

УДК 621.311  
DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/23>

**Купін А.І.**

Криворізький національний університет

**Осадчук Ю.Г.**

Криворізький національний університет

**Савицький О.І.**

Криворізький національний університет

**Шерстньов Ю.В.**

Криворізький національний університет

## ДО ПИТАННЯ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТА ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ НАПРУГИ ЖИВЛЕННЯ ПІДСТАНЦІЙ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

*Метою роботи є обґрунтування застосування нових підходів до підвищення якості напруги живлення та струму підстанцій гірничо-збагачувальних комбінатів, а також поліпшення комутаційних процесів включення, відключення ФКУ.*

*Виконано технологічний аудит підвищення ефективності напруги живлення 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 моделювання у програмному забезпеченні MatlabSimulink увімкнення та вимкнення компенсуючих пристроїв на підстанціях з метою визначення їх негативного впливу на параметри мережі та життєвий цикл комутаторів.*

*Виконано моделювання та розглянуті різні варіанти комутації конденсаторних установок ФКУ з метою оцінки їх негативного впливу на мережу живлення. Запропоновані методи корекції параметрів потужності ФКУ, які забезпечують мінімальну плату підприємства за реактивну потужність з урахуванням реальних режимів навантаження споживачів.*

*Для поліпшення якості параметрів мережі найчастіше застосовуються ФКУ, що виконують функцію компенсації реактивної потужності і фільтрації складових гармонійних параметрів електромережі. Комутація конденсаторних установок часто призводить до виникнення значних завищень напруги та струму і зменшення їх життєвого циклу, що призводить до додаткових збитків. Тому вивчення роботи ФКУ для підвищення якості напруги підстанцій гірничо-збагачувальних комбінатів – важливе наукове та практичне завдання.*

*Наведено основні наукові та практичні результати при обґрунтуванні підвищення якості напруги і струму підстанцій гірничо-збагачувальних комбінатів. В результаті моделювання визначено раціональний момент, з урахуванням інерційності вимикачів, перемикачів конденсаторних установок, що забезпечує найкращі показники параметрів мережі. Цей момент – момент переходу графіка фазного струму через нуль при найменшому можливому навантаженні. При цьому знижується вплив вищих гармонійних на параметри живлячої мережі та збільшується життєвий цикл комутаторів.*

**Ключові слова:** гірничо-збагачувальні комбінати, мережі живлення, якість параметрів електромережі, енергоефективність.

**Постановка проблеми.** Витрати на електроенергію будь-якого промислового виробництва суттєво залежать від її якості. Якість енергії може залежати у свою чергу, як від постачальника енергії, так і від характеру навантаження споживача. Однією із складових якості вважається реактивна складова потужності електроенергії, яка спожива-

ється підприємством. Вона не виконує корисної роботи, а служить для створення магнітних полів в індуктивних приймачах, при цьому електроенергія, що запасується в кожному індуктивному елементі, поширюється по мережі, здійснюючи коливальні рухи (від споживача до генератора і назад). Щоб вона не виходила за межі підприємства до

мережі постачальника енергії, на рівні державних законодавчих актів і договорів між виробником та постачальником обмежується споживання реактивної потужності. Показником споживання реактивної потужності  $Q$  є коефіцієнт потужності  $\cos \varphi = P/S$ , який показує співвідношення активної потужності  $P$  та повної потужності  $S$ .

Навантаження в промислових мережах зазвичай має індуктивний характер, що викликає споживання, крім активної потужності, істотної частки реактивної потужності. Збільшена, у зв'язку з цим повна потужність, що споживається, призводить, у свою чергу до наступного:

- збільшення плати постачальнику електроенергії;
- додаткові втрати у провідниках внаслідок збільшення струму та, отже, зменшення пропускної спроможності мереж;
- завищення потужності трансформаторів та перерізу кабелів, відхилення напруги мережі від номіналу;
- зниження якості електроенергії.

З метою усунення зазначених негативних ефектів застосовуються ФКУ, які виконують функцію компенсації реактивної потужності і фільтрації складових гармонійних параметрів електромережі. Комутація ФКУ часто призводить до виникнення значних завищень напруги та струму і зменшення їх життєвого циклу, що призводить до додаткових збитків.

Питання вибору рівня компенсації необхідно вирішувати з урахуванням чинних тарифів на оплату реактивної потужності. Поточний тариф передбачає оплату споживання реактивної потужності у денний час та оплату за споживання та генерацію реактивної потужності у нічний час.

На підставі добових графіків споживання реактивної потужності для підстанцій «ПрАТ «ПівнГЗК» (м. Кривий Ріг) визначено оптимальні значення встановлюваних компенсуючих пристроїв для забезпечення мінімальної плати за реактивну потужність. На рис. 1 для головної понижувальної підстанції (ГПП-1) точки мережі комбінату наведено синтезовані графіки оплати підприємства за споживану та генеровану реактивну потужність, потовщеною лінією показаний графік вибору ємності конденсаторних установок для мінімізації оплати за неї.

На графіках показано:

- сумарна плата за реактивну потужність (чорна лінія);
- плата за споживання реактивної потужності вдень (зелена лінія);
- плата за споживання реактивної потужності у нічний час (червона лінія);
- плата за генерацію реактивної потужності у нічний час (синя лінія).

Як видно з графіків, загальна плата за реактивну потужність (чорна лінія) має яскраво виражений мінімум, що свідчить про потенціал зниження плати за реактивну потужність. Для підстанцій, що мають потужне навантаження від синхронних двигунів технологічних механізмів, самі синхронні двигуни не завантаженні, як показали дослідження, можуть використовуватися для компенсації реактивної потужності. На базі цих досліджень розроблений та захищений Патентом України спосіб підвищення енергоефективності технічних систем із синхронними двигунами, що працюють у режимі компенсації реактивної потужності [1].

