

2. Жихар Г. И. Котельные установки тепловых электростанций: учеб. пособие. – Минск : Вышэйшая школа, 2015. – 523 с.
3. Машины и аппараты химических производств: Учебное пособие для вузов/ А.С.Тимонин, Б.Г.Балдин, В.Я. Борщев, Ю.И. Гусев и др. / Под общей редакцией А.С.Тимонина.-Калуга: Издательство Н.Ф.Бочкаревой, 2008.- 872с.
4. Ніколаєнко К. В. Технологія сухого збагачення техногенної сировини у вигляді некондиційних гематитових руд, для отримання з них концентрату з вмістом заліза не менше 62,0% / К. В. Ніколаєнко, С. О. Червоний, П. К. Ніколаєнко // Збагачення корисних копалин: науково-технічний збірник. – Дніпро, 2016. – Вип. 63 (104).-С.65-68
5. Олійник Т.А. Перспективи розвитку технологій збагачення залізних руд // Збагачення корисних копалин, 2018. - Вип. 69(110).-С.32-44
6. Рагозина Н.М., Макаренко Д.А., Четвертаков Г.В. Переработка и утилизация дисперсных материалов и твердых отходов.-М.:Альфа-М, 2013.-464 с.
7. Сиденко П.М. Измельчение в химической промышленности.- М: "Химия", 1977.-368 с.
8. Смышляев Г.К. Воздушная классификация в технологии переработки полезных ископаемых.-М.: Изд-во «Недра», 1969.- 101 с.
9. Техніка та технологія збагачення корисних копалин: [навч. посібник]. Ч. 2 : Основні процеси / В. С. Білецький, Т. А. Олійник, В. О. Смирнов, Л. В. Скляр. – Кривий Ріг : ФОРМ Чернявський Д.О., 2019. – 212 с.
10. Шарапов Р.Р. Совершенствование процесса разделения в воздушном центробежном сепараторе: дисерт. на соискание учен. степ. канд. техн. наук по спец 05.02.13-Машины, агрегаты и процессы (строительство и ЖКХ). – Белгород, БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. – 158 с.
11. Ivan V. Klumpar, Fred N. Currier, Terry A. Ring. Air Classifiers // Chemical Engineering, 1986.- march, 3.- pp.77-92.
12. Kaiser F. Der Zickzack-Sichter – ein Windsichter nach neuen Prinzip // Symposium Zerkleinern Chemie GmbH.- Weinheim, 1963.-pp.587-605
13. Shapiro M., Galperin V. Air classification of solid particles: a review // Chemical Engineering and Processing, 2005.- vol. 44.- pp. 279–285.

Рукопис подано до редакції 20.03.24

УДК 621.311

Ю.В. ШЕРСТНЬОВ, аспірант, Ю.Г. ОСАДЧУК, канд. техн. наук, доц.
Криворізький національний університет

РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ОПТИМІЗАЦІЇ РІВНІВ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ПІДСТАНЦІЙ ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНОГО КОМБІНАТУ ЗА ДОПОМОГОЮ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ

Мета роботи. Розробити алгоритм компенсації реактивної потужності підстанції для зменшення її впливу на електромережу. Передбачається встановлення компенсуючих пристроїв і за допомогою розробленого алгоритму оптимізувати режими їх комутацію. Це дозволить знизити витрати на енергоспоживання, збільшити ефективність та надійність роботи електромережі.

Методи досліджень. Проведено аналіз добових рівнів споживання електричної енергії споживачами підстанції за літній та зимовий місяці, проаналізовано рівні навантаження синхронних двигунів. За допомогою теоретичного аналізу та узагальнення результатів досліджень за стандартними та новими методиками розроблено алгоритм роботи системи компенсації та складені нечіткі правила для неї. Виконано моделювання інтелектуальної системи керування споживачами електричної енергії (ФКП та СД).

Наукова новизна. Виконано моделювання системи нечіткого керування, із використанням реальних даних про рівні споживання електричної енергії споживачами підстанції гірничо-збагачувального комбінату. Запропонована система дозволяє враховувати необхідні показники для оптимізації рівнів реактивної потужності для досягнення високих показників енергетичної ефективності.

Практична значимість. Споживачі електроенергії підстанцій гірничо-металургійного комплексу часто мають нелінійні характеристики навантаження. Наявність напівпровідникових перетворювачів призводить до погіршення якості живлення через наявність вищих гармонійних складових напруги і струму [1, 2], підвищується сплата підприємством за електричну енергію [15]. Таким чином, оператор мережі змушений впроваджувати заходи з компенсації реактивної потужності [8, 9]. Але системи керування, із за невизначеності характеру навантаження та збурень, можливості перекомпенсації, потребують більш складних підходів по реалізації на етапі проектування але простіших дій в подальшій експлуатації. Таке керування може здійснювати система на базі нечіткої логіки.

Результати. На прикладі добового споживання електричної енергії наведено результати комп'ютерного моделювання процесу компенсації реактивної потужності на прикладі реальних показників споживання електричної енергії потужних підстанцій гірничо-збагачувального комбінату. Проведено аналіз ефективності використання принципу нечіткого керування. Для тестування авторами були використані експериментальні дані за січень та чер-

вень 2019 року. Розроблено алгоритм роботи компенсуючими пристроями для регулювання реактивної потужності підстанцій на базі нечіткої логіки.

