

УДК 621.311  
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/26>

**Вербинець В.М.**

ПрАТ «Північний гірничо-збагачувальний комбінат»

**Шерстньов Ю.В.**

Криворізький національний університет

**Сільченко С.А.**

ПрАТ «Північний гірничо-збагачувальний комбінат»

**Купін А.І.**

Криворізький національний університет

**Осадчук Ю.Г.**

Криворізький національний університет

**Савицький О.І.**

Криворізький національний університет

## АЛГОРИТМ КЕРУВАННЯ ФІЛЬТРО-КОМПЕНСУЮЧИМИ ПРИБОРАМИ ЗА УМОВИ НАЯВНОСТІ СИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

*Метою роботи є обґрунтування, розробка та застосування алгоритму до процесу компенсації реактивної потужності за допомогою фільтро-компенсуючих пристроїв (ФКП) та синхронних двигунів.*

*Виконано технологічний аудит підвищення ефективності компенсаційних пристроїв підстанцій гірничо-збагачувальних комбінатів. Проведено лабораторні експериментальні дослідження, електронне моделювання, а також теоретичний аналіз та узагальнення результатів досліджень за стандартними та новими методиками. В результаті проведено розрахунки ефективності використання запропонованого алгоритму керування ФКП та синхронними двигунами (СД), визначений економічний ефект від запропонованого рішення.*

*Виконано розрахунки та статистично обґрунтовано вибір рівнів компенсації за допомогою конденсаторних установок ФКП. Запропоновані методи корекції параметрів потужності ФКП, які забезпечують мінімальну плату підприємства за реактивну потужність з урахуванням реальних добових режимів навантаження споживачів.*

*Для поліпшення якості параметрів мережі найчастіше застосовуються ФКП, що виконують функцію компенсації реактивної потужності і фільтрації складових гармонійних параметрів електромережі. Синхронні двигуни також використовуються з метою компенсації реактивної потужності, працюючи з випереджаючим  $\cos\phi$ .*

*Наведено основні наукові та практичні результати при обґрунтуванні використання алгоритму керування компенсуючими пристроями підстанцій гірничо-збагачувальних комбінатів. В результаті розрахунків за допомогою статистичного аналізу визначено раціональні рівні потужності ступенів компенсуючого пристрою (КП). Обґрунтовано періодичність перевірки необхідності підключення/відключення ступенів КП. Подальші розрахунки встановлюють рівень регулювання струмом збудження для досягнення певного рівня компенсації, який не було забезпечено КП. При цьому використовуючи вказаний алгоритм значно знижується плата підприємства.*

**Ключові слова:** гірничо-збагачувальні комбінати, мережі живлення, якість параметрів електромережі, енергоефективність, фільтро-компенсуючі пристрої, синхронні двигуни, алгоритм.

**Постановка проблеми.** Сучасні потужні споживачі електроенергії підстанцій гірничо-металургійного комплексу мають часто нелінійне навантаження, що призводить до погіршення якості енергії живлення. Це, в свою чергу, призво-

дить до збільшення втрат за рахунок виникнення вищих гармонійних складових напруги і струму та інших показників. Означене зумовлює збільшення втрат електроенергії та зниження терміну служби обладнання. Також при цьому на підпри-

емство можуть накладатися додаткова оплата за перевищення показників споживання реактивної потужності.

Для підстанцій, які живлять обладнання, керованих напівпровідниковими перетворювачами і маючих значну споживчу потужність, рекомендовано встановлювати фільтро-компенсуючі пристрої (ФКП). Їх мета – зменшити вплив на живлячу мережу вищих гармонійних складових і підвищити тангенс навантаження об’єкта (на рівні  $\text{tg}\varphi < 0,25$  [1]) системи електропостачання за рахунок компенсації реактивної потужності «на місцях» (тобто не брати її з системи).

На рис. 1 представлено типові потоки реактивної енергії на підстанції.