Проведено моделювання у програмному забезпеченні MatlabSimulink увімкнення та вимкнення

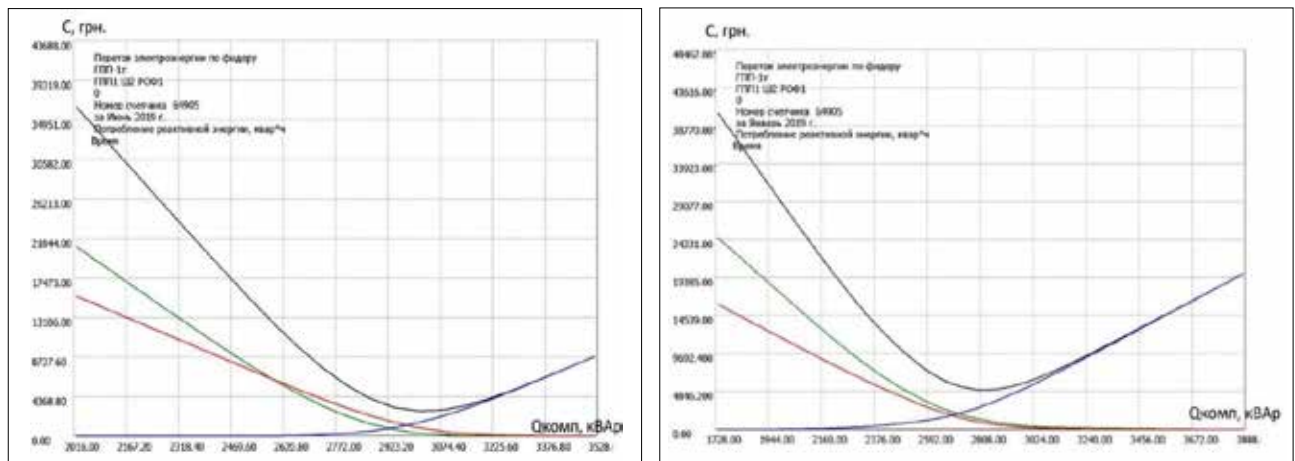


Рис. 1. Економічне обґрунтування вибору рівнів компенсації для точки ГПП-1 у зимовий (праворуч) та літній (ліворуч) період роботи

ступенів компенсуючих пристроїв на підстанціях з метою визначення їх негативного впливу на параметри мережі.

Комутація конденсаторних установок найчастіше веде до виникнення значних перенапруг, особливо в мережах, насичених вищими гармонійними. Розглянемо проблему перенапруги при використанні вакуумних вимикачів з урахуванням особливостей дугогасного середовища та конструкцій цих апаратів, а також навантажень, що ними комутуються. При включенні навантаження (трансформатора, електродвигуна, конденсаторної батареї) правильно спроектованим вимикачем (що не дає відскоків контактів) його дугогасне середовище з погляду виникнення перенапруги не відіграє ніякої ролі. Перенапруження в цьому випадку обумовлені особливостями мережі та комутуваного приєднання як багатоконтурних індуктивно-ємнісних схем, моментом включення за часом та розкидом у замиканні контактів різних фаз вимикача [12].

Основними причинами перенапруги на ізоляції окремого приєднання (і тільки його, а не всієї мережі) при відключенні навантаження, пов'язаними з особливостями дугогасного середовища та конструкцією вимикача, є зріз струму та ескалація напруги.

При перехідних процесах при включенні конденсаторів виникають короточасні кидки струму, які можуть перевищувати номінальний струм (амплітудою до 550%). Все це змушує підходити до комутаційних процесів з особливою обережністю.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналізуючи дослідження та публікації з питань, близьких до проблематики підвищення якості напруги живлення підстанцій гірничо-збагачувальних комбінатів, варто відмітити наступні роботи Железко Ю.С. [13], а також Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л., Александрова Д.С., Щербакова Е. Ф., Саприки А.В. [14–17] та низки інших дослідників.

**Постановка завдання.** Так, за даними зарубіжних досліджень, втрати країн Європи від неякісної електричної енергії щорічно досягають десятки млрд. євро. Аналогічних даних щодо України нині немає, оскільки проблемою якості електричної енергії систематично займаються лише вчені, і це при тому, що збитки від неякісної електричної енергії мають тенденцію щорічного зростання (у США, наприклад, за останні десять років вони подвоїлися).

Одним із простих та дешевих способів усунення всіх цих недоліків мереж є компенсація реактивної потужності шляхом підключення конденсаторів у різних точках мережі [13]. Найбільш ефективними пристроями компенсації є автоматичні системи компенсації реактивної потужності (АСКРП), які дозволяють автоматично максимально зрівнювати споживану та реактивну потужність, що виробляється в системі.

Крім того, застосування потужних напівпровідникових перетворювачів для регулювання параметрів електродвигунів призводять до появи вищих гармонійних та негармонічних складових напруги та струму мережі. Тому найчастіше тепер застосовуються фільтро-компенсуючі пристрої (ФКУ), що виконують функції компенсації реактивної потужності та фільтрації складових (вищих гармонік) параметрів електромережі [14]. Комутація ФКУ призводить до значних кидків струму, які в свою чергу значно знижують життєвий цикл комутуючої апаратури. Для вирішення питання кидків струму необхідно провести моделювання різних варіантів комутації ФКУ.