Ключові слова: гірничо-збагачувальні комбінати, мережі живлення, якість електроенергії, енергоефективність, синхронні двигуни, алгоритм, нечітка логіка.

doi: 10.31721/2306-5451-2024-1-58-116-124

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Традиційно найбільш поширеними інструментами, що використовуються для компенсації реактивної потужності, є конденсаторні установки (КУ). Для цього також можуть використовуватися системи статичних компенсаторів, тиристорні статичні компенсатори і синхронні двигуни. Незважаючи на те, що КУ економічно вигідні, досягти повної компенсації реактивної потужності з ними є досить складним завданням. Це пояснюється тим, що їх значення генерованої реактивної потужності змінюється ступінчасто. Інші інструменти, вихідна реактивна потужність яких повністю контролюється, є дорогими рішеннями. Проте синхронні двигуни (СД) мають ряд певних енергетичних та механічних характеристик, через що вони є невід'ємною частиною балансу підприємства. Тому підприємствам, що мають у активі підстанцій синхронні двигуни (СД), також рекомендують за можливістю впровадити їх у процес компенсації. Отже, виходячи з вищесказаного, раціональним буде використання переваг ФКУ та СД для компенсації реактивної потужності.

Аналіз досліджень і публікацій. Роботи авторів [1-3] переконливо довели, що підвищити енергетичну ефективність та знизити плату підприємства є можливим за допомогою впровадження автоматичного алгоритму керування. Пропонується реалізація процесу визначення енергоефективного керування з паралельним використанням КУ та СД. Незважаючи на наявність досить великої кількості досліджень у цій галузі, низка питань потребує постійного уточнення та адаптації до умов конкретного підприємства [2, 3].

Постановка задачі. Для зменшення впливу реактивної потужності на електромережу пропонується розробити алгоритм компенсації реактивної потужності. Цей алгоритм передбачає встановлення компенсаторів реактивної потужності. Застосування алгоритму компенсації реактивної потужності дозволяє знизити витрати на енергоспоживання, збільшити ефективність та надійність роботи електромережі, зменшити ризик виникнення перенапруги та перенавантаження обладнання, а також зменшити втрати енергії в мережі.

Автоматичні контролери реактивної потужності і контролери, побудовані на базі нечіткої логіки, можна використовувати для керування процесом компенсації реактивної потужності. Однак, вони мають деякі відмінності у використанні та принципах роботи.

Нечіткі контролери використовують нечітку логіку для керування процесом компенсації реактивної потужності. Нечіткі контролери дозволяють враховувати більш широкий спектр факторів, які впливають на процес компенсації, таких як стан мережі, рівень гармонік, нестабільність електропостачання тощо. Це забезпечує більш гнучке та ефективне управління компенсацією реактивної потужності.

Сучасний рівень розвитку контролерів дозволяє легко відстежувати усі необхідні параметри. Складність налаштування може стати перевагою у вигляді більш точного процесу керування компенсацією. Отже, принципи нечіткого керування можуть бути використані для автоматичної регуляції компенсації реактивної потужності конденсаторними установками, що дозволяє забезпечити більш точну і ефективну компенсацію.

Викладення матеріалу та результати. Для визначення поточного стану енергоспоживання на підстанціях ПрАТ «ПівнГЗК» був проведений півгодинний добовий аналіз енергоспоживання активної та реактивної потужностей за січень та червень 2019 року. Підстанції включають в себе потужних споживачів, які впливають на показники якості споживання електричної енергії. З метою визначення можливостей впливу цих споживачів на якість електроенергії і робиться цей короткий статистичний аналіз.

Відповідно до порядку розробки рішення до існуючої проблеми, на рис. 1 зображено відстеження рівнів споживання реактивної потужності на підстанції ГППІ протягом місяця (за січень та червень).

Як можна побачити з рис. 1, протягом місяця відбуваються певні коливання у рівнях споживання реактивної потужності. Так, за січень відбулися коливання на рівні +36% та -32% від середнього значення, а за червень +28% та -29% відповідно. Хоча різниця між днями може бути

значною, проте можна відслідкувати певну тенденцію: від початку доби до середини дня рівень споживання зростає, а потім знижується.

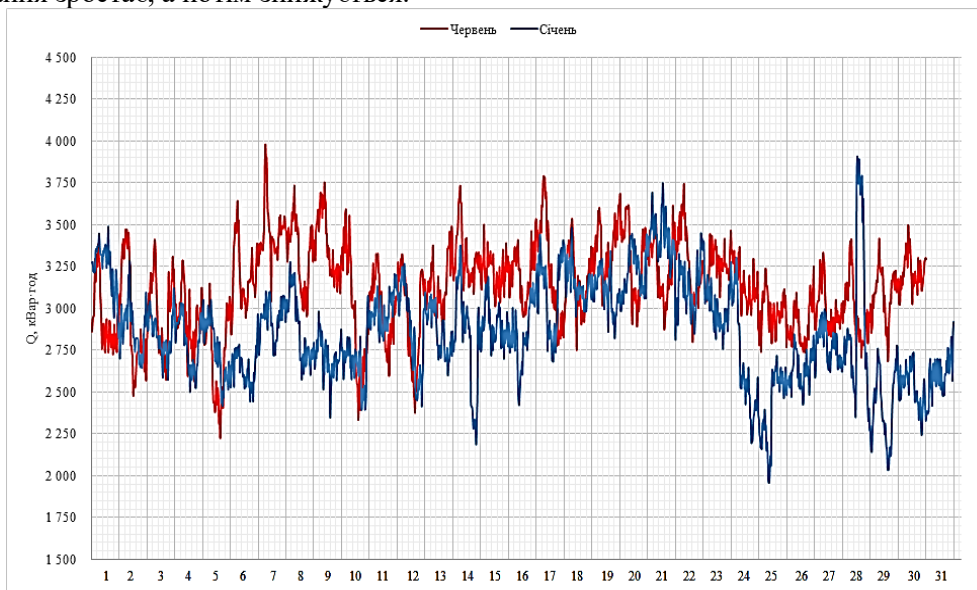


Рис. 1. Споживання реактивної потужності на підстанції ГПП1 підприємства ПрАТ «ПівніГЗК». Червень та січень 2019-го року