Підприємствам, що мають у активі підстанцій синхронні двигуни (СД), також рекомендують за можливістю впровадити їх у процес компенсації. Для досягнення такої мети потрібно раціонально використовувати вищезгадане обладнання. Тобто розробити оптимальний алгоритм роботи, який дозволить мінімізувати втрати у мережі. З цією метою пропонується наступний алгоритм роботи компенсуючих пристроїв (графічно представлений на рис. 2):

1) Вимірюється або задається  $Q$  та гармонійний склад.

2) Перевірка, чи є ФКП? Якщо так – одна ступінь використовується для компенсації гармонійних складових напруги і струму, якщо є потреба у другій ступені – КРМ. Перевіряється:

$$Q_{2\text{ФКП}} < Q,$$

Якщо так – вводиться друга ступінь ФКП, далі перевіряється:

$$Q_{2\text{ФКП}} + Q_{3\text{ФКП}} < Q,$$

вводиться третя ступінь, тощо.

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

$$Q - Q_{i\text{ФКП}} \rightarrow Q_{\text{СД комп.}}$$

3) Перевіряється наявність та можливість СД на компенсацію  $Q_{\text{СД}}$ . Розподіляється між заданими в компенсації синхронними двигунами.

4) Йде постійна перевірка:

$$Q > Q_{i+1\text{ФКП}} + Q_{i\text{ФКП}},$$

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

$$Q - Q_{\text{ФКП}} + Q_{i+1\text{ФКП}} = Q_{\text{СД}}$$

$Q_{\text{СД}}$  Розподіляється поміж СД, забезпечуючи  $S^*_i = \text{const}$ .

5) Якщо можливості ФКП вичерпано, то реалізація процесу йде виключно за допомогою синхронних двигунів.

По-перше. Значення  $Q_{N\text{ФКП}}$  необхідно забезпечити за рахунок підключення ступенів ФКП, які дискретно забезпечують ступінчасті генеруючі значення реактивної потужності. Ступені ФКП, які залишаються, повинні забезпечувати компенсацію вищих гармонійних складових. Останні вимірюються або попередньо встановлюються по результатам експлуатації тиристорного обладнання. Тобто фільтри налаштовуються на компенсацію необхідних (найвищих за амплітудою) вищих гармонійних складових напруги і струму (наприклад, під номером 3, 5, 7).

По-друге. Синхронні двигуни, працюючи з випереджаючим  $\cos \varphi$ , можуть генерувати реактивну потужність інших споживачів підстанції