Отже, для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Виконати моделювання та розглянути різні варіанти комутації конденсаторних установок ФКУ з метою оцінки їх негативного впливу на мережу живлення.

2. Запропонувати методи корекції параметрів потужності ФКУ, які забезпечують мінімальну плату підприємства за реактивну потужність з урахуванням реальних режимів навантаження споживачів.

3. За результатами моделювання запропонувати варіант комутації, при якому збільшиться життєвий цикл елементів ФКУ.

#### **Виклад основного матеріалу дослідження.**

Проведемо моделювання підключення конденсатора в однофазній синусоїдальній системі в різні моменти часу. Умовні параметри схеми наступні:

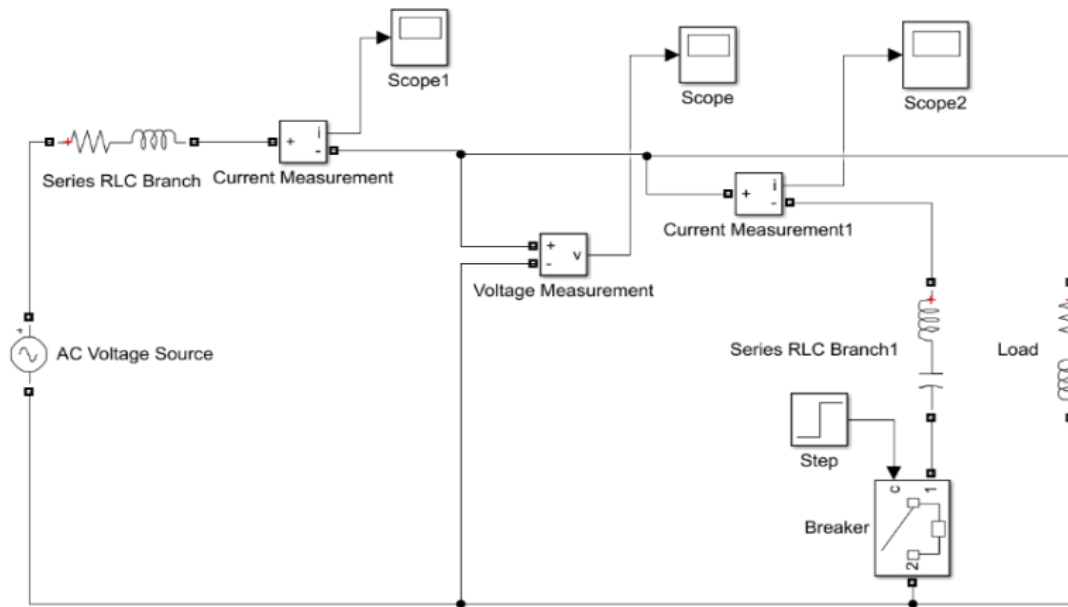
ACVoltageSource:  $U = 380\text{В}$ ,  $f = 50\text{Гц}$ .

SeriesRLCBranch:  $R = 0,01\text{Ом}$ ;  $L = 3,18\text{мкГн}$ .

Load:  $R = 1\text{Ом}$ ;  $L = 10\text{мкГн}$ .

Series RLC Branch1:  $L = 25\text{мкГн}$ ;  $C = 1\text{мФ}$ .

Дана модель дозволить імітувати комутацію конденсаторної батареї у різні моменти часу, внаслідок чого відбуваються зміни струму на лінії (рис. 3, а, б, в), струму на конденсаторі (рис. 4, а, б, в). Проведемо включення конденсатора у такі моменти часу: 30 ел. град (0,005/3 с.); 90 ел. град (0,005 с.); 180 ел. град. (0,01 с.).



**Рис. 2. Модель системи підключення конденсатора в однофазній синусоїдальній мережі в програмному забезпеченні MatlabSimulink**

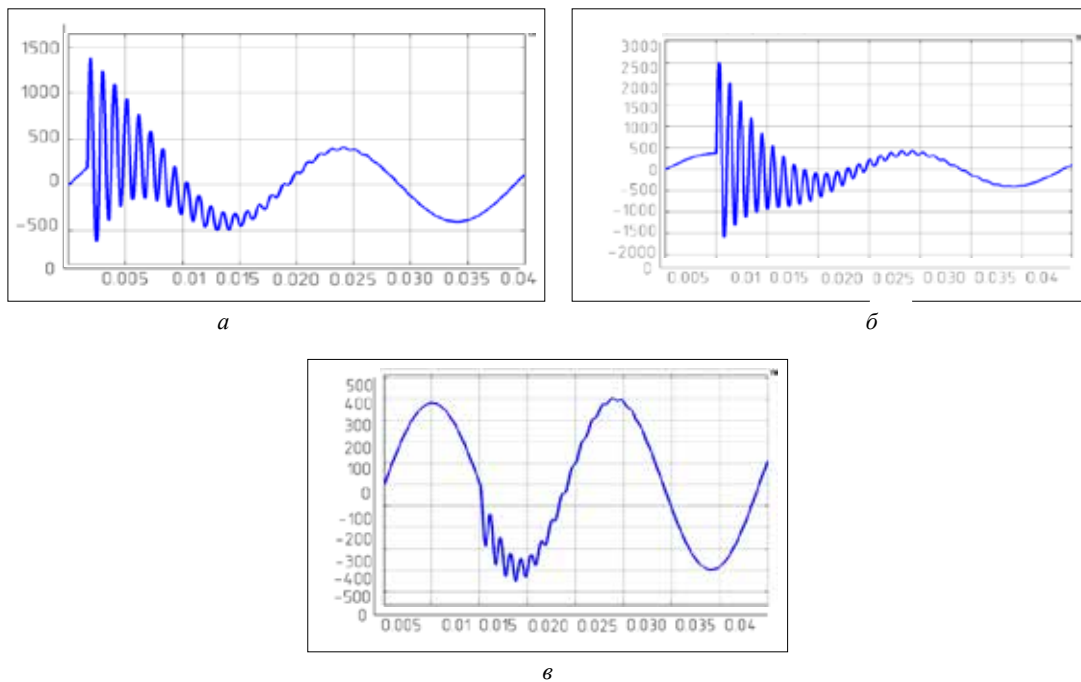
При цьому необхідно враховувати, що при моделюванні не враховуються деякі дійсні параметри досліджуваних ланцюгів, і тому виникають деякі завищені пікові показники струмів та інших параметрів моделі.