Проаналізувавши дані за зимовий та літній місяць було визначено необхідну «базову ступень» компенсаційною здатністю 2800 кВАр·год. Середній рівень споживання реактивної потужності нижче за цю величину. Відключення «базової» ступені відбувається лише у випадку відключень потужних споживачів (наприклад, однієї чи двох ліній споживання РЗФ1). Далі було розраховано споживання реактивної потужності без урахуванням базової ступені. Для визначення раціональних потужностей конденсаторних установок був складений закон нормального розподілу рис.2. На графіку можна побачити, що максимум для січня відповідає 2900 кВАр·год, найбільша спільна точка – біля 3000 кВАр·год, для червня – приблизно 3100 кВАр·год. Таким чином, можна визначити рівні споживання реактивної потужності в якості вхідних параметрів для нечіткого контролера.

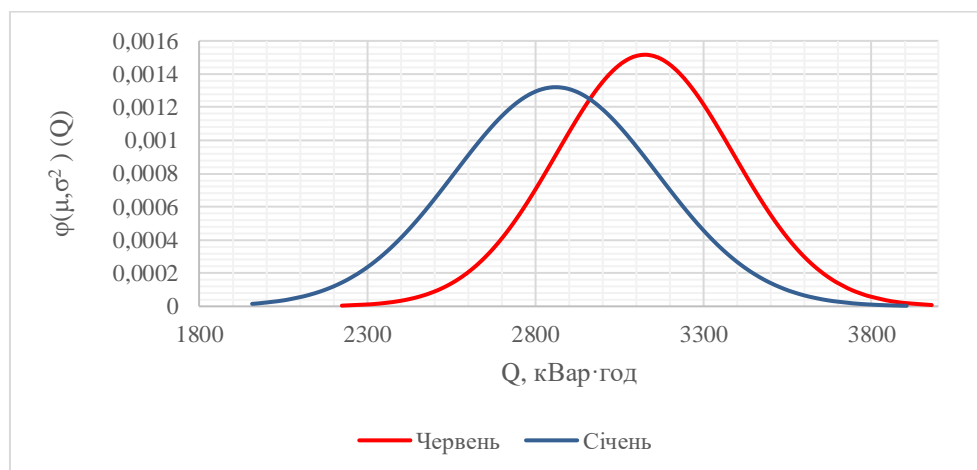


Рис. 2. Графік нормального розподілу споживання реактивної потужності на підстанції ГПП1 підприємства ПрАТ «ПівніГЗК». Червень та січень 2019-го року

Аналогічним чином на базі нечіткої логіки можна включити в процес компенсації і синхронні двигуни. Контроль струму збудження є одним з методів керування потужністю синхронного двигуна і використовується для забезпечення необхідного коефіцієнта потужності та ефективної роботи двигуна.

Відповідно до (1) можна визначити граничне значення повних потужностей двигунів, які беруть участь у режимі компенсації реактивної потужності

$$S_{crit} = \sqrt{\left(\frac{U_H}{U}\right)^2 S_H^2 \left(1 + \frac{t_{cr}^{\circ} - t_r^{\circ}}{\Delta t_{cr}^{\circ}}\right)}, \quad (1)$$

де t_{cr}° – гранично допустима температура охолоджуючого повітря; U_H – номінальна напруга двигуна; Δt_{cr}° – гранично допустиме перевищення температури обмоток статора.

Температура синхронного двигуна може використовуватись як додатковий параметр при керуванні струмом збудження. Підвищення температури може свідчити про перевантаження двигуна або інші проблеми, які потребують реакції контролера. Використання нечіткого керування дозволяє створити систему, яка здатна автоматично регулювати струм збудження в залежності від температури двигуна.

Врахування завантаженості синхронного двигуна також є важливим фактором при компенсації реактивної потужності, оскільки воно може впливати на його роботу та ефективність компенсації. Зокрема, при зміні навантаження на синхронний двигун змінюється потужність, що споживається, а значить, змінюється і значення реактивної потужності. Якщо ж не враховувати зміну завантаження при компенсації реактивної потужності, то може відбутися перекомпенсація або недокомпенсація реактивної потужності.

Завантаження синхронного двигуна можна вказати у відсотках його номінальної потужності, оскільки номінальна потужність є базовою величиною визначення максимальної ефективності роботи двигуна. Тому інформація про завантаження синхронного двигуна є важливим параметром для визначення його ефективності та контролю його роботи.