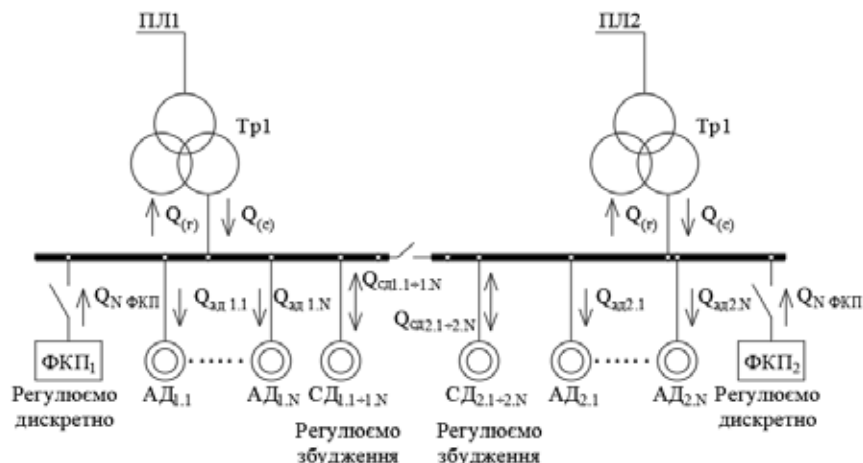


Рис. 1. Потоки реактивної енергії на підстанціях

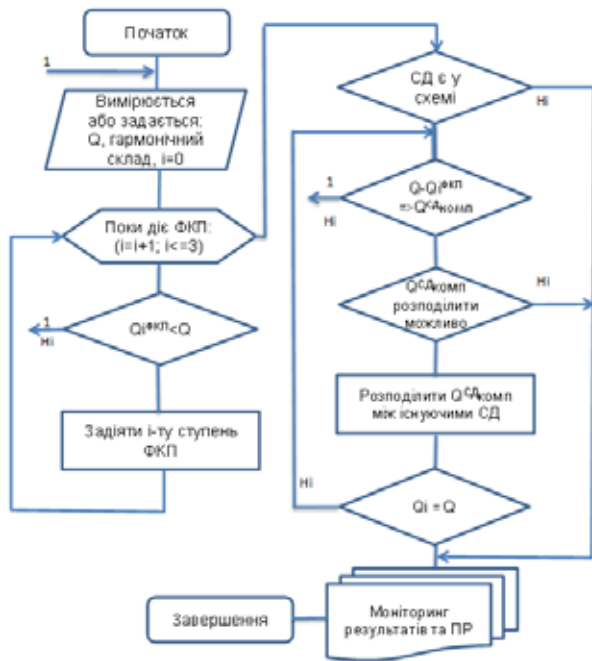


Рис. 2. Алгоритм роботи фільтро-компенсуючих пристроїв підстанцій

(асинхронні двигуни, трансформатори, двигуни постійного струму тощо). Тобто не беручи її з енергосистеми. Виконані науково-дослідницькі роботи дозволили авторам отримати деклараційні патенти [2, 3] на винаходи, які дозволяють раціонально використовувати компенсаційні можливості синхронних двигунів в залежності від значень живлячої напруги, навантаження, температури охолоджуючого повітря, статора ротора, забезпечуючи їх повне завантаження по повній потужності. Тобто пристрої визначають оптимальне значення  $Q_i$  для даних умов експлуатації двигуна. При цьому потрібно врахувати і той факт, що завдяки диференційованим тарифам на активну і реактивну потужність, процес компенсації може бути вигідним та нецілодобовим. Таким чином, встановлюючи необхідні для компенсації реактивної потужності значення  $Q_p$  (або з датчика реактивної потужності, або з блока задання), ми забезпечуємо пропорційний її розподіл на синхронні двигуни різної номінальної потужності. Це забезпечує їх однакове завантаження по повній потужності з контролем технологічних режимів роботи.

Авторами запропонована структура системи автоматизованого керування (на основі програмованих контролерів) збудженням СД та переключенням ступенів ФКП для компенсації реактивної потужності в середині мережі підприємства [4],

яка реалізована алгоритмом керування (рис. 2). Також функції балансу її потоків між споживачами (двигуни АД, трансформаторами) та від ФКП та СД, напрямки цих потоків показані на рис. 3.

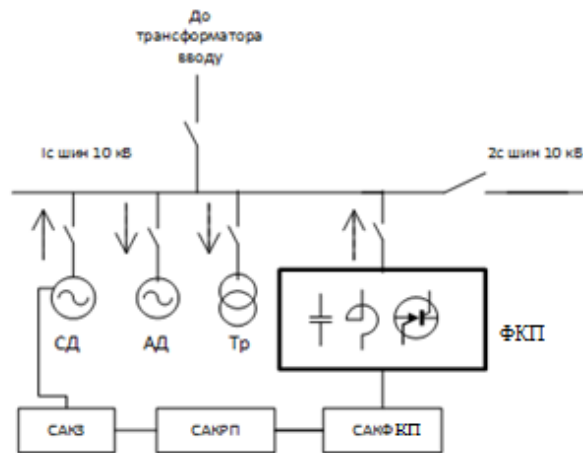


Рис. 3. Структурна схема системи керування реактивною потужністю (САКРП): САКЗ – система автоматичного керування збудженням СД; САКФКП – система автоматичного керування щаблями ФКП

Для достатнього обґрунтування запропонованого алгоритму роботи необхідно спочатку проаналізувати енергетичний стан мережі. На рис. 3 представлений графік споживання електричної енергії однієї з підстанцій ПрАТ «ПівніГЗК» за червень 2019 року та на рис. 4 січень 2019 року відповідно.