Результати моделювання:

– 30 ел. град (0,005/3 с.). В результаті комутації конденсатора на лінії виник значний кидок

струму (рис. 3 а), після чого почався коливальний загасаючий процес. Кидок струму становить близько 300 % від номінального значення, час загасання процесу – 0,025 с.

– 90 ел. град (0,005 с.). В результаті комутації конденсатора на лінії виник значний кидок струму (рис. 3, б), який порівняно з попереднім випадком (рис. 3, а) значно більший. Після кидка почався



**Рис. 3. Струм на лінії (CurrentMeasurement) в моменти вклучення:**  
 (а) – 30 ел. град (0,005/3 с.); (б) – 90 ел. град (0,005 с.); (в) – 180 ел. град. (0,01 с.)

загасаючий коливальний процес. Кидок струму становить 500% від номінального значення, час згасання процесу – 0,03 с.

– 180 ел. град. (0,01 с.). В результаті комутації конденсатора на лінії не виникло значних кидків струму (рис. 3, в).

– кидок струму становить близько 1000% від номінального значення, час згасання процесу – 0,03 с. 30 ел. град (0,005/3 з.) (див. рис. 4, а).

– 90 ел. град (0,005 с.). В результаті комутації конденсатора на конденсаторі виник значний кидок струму (1750% від номінального значення), який, порівняно з попереднім випадком (включення конденсатора в момент 0,005/3 с.), значно більше (див. рис. 4, б). Після кидка почався загасаючий коливальний процес. Час згасання процесу – 0,03 с

– 180 ел. град. (0,01 с.). Внаслідок комутації конденсатора на останньому виник незначний кидок струму (рис. 4. в) (амплітудою до 150%) у порівнянні з попередніми випадками (див. рис. 4, а, б). Після кидка почався загасаючий коливальний процес. Час згасання процесу – 0,03 с.

Проаналізувавши графіки перехідних процесів, можна зробити висновок, що оптимальним часом вмикання конденсаторів є час, коли синусоїда проходить через 0.

Для мережі з частотою 50 Гц даний час становить близько 0,01с. Взявши до уваги отримані результати, змодельємо включення конденсаторів

у трифазній системі. Для розрахунку та завдання параметрів моделі використовуємо дані, надані підприємством ПрАТ «ПівніГЗК».

Згідно з наданими даними, було встановлено параметри схеми:

Three-PhaseSeriesRLCLoad(нагрузка):P=8,50МВт; Q=2,87МВАр;

Three-PhaseSource:U=6кВ;f=50 Гц;

Three-PhaseSeriesRLCBranch:R=1мкОм;L=1мкГн.

На підставі добових графіків споживання реактивної потужності з урахуванням оптимальної плати було визначено параметри установок компенсації.

Розрахунок параметрів моделювання.

Відповідно до параметрів споживання реактивної потужності було встановлено оптимальну потужність компенсуючої, яка становить 3000кВАр. Розрахуємо ємність для завдання параметрів моделі у програмному забезпеченні MatlabSimulink (рис. 5):

$$Q_c = \frac{U_c^2}{X_c} \quad (1)$$

Підставимо у формулу (1) значення реактивного опору конденсатора:

$$X_c = \frac{1}{\omega C}$$

Отримуємо:

$$Q_c = U_c^2 \cdot \omega C$$

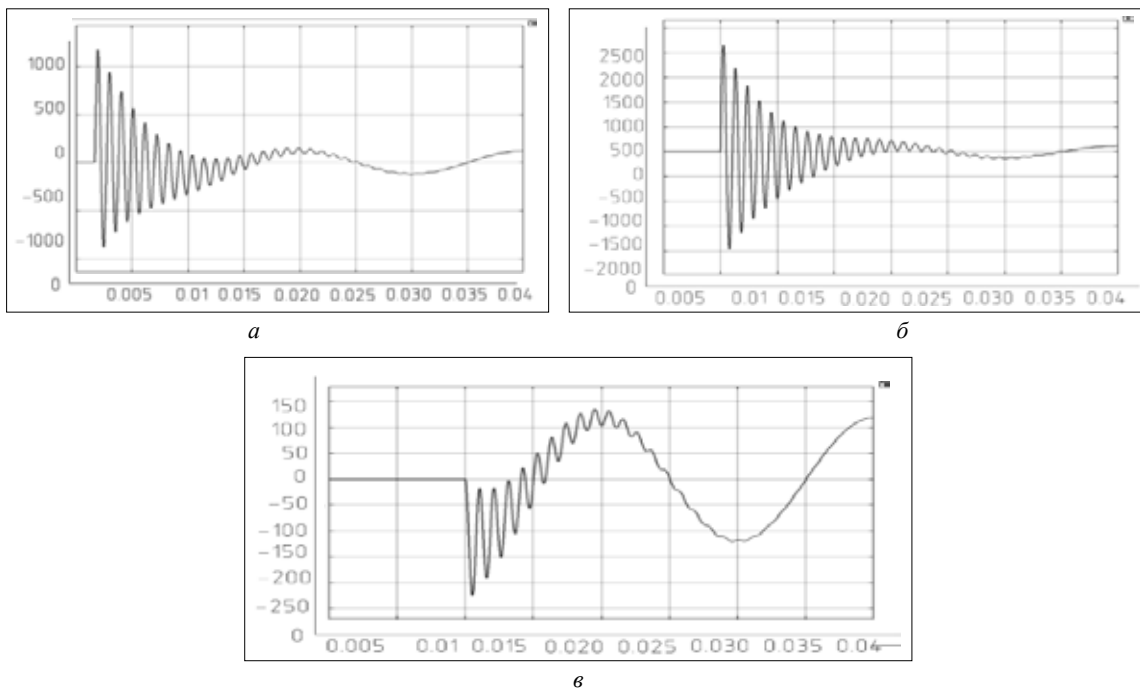


Рис. 4. Струм на конденсаторі (CurrentMeasurement 1) у моменти включення: (а) – 30 ел. град (0,005/3 с.); (б) – 90 ел. град (0,005 с.); (в) – 180 ел. град. (0,01 с.)

Звідки визначимо розрахункову формулу ємності конденсатора:

$$C = \frac{Q_c}{U_c^2 \cdot \omega C} = \frac{Q_c}{U_c^2 \cdot 2\pi f}$$

Отже, ємність конденсатора в даному випадку дорівнюватиме, мкФ:

$$C = \frac{Q_c}{U_c^2 \cdot 2\pi f} = \frac{3000 \cdot 10^3}{6000^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50} = 265.$$

Параметри блоків  $C_a$ ,  $C_b$ ,  $C_c$ :  $C = 265$  мкФ.

Параметри реактора обмежуючого струм  $L_a$ ,  $L_b$ ,  $L_c := 1$  мГн.

*Результати моделювання.*

Однчасне вмикання конденсаторів (0,01с): Внаслідок комутації конденсатора на конденсаторі (рис. 6, а) виник значний кидок струму (580 % від номінального значення).

Також можна побачити чітко виражену несинусоїдність струму, що свідчить про наявність гармонік (рис. 6, б). Наявність останніх є вкрай небажаним [12]. Аналізуючи гармонійний ряд для фази А ( $I_{a3}$ ) (див. рис. 6, б), можна зробити висновок, що найбільш значущими по амплітуді є гармоніки під номерами 5, 7 та 11. Коефіцієнт несинусоїдності під кінець перехідного процесу знаходиться не в межах норми та складає 17,63 %.

Послідовне включення конденсаторів

Внаслідок комутації конденсатора на конденсаторі (рис. 7, а) виник значний кидок струму (180 % від номінального значення).

Також можна побачити чітко виражену не синусоїдність струму, що свідчить про наявність гармонік (рис. 7, б). Наявність останніх є вкрай небажаним [12]. Аналізуючи гармонійний ряд для фази А ( $I_{a3}$ ) (див. рис. 7, б), можна зробити висновок, що найбільш значущими по амплітуді

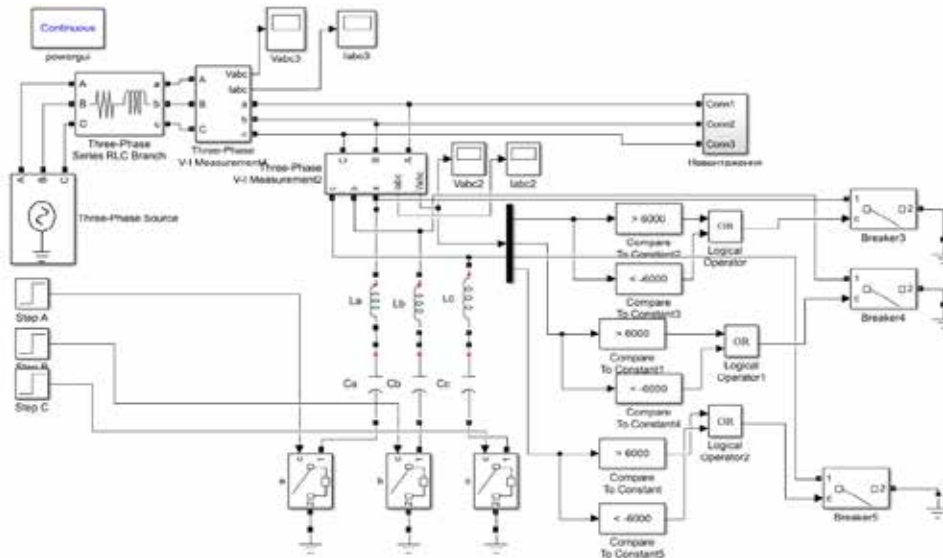
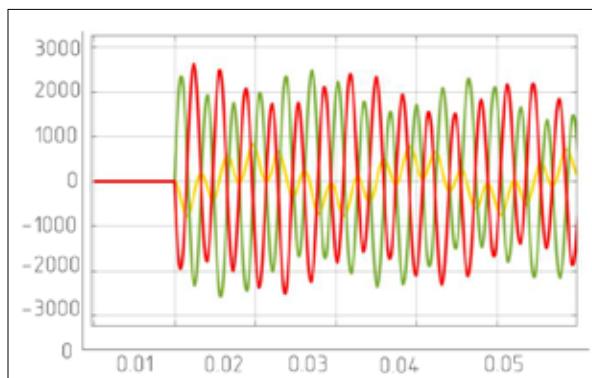
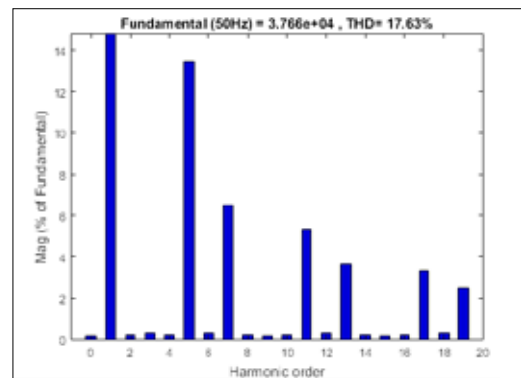