Також варто враховувати кількість двигунів, які можуть приймати участь в процесі компенсації та їх завантаження. Зокрема, при зміні активного навантаження СД, змінюється його компенсаційна можливість по реактивній потужності, що повинно бути враховано. Якщо в процесі регулювання реактивної потужності беруть участь декілька СД різної або однієї номінальної потужності, то необхідно забезпечити однаковим їх повне відносне завантаження по повній потужності

$$S_i = \sqrt{P_i^2 + Q_i^2} = \text{const} \quad (2)$$

Це, в свою чергу, може вплинути на загальну можливість компенсації реактивної потужності за допомогою SM. Також наявність високої кількості двигунів дозволяє більш плавно розділити компенсаційні рівні. Це досягається тим, що в процес компенсації включаються двигуни з низьким навантаженням та/або відсутністю перегріву.

Розрахунок нечіткого регулятора проведемо з використанням пакету для розробки нечітких систем керування - FuzzyLogicToolbox Matlab.

Для цього виберемо вхідні параметри. Вхідні параметри, які будуть впливати на компенсаційну можливість нечіткого контролера зображено на рис.3. Це по-перше, параметр споживаної реактивної потужності ($Q_{спож}$). Рівні споживання – низький, середній та високий. Другий параметр – $\text{tg} \phi$. Наступний параметр це число СД, наявних в мережі, температура двигунів та їх завантаження двигунів. Ці три параметри значно впливають на величину, що ми можемо компенсувати за допомогою СД. Однак, при високому завантаженні синхронного двигуна його температура буде зазвичай вищою, ніж номінальна. Це пов'язано з тим, що при збільшенні навантаження на двигун збільшується його втрата потужності від опорів, викликаних втратами в статорі та роторі, а також втратами на перемагнічування. Це призводить до підвищення температури двигуна. Якщо ж температура двигуна залишається низькою при високому завантаженні, це може бути ознакою неефективної роботи або аварійного стану. Тому доцільно об'єднати параметр завантаження та температури.

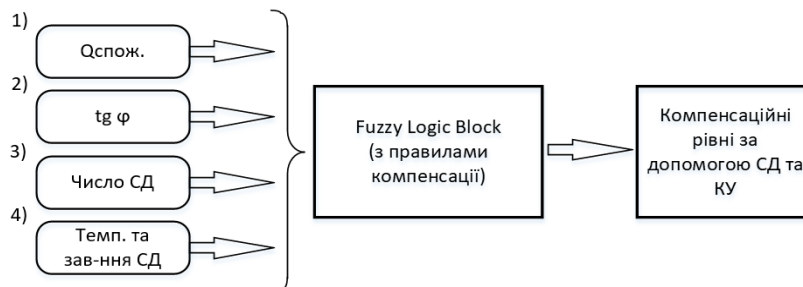


Рис.3. Параметри блока нечіткої логіки

При побудові були враховані всі важливі умови. Наприклад, синхронні двигуни при високій температурі та високому навантаженні не можуть повноцінно приймати участь в компенсації реактивної потужності. Це зроблено для запобігання аварійних ситуацій. Важливо відслідковувати температуру синхронного двигуна під час його роботи, щоб уникнути перегріву та пошкодження обладнання. Для цього можуть використовуватися температурні датчики, які дозволяють моніторити температуру двигуна та при необхідності вживати заходів для зниження температури. Наприклад, при більш високих значеннях кількості СД, що є у мережі, ми можемо задіяти їх частку компенсуючої можливості. Таке відбувається через те, що ми розподіляємо необхідну реактивну потужність, яку потрібно компенсувати, між усіма двигунами.