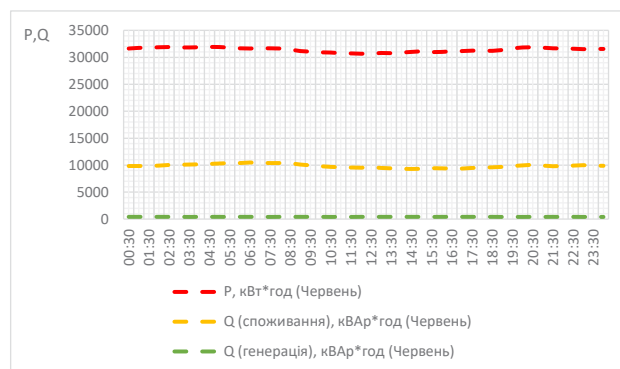


Рис. 4. Споживання активної, реактивної та генерація реактивної потужності за червень 2019 року підстанції ПрАТ «ПівніГЗК»

При цьому значення  $\text{tg}\phi$  за червень знаходилося у межах від 0,28 до 0,31 з середнім значенням 0,3. Мінімальне значення реактивної потужності на підстанції склало 7000 кВАр·год, максимальне – 11300 кВАр·год із середнім значенням у 9800 кВАр·год. Порівняємо зі значенням добової спожитої реактивної потужності за січень (рис. 5).

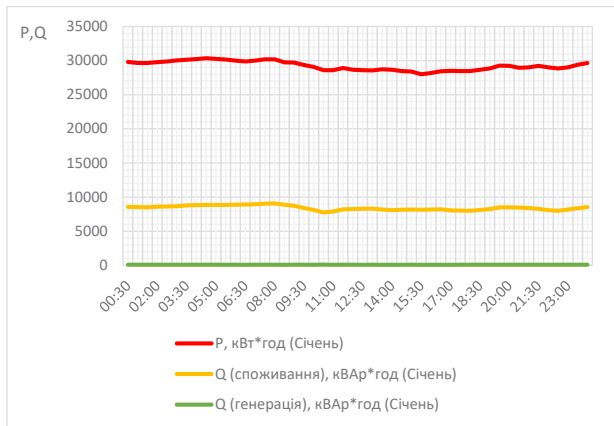


Рис. 5. Споживання активної, реактивної та генерація реактивної потужності за січень 2019 року підстанції ПрАТ «ПівніЗК»

У січні показник  $\text{tg}\phi$  знаходився в межах від 0,26 до 0,29 із середнім значенням 0,28. Мінімальне значення реактивної потужності на підстанції склало 4800 кВАр·год, максимальне – 10200 кВАр·год із середнім значенням у 8400 кВАр·год.

Таким чином, показники споживання реактивної потужності за зимовий та літній періоди не знаходяться у нормативних рамках. З метою стимулювання заходів щодо компенсації реактивної потужності на промислових підприємствах запроваджено систему знижок та надбавок до тарифу за електроенергію. Штрафи у вигляді надбавки до тарифу за електроенергію, що сплачуються підприємством за недотримання режиму компенсації, не усувають реальних втрат в електричних мережах, а лише перерозподіляють їхню вартість між енергосистемою та промисловим підприємством. Однак зазначені надбавки до тарифу стимулюють підприємства до вжиття заходів щодо раціональної експлуатації КП. Відповідно, за це при нарахуванні оплати за електроенергію враховується додатковий показник штрафу [1]. Проте, мінімізувавши показник  $\text{tg}\phi$ , в формулі сплати за реактивну потужність, врахована знижка:

$$\Pi = \Pi_1 + \Pi_2 - \Pi_3,$$

де:

- $\Pi_1$  – основна плата за перетікання реактивної електроенергії, грн;
- $\Pi_2$  – надбавка за недостатнє оснащення електричної мережі споживача засобами КРП, грн;
- $\Pi_3$  – знижка плати у разі залучення споживача до регулювання балансу реактивної потужності (електроенергії), грн.

