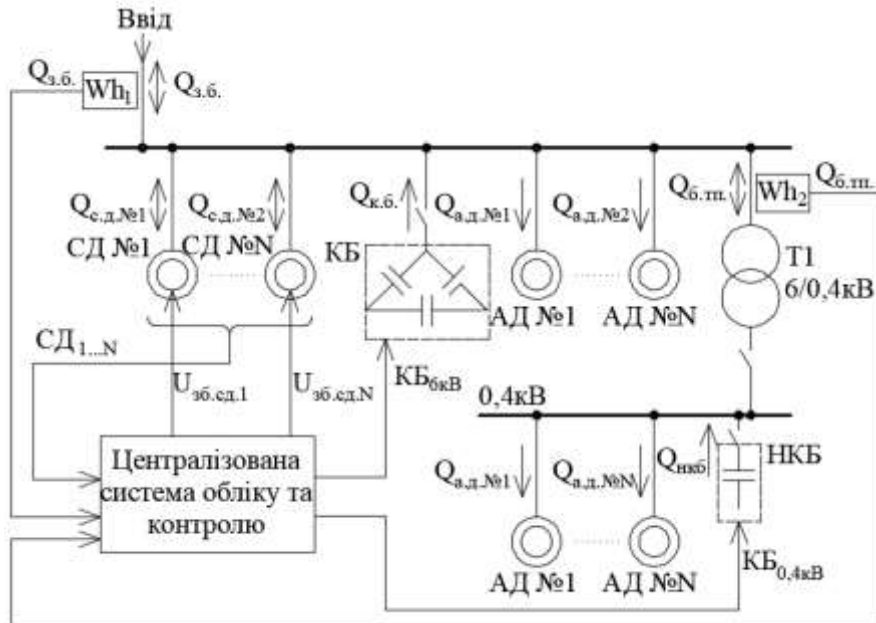
Інтеграція автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУТП) у електроенергетичну систему є ключовим елементом для забезпечення безперебійного та ефективного функціонування споживачами промислових об'єктів. Кіберфізичні системи (КФС) поєднують комп'ютерні алгоритми з фізичними процесами. Зокрема, на підстанціях ці системи виконують моніторинг, управління, аналіз і оптимізацію роботи електрообладнання, що дає змогу своєчасно виявляти й запобігати можливим збоям, а також прогнозувати стан обладнання. Тому доцільно розглядати систему з точки зору КФС.

Попри наведені плюси, така система має певні недоліки: наявність дорогого сучасного обладнання та складного налаштування алгоритмів керування компенсуючими пристроями. Високовартісне обладнання може бути економічно обґрунтованим за рахунок скорочення періоду окупності, проте це потребує подальших досліджень. Складні алгоритми можна значно спростити, зберігши точність та швидкодію за допомогою, наприклад використання нечіткої логіки у централізованій системі обліку та контролю [11]. Враховуючи вказані умови, можна скласти граф даної системи, що зображено на рис. 3. Даний граф відображає ланки перетікання реактивної потужності, її моніторингу та контролю.

В табл. 1 представлена матриця суміжності такого графа.

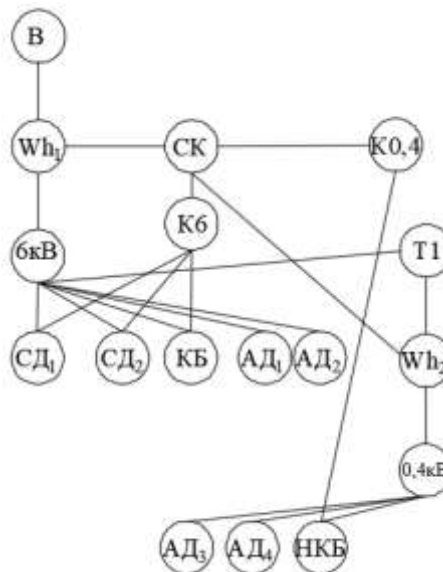
Аналітично, результуючу матрицю інцидентності $\Lambda = \|\lambda_{ij}\|$ (де $i, j = 1, \dots, 17$ – номери блоків; $\lambda_{ij} = 1$, якщо i -й блок є початком ребра, закінченням якого є блок j ; $\lambda_{ij} = 0$, якщо $i = j$ або i -й блок не є початком ребра, закінченням котрого є блок j ; номери строк відповідають позначенню симплексів) сформовано в табл. 2.