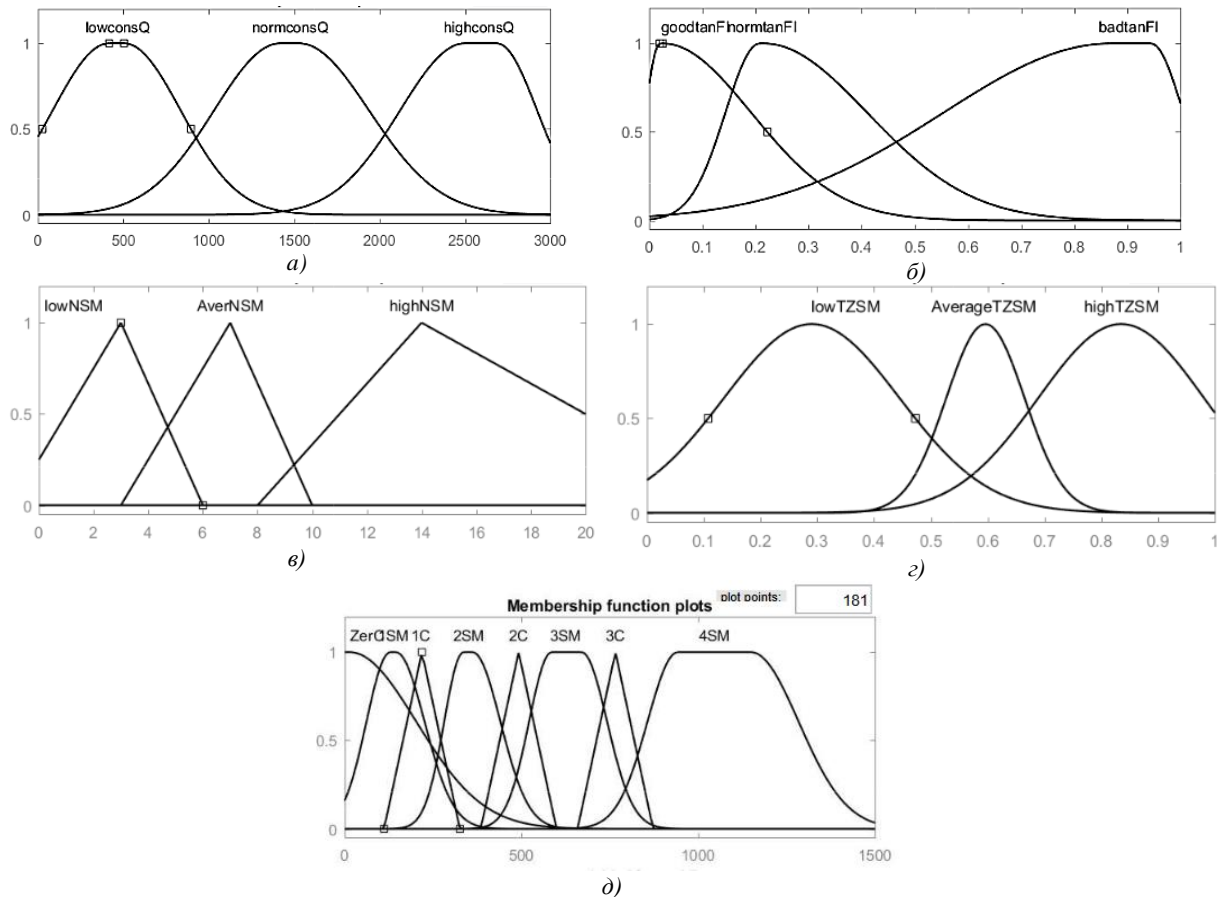


Рис.4. Функції приналежності для блоку нечіткої логіки: *a* – вхідне значення споживання реактивної потужності; *b* – значення $\tan\phi$ в мережі; *c* – число синхронних двигунів; *d* – температура двигунів та навантаження двигунів; *d* – вихідного значення можливостей компенсації

Для зменшення впливу реактивної потужності на електромережу пропонується розробити алгоритм компенсації реактивної потужності. Цей алгоритм передбачає встановлення конденсаторів реактивної потужності [2]. Застосування алгоритму компенсації реактивної потужності дозволяє знизити витрати на енергоспоживання, збільшити ефективність та надійність роботи електромережі, зменшити ризик виникнення перенапруги та перенавантаження обладнання, а також зменшити втрати енергії в мережі.

Схему контролю процесом компенсування реактивної потужності можна реалізувати за допомогою алгоритму, вказаному на рис.5. Варто зазначити, що алгоритм спочатку проводить аналіз компенсаційних потужностей конденсаторних установок через те, що в середньому втрати у перерахунку на кВт/кВАр для КП складають 0,002-0,0045 кВт/кВАр [3]. В той же час, як для синхронних двигунів цей показник становить для наших умов та існуючих параметрів 0,013 кВт/кВАр, що відповідає загальним тенденціям оцінки. Тобто більш сприятливим процесом компенсації є залучення в першу чергу саме конденсаторних установок.

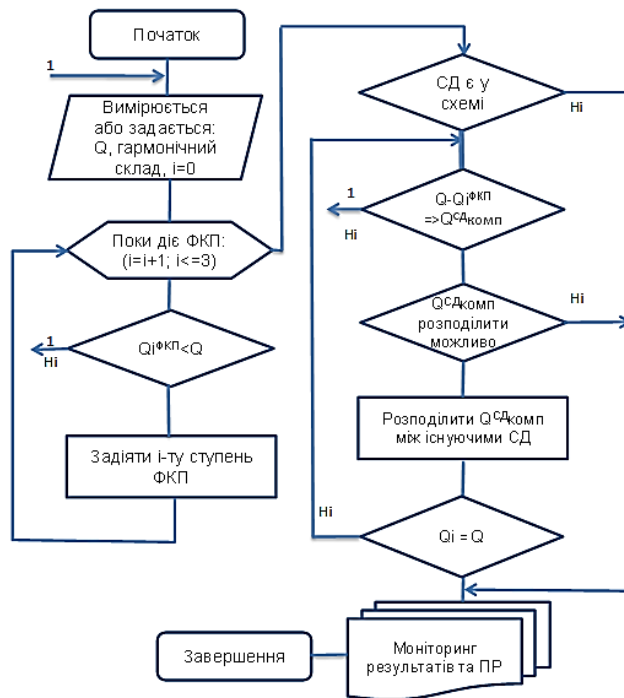


Рис.5. Алгоритм роботи фільтрокомпенсуючих пристроїв

Опис дії алгоритма:

вимірюється або задається Q та гармонійний склад;

перевірка, чи є ФКП? Якщо так – одна ступінь використовується для компенсації гармонійних складових напруги і струму, якщо є потреба у другій ступені – КУ. Перевіряється умова

$$Q_{2\phi KV} < Q. \quad (3)$$

Якщо так – вводиться друга ступінь ФКП, далі перевіряється

$$Q_{2\phi KV} + Q_{3\phi KV} < Q, \quad (4)$$

вводиться третя ступінь, тощо.

Якщо $Q_{2\phi KV} > Q$ або $Q_{i\phi FK} < Q < Q_{i+1\phi KV}$, то йде регулювання залишку реактивної потужності з компенсації синхронного двигуна:

$$Q - Q_{\phi KV} \rightarrow Q_{CD, КОМП}. \quad (5)$$

Перевіряється наявність та можливість СД на компенсацію Q_{SM} . Розподіляється між задіяними в компенсації синхронними двигунами.