Отже, власник сплачує не лише за споживання електрообладнанням реактивної потужності (яка в даному випадку може скласти від 12000 грн на

день у зимовий та 14000 грн у літній періоді), а й за додаткові нарахування  $\Pi_2$  (які можуть становити від 60 до 90 грн на день).

Виходячи з вищесказаного, першим етапом вирішення задачі це встановлення мінімального рівня компенсації. Алгоритм (рис. 2) в першу чергу враховує компенсаційні потужності конденсаторних установок через те, що в середньому втрати у перерахунку на кВт/кВАр для КП складають 0,002-0,0045 кВт/кВАр. 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 [5]. Тобто більш сприятливим процесом компенсації є залучення в першу чергу саме конденсаторних установок.

Наступним питанням є вибір раціональних рівнів КП. Виходячи з добових даних споживання реактивної потужності, потужність постійної ступені КП становитиме 7500 кВАр. Тобто рівень споживання реактивної потужності нижче за цю величину не є нормальним. Це відбувається лише у випадку відключень потужних споживачів (наприклад, однієї чи двох ліній споживання РЗФ1). Враховуючі те, що в середньому різниця між січнем червнем може доходити до 1000 кВАр·год, пропонується спосіб визначення потужності ступенів за допомогою закону нормального розподілу.

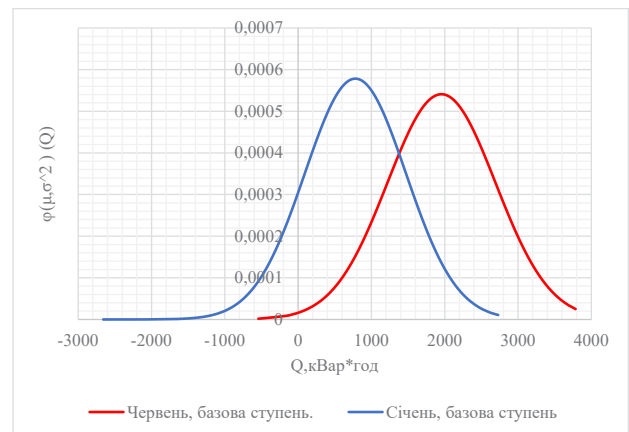
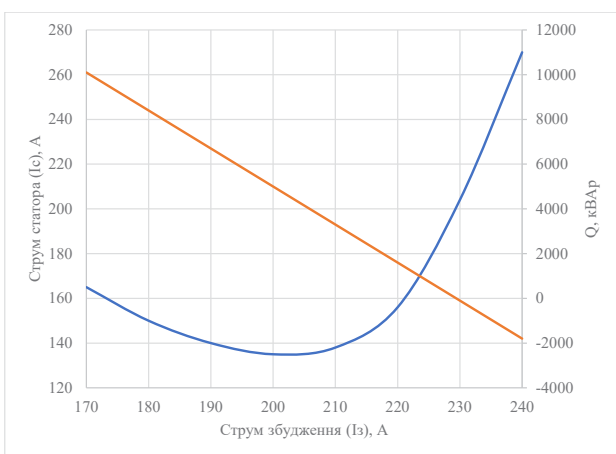


Рис. 6. Закон нормального розподілу балансу реактивної потужності підстанції після впровадження «базової ступені»

Після врахування використання ступені потужністю 7500 кВАр, було складено закон нормального розподілу для балансу реактивної потужності підстанції. З метою подальшого зниження споживання реактивної потужності, за допомогою даного графіку можна розрахувати потужність наступних ступенів. Так, для січня

(синя лінія) найбільш доцільним буде використання ступені потужністю 750кВАр, а для червня (червона лінія) – 2250кВАр. Також, прогнозований баланс реактивної потужності для червня та січня буде знаходитися на одному рівні на значенні 1500кВАр. Проте, щоб не використовувати більш потужні ступені (і тим самим значно збільшувати плату за установки), пропонується використати 3 ступені по 750кВАр. Таким чином, використання останніх дасть змогу більш точно контролювати баланс реактивної потужності на підстанції. Також варто відзначити, що контроль за переключенням КП відбувається на півгодинному інтервалі часу. Такий вибір зумовлено тим, що у випадку меншого часу переключення є ймовірність частих комутацій установок. Це в свою чергу може призвести до скорого виходу з ладу комутаційного або захисного обладнання.