Рис. 5. Модель для дослідження варіантів комутації конденсаторних батарей



а



б

Рис. 6. Струм на конденсаторі (а) і гармонічні складові струму на лінії (б) при одночасному включенні конденсаторних батарей (фаза А-жовтий колір, В – зелений, С – червоний)

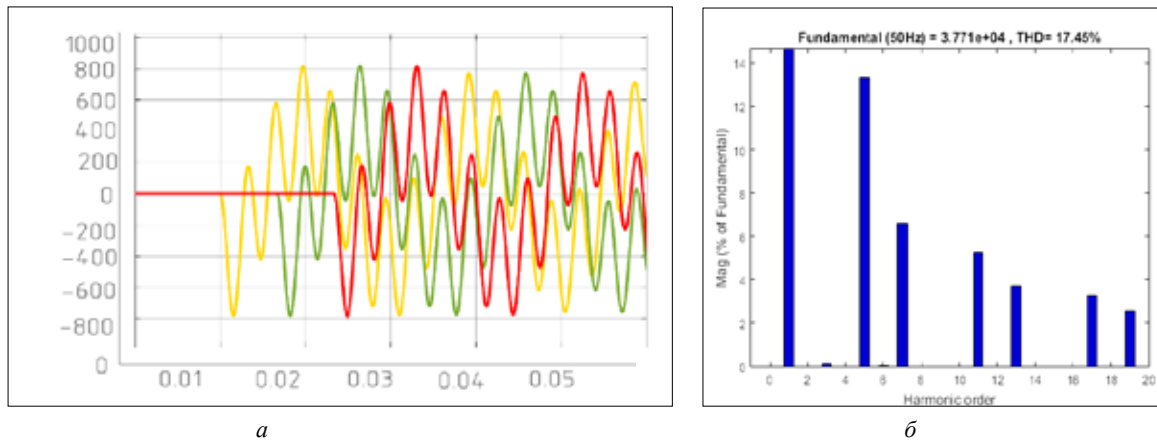


Рис. 7. Струм на конденсаторі (а) і гармонічні складові струму на лінії (б) при послідовному включенні конденсаторних батарей (фаза А-жовтий колір, В – зелений, С – червоний)

є гармоніки під номером 5, 7 та 11. Також, у порівнянні з одночасним включенням батарей, відсутні парні гармоніки, кожна з яких досягала значення до 0,5%. Коефіцієнт не синусоїдності під кінець перехідного процесу трохи зменшився і становить 17,45%.

Проведемо моделювання вмикання ступенів конденсаторних батарей кожної фази за наступним алгоритмом: вмикання першої ступені батареї – вмикання першої половини навантаження ( $P=2500\text{кВт}$ ,  $Q=1450\text{кВар}$ ) – комутація другої ступені – вмикання другої частини навантаження ( $P=6000\text{кВт}$ ,  $Q=1450\text{кВар}$ ). Інші параметри

моделі аналогічні попереднім. Слід зазначити, що дана логіка вмикання по черговому вмикання ступенів конденсаторних батарей і навантаження застосовується на комбінаті.

Одночасне вмикання конденсаторів (0,01с та 2,01с): Внаслідок комутації конденсатора на конденсаторі (рис. 9, а) виникли значні кидки струму (560% від номінального значення – під час комутації першої ступені; 570% від номінального значення – під час комутації другої).

Про наявність гармонік свідчить гармонійний аналіз струму (рис. 9, б). Аналізуючи гармонійний ряд для фази А ( $I_{a3}$ ) (див. рис. 9, б), можна зробити