Йде постійна перевірка

$$Q > Q_{i+1\phi KV} + Q_{i+1\phi KV}. \quad (6)$$

Якщо так, то вводиться $i+1$ ступінь ФКП, при цьому уставка регулюючих СД буде спрямована на наступну величину

$$Q - Q_{\phi KV} + Q_{i+1\phi KV} = Q_{CD}. \quad (7)$$

де Q_{CD} розподіляється поміж СД, забезпечуючи $S_i^* = \text{const}$. Якщо можливості ФКП вичерпано, то реалізація процесу йде виключно за допомогою синхронних двигунів.

Враховуючи всі вищезазначені фактори були отримані наступні залежності (рис.6 а, б).

На рис.6а можна спостерігати відносно низькі значення компенсації в проміжку Q_{cons} від 0 до 1500kVAr·h та $\tan \phi$ від 0 до 1. Це можна пояснити тим, що в даній зоні відсутня необхідність значних рівнів компенсації. Відповідно, починаючи зі значень 500 кВАр·год компенсуюча необхідність зростає. Це також є важливим через те, щоб зробити неможливим включення більш компенсаційних рівнів до появи такої необхідності. Таке рішення дозволяє уникнути надлишкової генерації реактивної потужності.

Рис.6 б для низьких значень числа двигунів, високих значень температури (відносно номінального значення) та високого завантаження значення компенсаційних можливостей низькі. Це

пояснюється тим, що подальше зростання генерації реактивної потужності з цих двигунів може призвести до їх перегріву. Саме через це при наявності більшого числа SM ми можемо розподілити більші значення генерації навіть при вищих значеннях температури та навантаження.

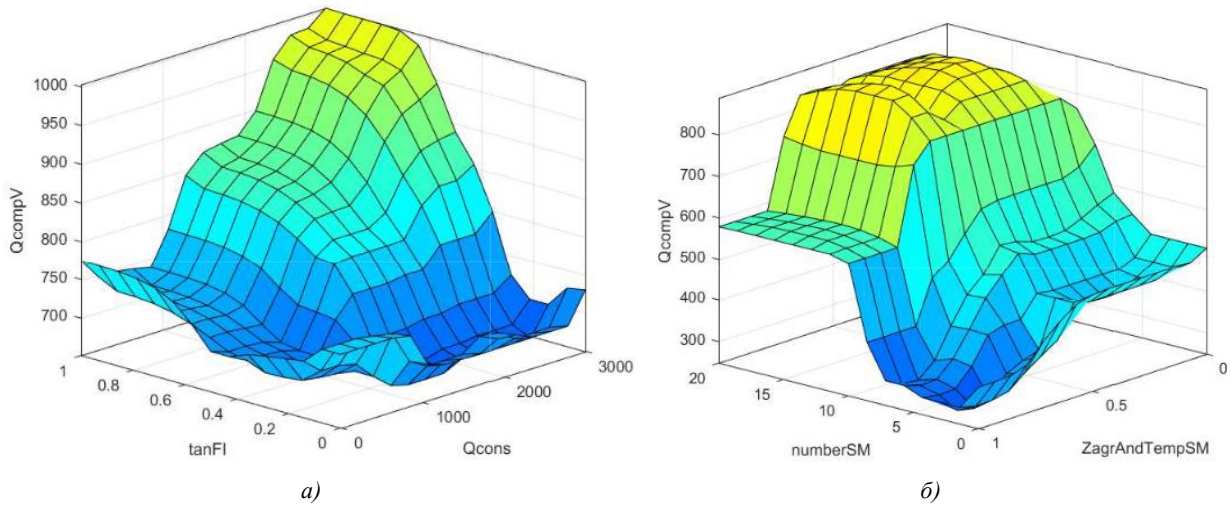


Рис. 6. Компенсаційна здатність системи: а – для Q_{cons} та $\tan\phi$; б – для числа СД та їх завантаження

На рис.7 та рис.8 зображено результат процесу роботи алгоритму компенсації реактивної потужності за допомогою КУ та СД за добу у січень та червень відповідно.

Як видно на рис.7 та рис.8, відповідно до алгоритму, потужність генерації за допомогою конденсаторних установок не перевищує потужність споживання.

За добу у січні задіяні три ступені (постійна компенсаційною здатністю на 2800 кВАр·год, та дві по 100 кВАр·год). За добу влітку задіяні дві ступені по 100 кВАр·год та постійна на 2800 кВАр·год. Залишок реактивної потужності компенсується синхронним двигуном.

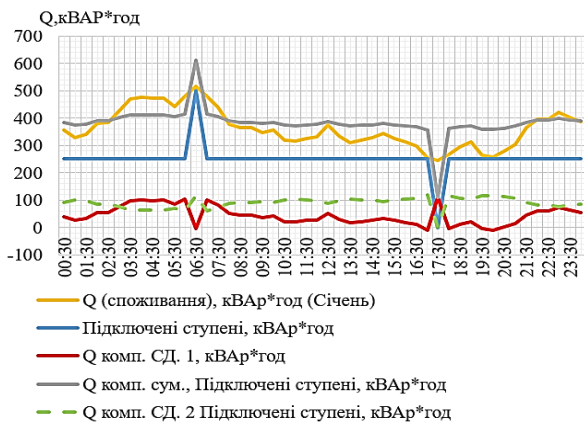


Рис.7. Компенсації реактивної потужності конденсаторними установками та синхронними двигунами. Січень