Отримані матриця суміжності та матриця інцидентності є невід'ємними компонентами топологічного аналізу структури підстанції. Симпліціальний аналіз застосовує ці матриці для створення симпліціальних комплексів — впорядкованих наборів симплексів. Ці комплекси слугують основою для дослідження топологічних характеристик мережі та оцінки змін її структури при варіюванні параметрів вузлів або зв'язків.



$Q_{з.б.}$ - загальний баланс РП; $Q_{с.д.№1} \dots Q_{с.д.№N}$ - споживання (генерація) РП синхронними двигунами; $Q_{к.б.}$ - генерація РП конденсаторними батареями 6кВ; $Q_{а.д.№1} \dots Q_{а.д.№N}$ - споживання РП асинхронними двигунами; $Q_{б.тп.}$ - баланс РП 0,4кВ; $Q_{нкб.}$ - генерація РП конденсаторними батареями 0,4кВ; $СД_{1 \dots N}$ - дані про технологічні параметри синхронних двигунів; $U_{зб.сд.1} \dots U_{зб.сд.N}$ - напруга збудження синхронних двигунів; $КБ_{0,4кВ}$ ($КБ_{6кВ}$) - контроль ступенів конденсаторних батарей.

Рисунок 2 – Централізована система обліку та контролю перетоків реактивної потужності



$В$ - ввід; Wh_1, Wh_2 - лічильники; $6кВ$ - шини 6кВ; $СК$ - система контролю; $К6$ - контроль компенсаторів 6кВ; $К0,4$ - контроль компенсаторів 0,4кВ; $КБ$ - конденсаторні батареї; $АД_1, АД_2, АД_3, АД_4$ - асинхронні двигуни; $Т1$ - трансформатор 6/0,4кВ; $НКБ$ - низьковольтні конденсаторні батареї; $СД_1, СД_2$ - синхронні двигуни; .

Рисунок 3 – Граф підстанції та системи контролю перетіканням реактивної потужності

Для системного дослідження та виявлення спільності завдань управління окремими стадіями збагачення застосуємо технологічну схему і методологію декомпозиції. Важливими залишаються питання достовірності результатів та ідентифікації ключових концептів і зв'язків системи. Для вирішення цих питань доцільно використати симпліціальний аналіз, який застосуємо для структури моделі підстанції гірничозбагачувального комбінату.

Таблиця 1 – матриця суміжності графа підстанції та системи контролю перетіканням реактивної потужності

	В	Wh1	6кВ	СД ₁	СД ₂	СК	К6	КБ	АД ₁	АД ₂	К0,4	Т1	Wh ₂	0,4кВ	АД ₃	АД ₄	НКБ
В	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Wh1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6кВ	0	1	0	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0
СД ₁	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
СД ₂	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
СК	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
К6	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
КБ	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
АД ₁	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
АД ₂	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
К0,4	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Т1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Wh ₂	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
0,4кВ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1
АД ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
АД ₄	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
НКБ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0

Таблиця 2 – матриця інцидентності графа підстанції та системи контролю перетоками реактивної потужності

	В	Wh1	6кВ	СД ₁	СД ₂	СК	К6	КБ	АД ₁	АД ₂	К0,4	Т1	Wh ₂	0,4кВ	АД ₃	АД ₄	НКБ
(В,Wh ₁)	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(Wh ₁ ,6кВ)	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(Wh ₁ ,СК)	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(6кВ,СД ₁)	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(6кВ,СД ₂)	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(6кВ,КБ)	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(6кВ,АД ₁)	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
(6кВ,АД ₂)	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
(6кВ,Т1)	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
(СК,К6)	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(СК,Wh ₂)	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
(СК,К0,4)	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
(К0,4,НКБ)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
(К6, СД ₁)	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(К6, СД ₂)	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(К6,КБ)	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(Т1,Wh ₂)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
(Wh ₂ ,0,4кВ)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
(0,4кВ,АД ₃)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
(0,4кВ,АД ₄)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
(0,4кВ,НКБ)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1

На основі показника $R_k \in \mathfrak{R}$ оцінюється структурна збитковість матриці Λ :

$$R_k = \left[\sum_{i=1}^{17} \sum_{j=1}^{21} \lambda_{ij} \right] \frac{1}{16} - 1 = \frac{42}{16} - 1 \approx 1,625. \quad (2)$$