### Увімкнення ступенів конденсаторних батарей

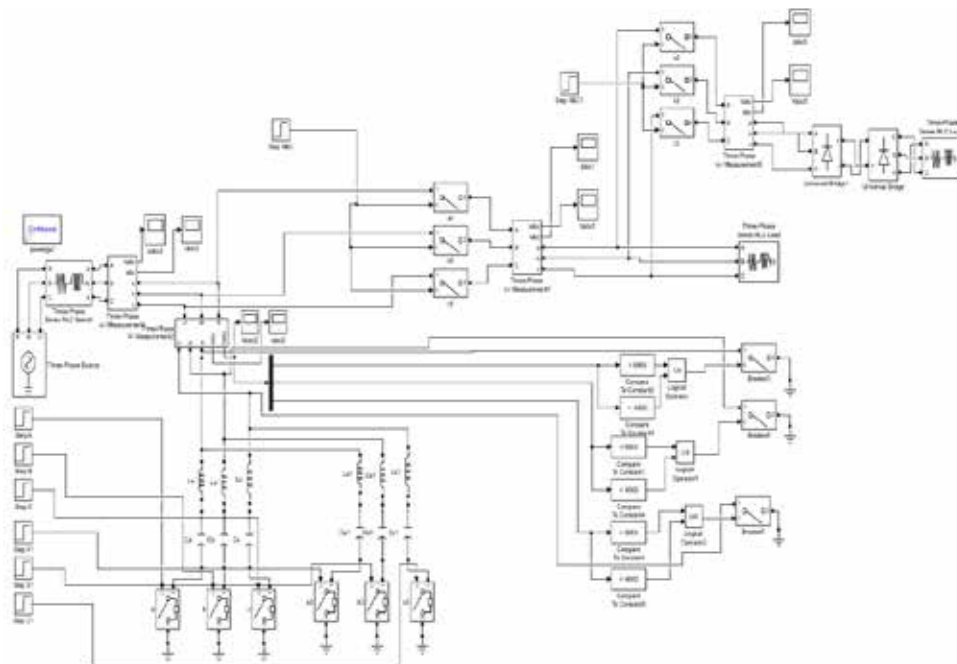


Рис. 8. Модель для дослідження варіантів комутації ступенів конденсаторних батарей у програмному забезпеченні MatlabSimulink

висновок, що найбільш значущими по амплітуді є гармоніки під номерами 5, 7 та 11. Коефіцієнт несинусоїдності під кінець перехідного процесу знаходиться не в межах норми та складає 10,44%.

У порівнянні з одноступеневим варіантом моделі (рис. 5) такий спосіб підключення навантаження та конденсаторних батарей дозволяє приблизно на 10% зменшити початковий кидок струму на конденсаторі. Коефіцієнт несинусоїдальності зменшився майже на 7%, а амплітуди кожної з гармонійних складових – в середньому на 2%.

Послідовне вмикання конденсаторів

Внаслідок комутації конденсатора на конденсаторі (рис. 10, а) виникли незначні кидки струму (97% від номінального значення – під час комутації першої ступені; 146% від номінального значення – під час комутації другої).

Про наявність гармонік свідчить гармонійний аналіз струму (рис. 10, б). Аналізуючи гармонійний ряд для фази А (Ia3) (див. рис. 10, б), можна зробити висновок, що найбільш значущими по амплітуді є гармоніки під номерами 5, 7 та 11. Коефіцієнт несинусоїдності під кінець перехідного процесу знаходиться не в межах норми та складає 10,23%.

У порівнянні з одноступеневим варіантом моделі (рис. 5) такий спосіб підключення навантаження та конденсаторних батарей дозволяє на 40–80% зменшити початковий кидок струму на конденсаторі. Коефіцієнт несинусоїдальності зменшився майже на 7%, а амплітуди кожної з гармонійних складових – в середньому на 2%.

Послідовна комутація конденсаторних батарей кожної фази у випадку комутації батарей ступенями дозволяє значно зменшити початкові кидки струму на 400%. Коефіцієнт несинусоїдальності зменшився на 0,2%.

В результаті моделювання можна зробити висновки, що почергове включення фаз трифазної мережі дозволить майже в 2 рази зменшити початковий кидок струму на лінії і майже в 3 рази в конденсаторі. Ще однією перевагою почергової комутації є те, що такий спосіб дозволяє трохи зменшити спотворення синусоїди. Таким чином, комутація конденсаторних установок призводить до наявності як гармонік струму, так і напруги, причому як показують результати досліджень, вони можуть значно впливати на параметри мережі.

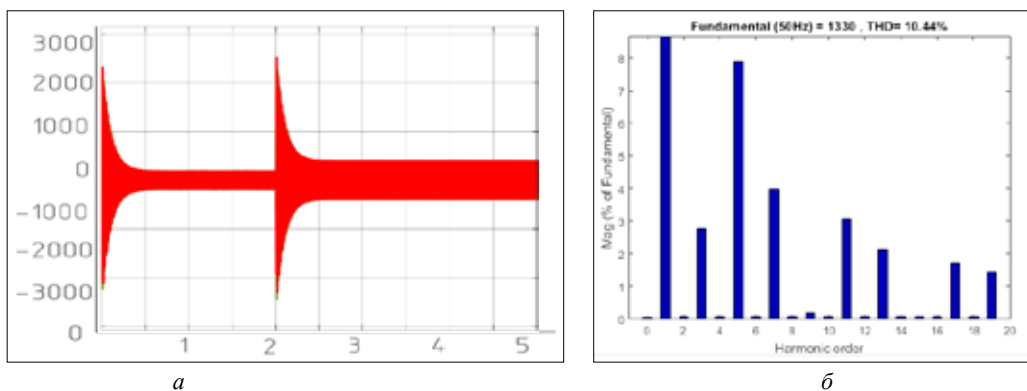


Рис. 9. Струм на конденсаторі на 5-секундному проміжку (а) і гармонічні складові струму на лінії під кінець перехідних процесів (б) при одночасному включенні конденсаторних батарей