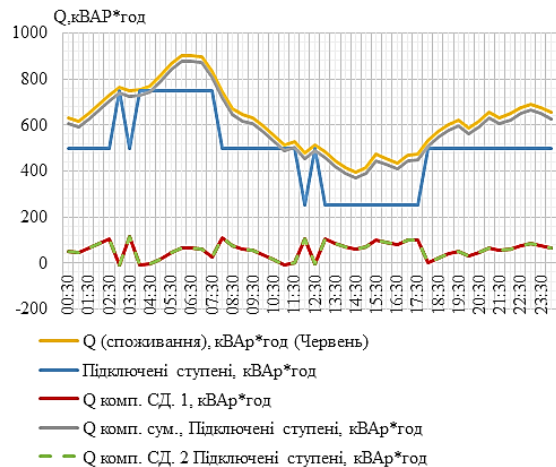


Рис.8. Компенсації реактивної потужності конденсаторними установками та синхронними двигунами. Червень

Проте важливим також є процес перехідних процесів при використанні СД та ФКУ для компенсації реактивної потужності. В статті досліджується їх компенсаційна можливість саме з точки зору рівнів генерації реактивної потужності. Перехідні процеси при використанні для компенсації реактивної потужності синхронних двигунів та конденсаторних установок залежать від декількох факторів [16].

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 [16]. По-третє, перехідні процеси залежать від характеристик комутаційної апаратури, таких як час перемикання та опір. Ці параметри впливають на швидкість зміни струму та напруги.

Також більш глибоке дослідження перехідних процесів є важливим для оцінки ефективності компенсації реактивної потужності та стабільності роботи мережі, але залежать від багатьох факторів, включаючи параметри синхронних двигунів та конденсаторних установок, а також характеристики комутаційної апаратури [17]. Тому використання у системі контролю компенсуючими пристроями вказаних значень потребує подальших досліджень.

Висновки і напрямок подальших досліджень. На основі статистичних даних споживання реактивної потужності потужних підстанцій підприємства ПрАТ «ПівнГЗК» було запропоновано спосіб вибору потужності компенсуючих пристроїв для забезпечення мінімальної плати підприємства за реактивну потужність. Запропонована система автоматичного керування компенсаційними пристроями (переключенням щаблів ФКП) та регулюванням збудження СД для компенсації реактивної потужності в функції балансу її перетоків між споживачами (асинхронними двигунами, трансформаторами тощо), з контролем технологічних параметрів роботи СД [6, 7]. Розроблений алгоритм реалізовано на базі нечіткої логіки із урахуванням важливих технологічних параметрів. Отриманий рівень компенсаційних можливостей в залежності від усіх врахованих параметрів. За результатами графічних зображень необхідний рівень компенсації забезпечує високу енергетичну ефективність.

Аналізуючи отримані дані, можна сказати що впровадження алгоритму компенсації запропонованим методом дозволить знизити плату за реактивну потужність підприємством з загальною встановленою активною потужністю 283МВт з приблизно 400 тисяч гривень на місяць до однієї тисячі. Звичайно, запропонований метод враховує сплату лише за сплату за реактивної потужності за тарифом. Якщо враховувати термін окупності впровадження, то він буде залежати від багатьох факторів, де одним із головних виступатиме спосіб реалізації даного методу. Тому термін окупності впровадження алгоритму керування КП повинен розраховуватися у індивідуальному порядку.

Список літератури

1. А.І. Купін, Ю.Г. Осадчук, О.І. Савицький, Ю.Г. Осадчук, Ю.В. Шерстнов, Підвищення якості електропостачання підстанцій гірничо-збагачувальних комбінатів, 2022, Наукові записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського, Серія: Технічні науки Том 33 (72) № 4 2022, С. 149–159. URL: http://tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2022/4_2022/4_2022.pdf.
2. В.М. Вербинець, Ю.В. Шерстнов, С.А. Сільченко, А.І. Купін, Ю.Г. Осадчук, О.І. Савицький Алгоритм керування фільтро-компенсуючими пристроями за умов наявності синхронних двигунів 2022, Наукові записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського, Серія: Технічні науки Том 34 (73) № 1, С. 173 – 179, URL: <http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/archive>
3. Andrey Kupin, Yuriy Sherstnov, Yuriy Osadchuk, Olexander Savytskyi Intelligent control of industrial compensating devices based on the application of Fuzzy Logic CoLInS2023
4. Kupin, A., Senko, A. (2015). Principles of intellectual control and classification optimization in conditions of technological processes of beneficiation complexes. *CEUR Workshop Proceedings*, (1356), 153-160.
5. Kupin, A., Vdovichenko, I., Muzyka, I., & Kuznetsov, D. (2017). Development of an intelligent system for the prognostication of energy produced by photovoltaic cells in smart grids systems. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 5(8(89)), 4-9
6. The method of increasing the energy efficiency of technical systems of technological units with synchronous drives by adjusting their reactive power: pat. 141771 Ukraine: G01N 25/30, G21C 3/40, G01R 15/12. u 2019 10423; statement 17.10.2019; published 04/27/2020, Bul. No. 8. 11 p.
7. Device for increasing the energy efficiency of technical systems of technological units with synchronous drives: pat. 151007 Ukraine: E21C 41/16, u 2021 02980; statement 03.06.2021; published 25.05.2022, Bull. No. 21. 6 s.
8. Sinchuk, O., Kupin, A., Sinchuk, I., Rohoza, M., & Plieshkov, P. (2020). Certain aspects concerning the development of a functioning scheme of the automated system to control energy flows of underground iron-ore enterprises. *Mining of Mineral Deposits*, 14(3), 101-111. <https://doi.org/10.33271/mining14.03.101>
9. Sinchuk, I. (2018). Harmonization of modeling systems for assessing the electric-power consumption levels at mining enterprises. *Mining of Mineral Deposits*, 12(4), 100-107. <https://doi.org/10.15407/mining12.04.100>
10. Borschlegl M., Bregulla M., Franke J. Methods-energy measurement – an approach for sustainable energy planning of manufacturing technologies. *Journal of Cleaner Production*. 2016;135(1):644–656. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.059>.
11. Biel K., Glock C. Systematic literature review of decision support models for energy-efficient production planning. *Computers & Industrial Engineering*. 2016;101:243–259. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.08.021>.
12. Biel K., Glock C. Systematic literature review of decision support models for energy-efficient production planning // *Computers & Industrial Engineering*, 2016, Vol. 101, pp. 243–259.