Оскільки $R_k=1,69>0$, то система є зв'язною (без обривів) та має збитковість (тобто потенційно надійна). Різні значення максимальних розмірностей симплексів формально відображаються в показнику $\varepsilon \in \mathfrak{R}$ рівномірного розподілу зв'язків орієнтованого графу, що має $m_1 \in \mathfrak{Z}$ ребер та $m_2 \in \mathfrak{Z}$ вершин:

$$\varepsilon^2 = \sum_{i=1}^{m_2} (\rho_i - \rho_c)^2 = \sum_{i=1}^{m_2} \left(\rho_i - \frac{m_1}{m_2} \right)^2, \quad (3)$$

де $\rho_{aver} \in \mathfrak{R}$ – середня ступінь вершини; $\rho_i \in \mathfrak{Z}$ – дійсна ступінь i -ї вершини.

З урахуванням даної залежності в умовах нашої моделі, отримуємо $\varepsilon=3,69$. Результат $R_k>0$ показує, що топологічна структура запропонованої централізованої системи керування перетіканням реактивної потужності наближається до повного графа, але при $\varepsilon \neq 0$ це не є явно вираженим показником.

Така структура повністю відповідає загальноприйнятій в цей час концепції автоматизації промислових виробництв та відомим актуальним стандартам [12]. Таким чином, на основі виконаного аналізу можливо створити модель та дослідити енергоефективність запропонованої системи.

Враховавши усі вищезгадані особливості, було створено модель у середовищі Simulink програмного забезпечення Matlab (версія 2017a). Дана модель зображена на рис. 4.

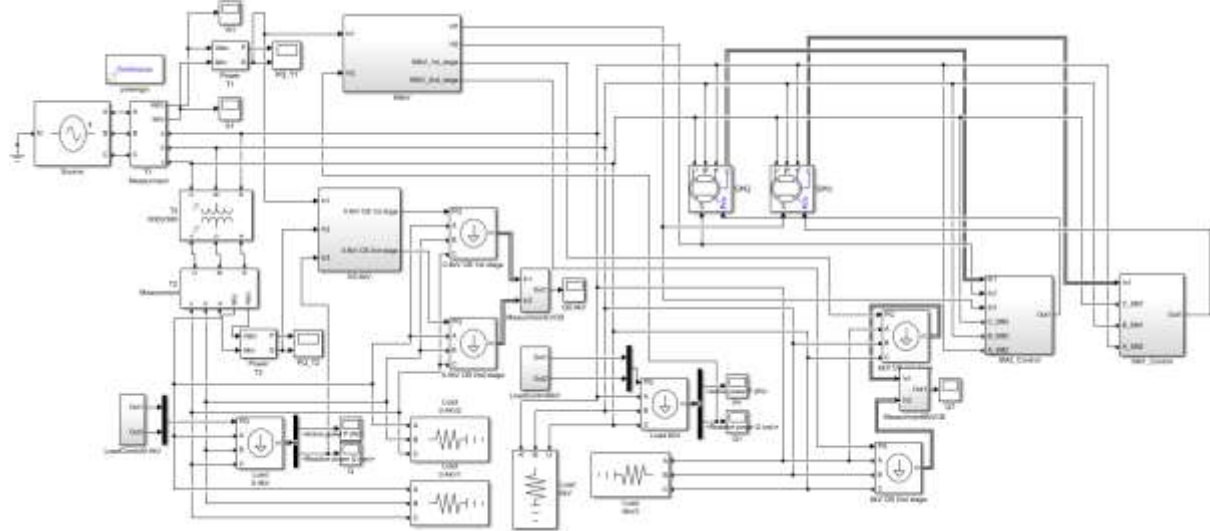


Рисунок 4 – Модель централізованої системи обліку та контролю перетіканням реактивної потужності у Simulink

Як приклад, на рис. 5 (а, б) зображені графіки споживання електричної енергії при наявності та відсутності пристроїв компенсації (пунктиром показана активна потужність, суцільною лінією – реактивна потужність). Дані взяті з лічильника Power T1 (на вході). Як можна побачити на рис. 5 (б), централізована система обліку та контролю перетіканням реактивної потужності ефективно знижує споживання РП.