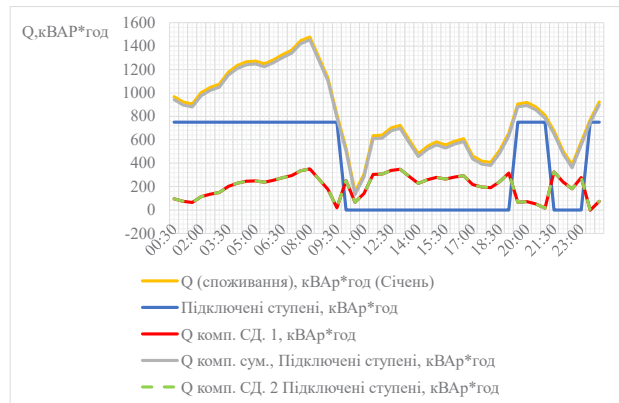
Відповідно до алгоритму, у разі недостатності компенсації реактивної потужності, у процес включаються синхронні двигуни. Наприклад, в даному випадку наявності на підстанції є синхронний двигун з  $P_{ном}=2500кВт$ . На рис. 7 зображена U-подібна характеристика та відповідний рівень споживаної/генерованої реактивної потужності. Номінальний струм збудження –  $I_z=225A$ , струм статора –  $I_c=281A$ . При збільшенні струму збудження знову і збільшується реактивна складова струму статора, але з випереджальною фазою. Синхронний двигун починає працювати генератором реактивної енергії з віддачею в мережу. Відповідно, необхідний струм збудження розраховується з компенсаційних можливостей двигунів, наявних у мережі та кількості двигунів, що можна задіяти у процесі генерації реактивної потужності.



**Рис. 7. U-подібна характеристика синхронного двигуна та відповідний рівень споживаної/генерованої реактивної потужності**

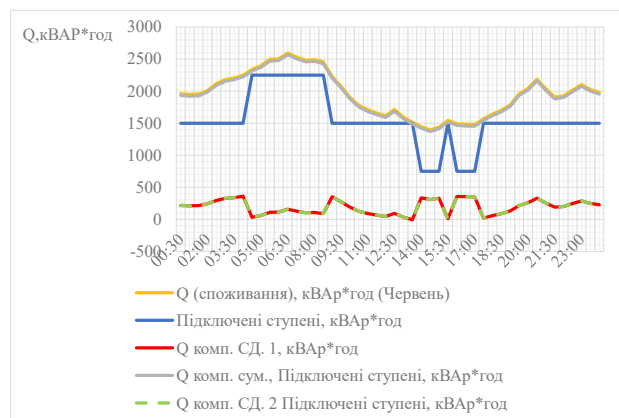
Відповідно до компенсаційної здатності ступенів КП, для компенсації частки реактивної потужності, яка залишилась, необхідно підвищити струм збудження від номінального значення 225А в середньому на 2,5%.

На рис. 8 та 9 зображено результат процесу роботи алгоритму компенсації реактивної потужності за допомогою КП та СД за добу у січень та червень відповідно.



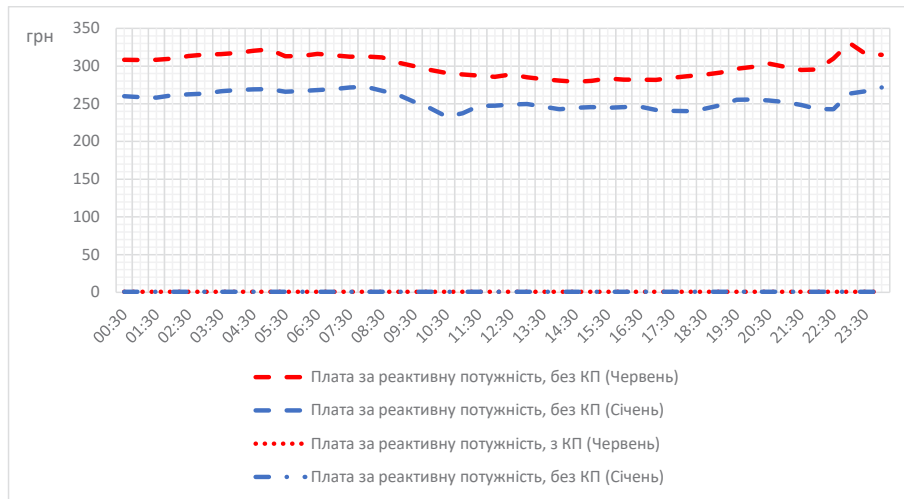
**Рис. 8. Компенсації реактивної потужності конденсаторними установками та синхронними двигунами. Січень**