13. Zhukovskiy Y., Batueva D., Buldysko A., Shabalov M. Motivation towards energy saving by means of IoT personal energy manager platform //Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1333 (6). DOI: 10.1088/1742-6596/1333/6/062033.

14. Spiliotis E., Petropoulos F., Kourentzes N., Assimakopoulos V. Cross-temporal aggregation: Improving the forecast accuracy of hierarchical electricity consumption //Applied Energy, 2020, Vol. 2611, № 114339.

15. A. Binbusayyis, "Deep embedded fuzzy clustering model for collaborative filtering recommender system," *Intelligent Automation & Soft Computing*, vol. 33, no.1, pp. 501–513, 2022.

16. Mohammed B., Samer S., Yuting T., Joydeep M. Reactive power compensation for reliability improvement of power systems. 2016 DOI: 10.1109/TDC.2016.7519910

17. Oscar D.M., Walter G. Dynamic active and reactive power compensation in distribution networks with batteries: A day-ahead economic dispatch approach. *Computers & Electrical Engineering* Volume 85, July 2020
<https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2020.106710>

Рукопис подано до редакції 18.01.24

УДК 331.43:[622.7:549.6]

О.Є. ЛАПШИН, д-р техн. наук проф., Г.М. ЯРОШЕНКО, аспірант
Криворізький національний університет

ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦІЇ З УРАХУВАННЯМ ТЕМПЕРАТУРНИХ РЕЖИМІВ ПОВІТРЯ В ЦЕХАХ ЗБАГАЧЕННЯ ТИТАНО-ЦИРКОНІЄВОЇ РУДИ

Мета. Основною метою цього дослідження є вивчення впливу температурних коливань на працездатність систем вентиляції цехів збагачення титано-цирконієвих руд. Дослідження спрямоване на надання цінних уявлень про те, як ці системи можна ефективно пристосувати до як холодних, так і теплих періодів року, з метою підвищення загальної ефективності.

Методи дослідження включали фактичний аналіз температурних умов праці та зміни швидкості подачі свіжого повітря, побудову математичної моделі для зміни швидкості повітря в залежності від температурних режимів та аналіз літературних джерел з принципів роботи вентиляційних систем.

Наукова новизна полягає в розробці складної математичної моделі, спеціально призначеної для визначення швидкості подачі свіжого повітря в різних кліматичних умовах до цехів збагачення титано-цирконієвої руди. Ця модель, застосовна як для холодного, так і для теплого сезонів, є унікальним внеском у галузь. Інтеграція її в практику може призвести до точного контролю вентиляційних систем, оптимізації використання ресурсів та безпечнішого робочого середовища.

Практична значимість. Практичне значення дослідження надзвичайно важливе для забезпечення гігієни, безпеки та ефективності праці на промислових підприємствах. Розуміння та оптимізація процесів вентиляції мають на меті створення більш здорового робочого середовища, підвищення продуктивності працівників та подовження терміну служби обладнання в цехах з обробки титано-цирконієвих руд.

Результати. Дослідження зосереджувалося на впливі температурних коливань на системи вентиляції, зокрема в цехах збагачення титано-цирконієвої руди.

Застосовані різноманітні методології включали фактичний аналіз робочих температурних умов, зміни швидкості подачі свіжого повітря та побудову складної математичної моделі, яка фіксує зміни швидкості повітря при різних температурних режимах. Новизна дослідження полягає в його потенціалі піонерського прогресу в стратегіях вентиляції, із широкими наслідками для промислових установ, які стикаються із схожими викликами.

На завершення, це дослідження надає комплексне розуміння вентиляційних систем, залежних від температури, у цехах збагачення титано-цирконієвих руд, пропонуючи практичні рішення для покращення ефективності та безпеки в промислових умовах.

Ключові слова: вентиляція, повітря, періоди року, пил, температура, вологість, швидкість, кліматичні коливання, ефективність.

doi: 10.31721/2306-5451-2024-1-58-124-130

Проблема і її зв'язок з науковими і практичними завданнями. Дослідження обертається навколо складної динаміки роботи систем вентиляції в цехах збагачення титано-цирконієвої руди та глибокого впливу температурних коливань на їх продуктивність. Основна мета цього дослідження полягає в тому, щоб всебічно дослідити та зрозуміти, як коливання температури впливають на функціональність систем вентиляції в цих промислових умовах. Таким чином, дослідження має на меті надати безцінне уявлення про ефективну адаптацію цих систем як до холодних, так і до теплих періодів протягом року, тим самим підвищуючи загальну ефективність і дієвість процесу вентиляції.