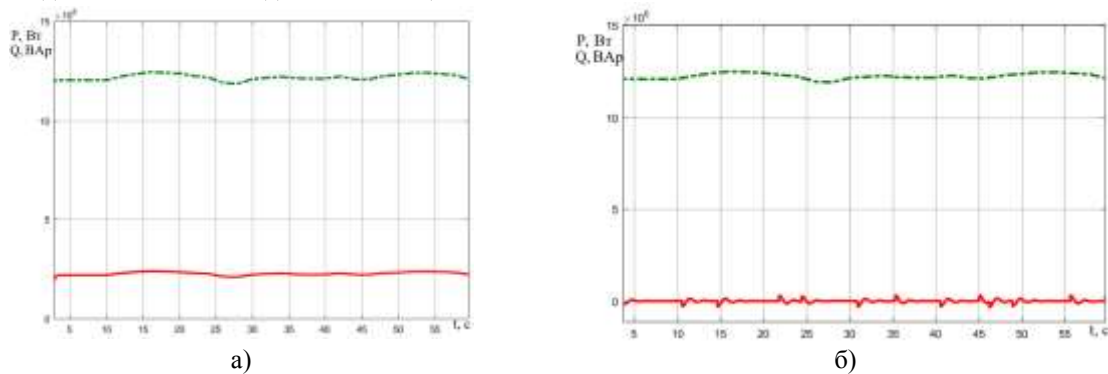
Проте повністю забезпечити «нуль-перетікання» майже неможливо, оскільки в системі наявні 2 потужні СД ($P_n=1250$ кВт кожен) та по 2 ступені конденсаторних установок для 6кВ та 0,4кВ. В даному випадку важливо враховувати перехідні процеси. По-перше, вони залежать від параметрів самого синхронного двигуна, таких як його ємність, опір та індуктивність. Ці параметри впливають на час реакції двигуна на зміни навантаження та на ефективність компенсації реактивної потужності. По-друге, перехідні процеси залежать від властивостей конденсаторних установок, таких як їх ємність, напруга та частота. Ці параметри впливають на ефективність компенсації реактивної потужності та на стабільність роботи мережі [13]. В реальних системах додатково буде впливати й характеристики комутаційної апаратури (час перемикання, опір, тощо). Таким чином, аналіз перехідних процесів у таких системах є перспективним для подальших досліджень.

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. Варто зазначити, що термін окупності та реальний економічний ефект буде залежати від багатьох чинників (спосіб реалізації, наявність чи відсутність СД та КУ, тощо), тому його варто розраховувати в індивідуальному порядку.

Висновки.

В результаті дослідження встановлено, що централізована система обліку та керування реактивною потужністю на основі інтелектуальних систем дозволяє раціонально використовувати компенсуючі

пристрої. При цьому КБ та СД використовуються адаптивно, в залежності від їх технологічних параметрів та необхідного значення РП для компенсації.



а) - Споживання електричної енергії без компенсації; б) - Споживання електричної енергії з централізованою системою обліку та контролю перетіканням реактивної потужності.

Рисунок 5 – Графіки споживання електричної енергії при наявності та відсутності пристроїв компенсації

У результаті система забезпечує максимально приближене до нульового значення споживання РП з мережі, значно знижуючи сплату підприємством за електричну енергію. Таким чином, інтеграція централізованої 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 використаної літератури

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 methond in AC mircogrids // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2023. vol. 148. 108908. DOI:10.1016/j.ijepes.2022.108908.
4. Guo-Feng Fan, Yan-Rong Liu, Hui-Zhen Wei, Yu M., Yin-He Li The new hybrid approaches to forecasting short-term electricity load, *Electric Power Systems Research*, 2022, vol. 213, 108759. <https://doi.org/10.1016/j.eprsr.2022.108759>.
5. Wang Z., Yao D., Shi Y., Fan Z., Liang Y., Wang Y., Li H. A two-stage electricity consumption forecasting method integrated hybrid algorithms and multiple factors, *Electric Power Systems Research*, 2024, vol. 234, 110600. <https://doi.org/10.1016/j.eprsr.2024.110600>.
6. Gholami M., Gholami A., Mohammadtaheri M. Cyber-physical power system reliability assessment considering multi-state independent components, *Electric Power Systems Research*, vol. 217 (2023) 109141. doi:10.1016/j.eprsr.2023.109141.
7. Wang X., McArthur S., Strachan S., Kirkwood J.D. A Data Analytic Approach to Automatic Fault Diagnosis and Prognosis for Distribution Automation, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017 1-9. doi:10.1109/TSG.2017.2707107.
8. Xiang Y., Wang L., Zhang Y. Adequacy evaluation of electric power grids considering substation cyber vulnerabilities, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 96 (2018) 368-379. doi:10.1016/j.ijepes.2017.10.004.
9. 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. – 345с. ISBN 978-966-132-050-4
10. Спосіб підвищення енергоефективності технічних систем технологічних агрегатів з синхронними приводами: пат. 157230 Україна: МПК H02J 3/18; заявл. 14.03.2024; опубл. 18.09.2024, Бюл. №38. 6 с.
11. A. Kupin, Y. Sherstnov, Y. Osadchuk, O. Savytskyi, Intellegent Control of Industrial Compensating Devices Based on the Application of Fuzzy Logic, *CEUR Workshop Proceedings*, 3403. pp. 218-230.
12. 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.
13. Mohammed B., Samer S., Yuting T., Joydeep M. Reactive power compensation for reliability improvement of power systems. 2016 DOI: 10.1109/TDC.2016.7519910