Як видно на рис. 8 та 9, відповідно до алгоритму, потужність генерації за допомогою конденсаторних установок не перевищує потужність споживання. За добу у січні задіяні три ступені (постійна на 750кВАр, та дві по 750кВАр). За добу влітку задіяні три ступені по 750кВАр та постійна на 750кВАр. Залишок реактивної потужності компенсується синхронним двигуном.



**Рис. 9. Компенсації реактивної потужності конденсаторними установками та синхронними двигунами. Червень**

Відповідно, на рис. 10 зображено економічний ефект від впровадження алгоритму компенсації реактивної потужності.



**Рис. 10. Економічний ефект сплати за впровадження алгоритму компенсації**

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.

**Перспективні напрями досліджень.**

Як варіанти для подальших досліджень у цій темі можливо, наприклад, розглянути необхідність наявності реактивної потужності для збереження ККД трансформаторів.

**Висновки:**

1. На основі статистичних даних споживання реактивної потужності потужних підстанцій підприємства ПрАТ «ПівніГЗК» було запропоновано методику вибору потужності компенсуючих при-

строїв для забезпечення мінімальної плати підприємства за реактивну потужність.

2. Розроблено алгоритм системи автоматичного керування компенсаційними пристроями (переключенням щаблів ФКП) та регулюванням збудження СД (для компенсації реактивної потужності) в функції балансу її перетоків між споживачами (двигунами постійного струму, асинхронними двигунами, трансформаторами тощо), з контролем технологічних параметрів роботи СД [2].

3. Проведено розрахунки та розглянуті очікувані економічні результати за сплату реактивної потужності після впровадження запропонованого алгоритму.

4. Для типового підприємства, яким є ПівніГЗК з загальною встановленою активною потужністю 283МВт очікуване зменшення плати підприємства за реактивну потужність може складати до 400 тис. грн. за місяць. Термін окупності впровадження запропонованої системи повинен розраховуватися окремо та у індивідуальному порядку, враховуючи різні можливості реалізації алгоритму та зміни розрахунків за активну та реактивну потужність між підприємством та енергосистемою.

**Список літератури:**

1. Про затвердження Методики обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії: наказ Міністерство енергетики та вугільної промисловості України від 06.02.2018 р. №87
2. Спосіб підвищення енергоефективності технічних систем технологічних агрегатів з синхронними приводами шляхом регулювання їх реактивної потужності: пат. 141771 Україна: G01N 25/30, G21C 3/40, G01R 15/12. у 2019 10423; заявл. 17.10.2019; опубл. 27.04.2020, Бюл.№8. 11 с.
3. Пристрій для підвищення енергоефективності технічних систем технологічних агрегатів з синхронними приводами: пат. 149078 Україна: E21C 41/00, E21C 41/16 у 2021 02972; заявл. 03.06.2021; опубл. 13.10.2021, Бюл.№41. 10 с.
4. Купін А.І.,Осадчук Ю.Г.,Савицький О.І. Шерстньов Ю.В. (аспірант). До питання керування процесом компенсації реактивної потужності та підвищення якості напруги живлення підстанцій промисло-

вих підприємств. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/23>. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 33 (72) № 4 2022. С. 149-159.

5. Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии / Ю. С. Железко // М. : Энергоатомиздат, 1985. 224 с.
6. Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 5-е изд., перераб. и доп. / И.В. Жежеленко // М.: Энергоатомиздат, 2005. С. 358
7. Железко Ю. С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях: руководство для практических расчетов / Ю. С. Железко // М. : Энергоатомиздат, 1989. 176 с.
8. Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности в сложных электрических системах. М.: Электроатомиздат, 1981. 200 с.
9. Железко Ю. С. Новые нормативные документы, определяющие взаимоотношения организаций и покупателей электроэнергии в части условий потребления реактивной мощности / Ю. С. Железко // Электрика. 2008. № 2. С. 3-8.
10. Железко Ю. С. О нормативных документах в области качества электроэнергии и условий потребления реактивной мощности / Ю. С. Железко // Электрические станции. 2002. № 6. С. 18-24.
11. Железко Ю. С., Герман Л. А. Методы учета тяговых сетей электрифицированных железных дорог в системном расчете компенсации реактивной мощности. Промышленная энергетика, 1989, № 11.
12. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. Руководство для практических расчетов. М.: ЭНАС, 2009. 456 с.
13. Reactive market power analysis using must-run induces. /Feng Donghan, Jin Shong, Gan Deqiang // IEEE Transactions on Power Systems. 2008. -Vol. 23, № 2. P. 755-765.
14. Aprocurement market model for reactive power services considering system security. / El-Samahy Ismael, Bhattacharya Kankar, Canizares Claudio, Anjos Miguel F., Pan Jiuping // IEEE Transactions on Power Systems. 2008. Vol. 23, № 1. P. 137-149.
15. A novel market-based reactive power management scheme. / Lin X. J., Yu C. W., David A.K., Chung C. Y., Wu H., Hu N. // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2006. Vol. 28., № 2. P. 127-132.
16. Bornschlegel M., Bregulla M., Franke J. Methods-Energy Measurement – An approach for sustainable energy planning of manufacturing technologies // Journal of Cleaner Production, 2016, Vol. 1351, pp. 644-656.
17. 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

**Verbynets V.M., Sherstnov Yu.V., Silchenko S.A., Kupin A.I., Osadchuk Yu.G., Savytsky O.I.**  
**CONTROL ALGORITHM OF FILTER-COMPENSATING DEVICES UNDER THE CONDITIONS OF THE PRESENCE OF SYNCHRONOUS MOTORS**

*The method of work is the justification, development and application of the algorithm to the process of compensation of reactive power with the help of filter-compensating devices (FCD) and synchronous motors.*

*The technological improvement of the audit efficiency of compensation devices of substations of mining and beneficiation plants was carried out. Laboratory experimental studies, electronic modeling, as well as theoretical analysis and generalization of research results using standard and new methods were carried out. As a result, calculations of the efficiency of using the proposed control algorithm of FCD and synchronous motors (SD) were carried out, and the economic effect of the proposed solution was determined.*

*Calculations were made and the selection of compensation levels with the help of FCD capacitor units was statistically substantiated. The proposed methods of correction of power parameters of FCD, which ensure the minimum payment of the enterprise for reactive power, taking into account the real daily load regimes of consumers.*

*To improve the quality of the network parameters, the FCD is changed, which provides the function of reactive power compensation and filtering of complex harmonic parameters of the power network. Synchronous motors are also used with the purpose of reactive power compensation, operating with leading  $\cos\varphi$ .*

*The main scientific and practical results for the justification of the use of the algorithm for controlling compensating devices of substations of mining and beneficiation plants are given. As a result of calculations with the help of statistical analysis, rational power levels of the compensation stages of the device (CD) were determined. The time for checking the necessity of connecting/disconnecting CD stages is substantiated. Additional calculations establish the level of adjustment of the excitation flow to achieve a certain level of compensation that was not provided by the KP. At the same time, with the help of the selected algorithm, the company's fee is significantly reduced.*

**Key words:** mining and beneficiation plants, power networks, quality of power grid parameters, energy efficiency, filter-compensating devices, synchronous motors, algorithm.