REACTIVE POWER CONTROL BASED ON A CYBER-PHYSICAL MODEL OF A MINING AND PROCESSING PLANT SUBSTATION

The article presents the results of modeling a centralized reactive power compensation system of a mining and processing enterprise based on a cyber-physical model in the context of effective energy consumption management. Daily and annual data on the volume of electricity consumption by consumers of the enterprise's substations are analyzed. An innovative approach to monitoring and optimizing energy flows is proposed, aimed at reducing losses and improving energy efficiency. Optimal conditions for using synchronous motors and capacitor banks are established. The model is based on the integration of modern monitoring and data analysis technologies, which allows adapting to dynamic load changes and promptly adjusting the parameters of the compensation system. The study assesses the impact of the developed methods on the stability of the enterprise's power system and the economic component of implementing the proposed solutions. The results obtained show the prospects of the proposed solutions for reactive power compensation to increase the energy efficiency of production.

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

References

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. Guo-Feng Fan, Yan-Rong Liu, Hui-Zhen Wei, Yu M., Yin-He Li The new hybrid approaches to forecasting short-term electricity load, *Electric Power Systems Research*, 2022, vol. 213, 108759. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108759>.
5. Wang Z., Yao D., Shi Y., Fan Z., Liang Y., Wang Y., Li H. A two-stage electricity consumption forecasting method integrated hybrid algorithms and multiple factors, *Electric Power Systems Research*, 2024, vol. 234, 110600. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110600>.
6. Gholami M., Gholami A., Mohammadtaheri M. Cyber-physical power system reliability assessment considering multi-state independent components, *Electric Power Systems Research*, vol. 217 (2023) 109141. doi:10.1016/j.epsr.2023.109141.
7. Wang X., McArthur S., Strachan S., Kirkwood J.D. A Data Analytic Approach to Automatic Fault Diagnosis and Prognosis for Distribution Automation, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017 1-9. doi:10.1109/TSG.2017.2707107.
8. Xiang Y., Wang L., Zhang Y. Adequacy evaluation of electric power grids considering substation cyber vulnerabilities, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 96 (2018) 368-379. doi:10.1016/j.ijepes.2017.10.004.
9. Osadchuk Y.G., Uchitel A.D., Zhukov S.A. and others. 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. – 345p. ISBN 978-966-132-050-4
10. Method for increasing the energy efficiency of technical systems of technological units with synchronous drives: pat. 157230 Ukraine: MPK H02J 3/18; appl. 03/14/2024; publ. 09/18/2024, Bull. No. 38. 6 p.
11. A. Kupin, Y. Sherstnov, Y. Osadchuk, O. Savytskyi, Intelligent Control of Industrial Compensating Devices Based on the Application of Fuzzy Logic, *CEUR Workshop Proceedings*, 3403. pp. 218-230.
12. DSTU EN 62264-1:2019. Integration of enterprise and production control systems. Part 1. Models and terminology. [Valid from 2019-09-01]. Official edition. Kyiv: State Enterprise "UkrNDNTs", 2019. 77 p.
13. Mohammed B., Samer S., Yuting T., Joydeep M. Reactive power compensation for reliability improvement of power systems. 2016 DOI: 10.1109/TDC.2016.7519910

Надійшла: 10.03.2025

Received: 10.03.2025