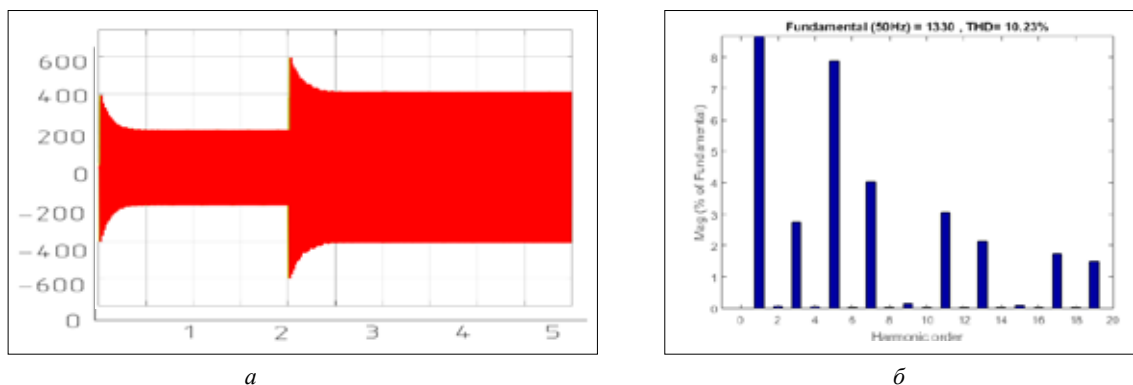
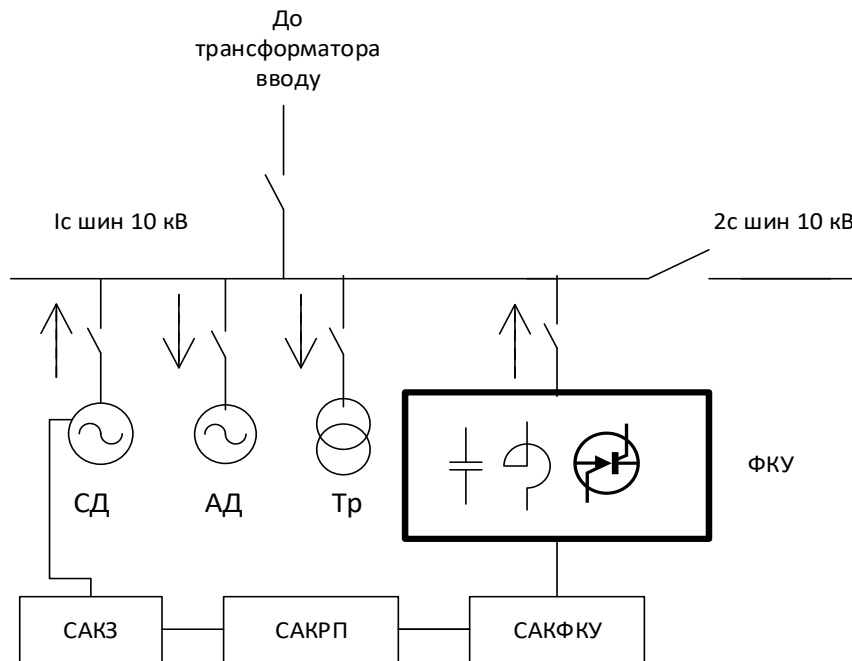


Рис. 10. Струм на конденсаторі на 5-секундному проміжку (а) і гармонічні складові струму на лінії під кінець перехідних процесів (б) при послідовному включенні конденсаторних батарей





**Рис. 11. Структурна схема системи керування реактивною потужністю (САКРП):**

САКЗ – система автоматичного керування збудженням СД;  
САКФКУ – система автоматичного керування щаблями ФКУ

Наявність гармонік є вкрай небажаним явищем, яке необхідно усунути. Виходячи з результатів моделювання, вибір гармонік для їхнього подальшого погашення слід вибирати виходячи з методу комутації конденсаторних батарей.

Пропонується структура системи автоматизованого керування збудженням СД та переключенням щаблів ФКУ для компенсації реактивної потужності в середині мережі підприємства у функції балансу її потоків між споживачами (двигуни АД, трансформаторами) та від ФКУ та СД, напрямки цих потоків показані на рис. 11.

Перспективні напрями досліджень.

Як варіанти для подальших досліджень у цій темі можливо, наприклад, розробка алгоритмів для регулятора реактивної потужності; дослідження варіантів гасіння перенапруг при комутації енергоємних споживачів.

#### Висновки

1. На підставі добових графіків споживання реактивної потужності потужних підстанцій підприємства ПрАТ «ПівніГЗК», існуючих розрахункових тарифів, запропоновано методику вибору потужності компенсуючих пристроїв, що забезпечує мінімальну плату підприємства за реактивну потужність.

2. Для підстанцій, що мають потужне технологічне обладнання з синхронними двигунами, запропонований спосіб підвищення енергоефек-

тивності внутрішніх та зовнішніх мереж, здійснюючи компенсацію реактивної потужності за допомогою цих СД. Зазначений спосіб захищений патентом України.

3. Проведено моделювання та розглянуто різні варіанти комутації конденсаторних установок з метою оцінки їх негативного впливу на мережу живлення.

4. В результаті моделювання можна зробити висновки, що почергове включення фаз у трифазній мережі дозволить майже в 2 рази зменшити початковий кидок струму на лінії та майже в 3 рази на конденсаторі. Ще однією перевагою почергової комутації є те, що такий спосіб дозволяє зменшити спотворення синусоїди. Визначено раціональний момент включення (перемикання) конденсаторних установок, що забезпечує найкращі показники параметрів мережі. Цей момент – момент переходу графіка струму через нуль. При цьому знижується вплив вищих гармонійних на параметри мережі живлення. Дослідження на моделі підтверджують це.

5. Запропоновано структуру системи автоматизованого керування збудженням СД, та переключенням щаблів ФКУ для компенсації реактивної потужності в середині мережі підприємства у функції балансу її потоків між споживачами (двигуни АД, трансформаторами) і від ФКУ та СД.

Список літератури:

1. Патент № 141771 Україна. Способ повышения энергоэффективности технических систем технологических агрегатов с синхронными приводами путём регулирования их реактивной мощности / Кочубей А.И., Осадчук Ю.Г., Козакевич И.А., Шерстньов Ю.В. и т.д. Опубл. 27.04.2020. Бюл. № 8.
2. Ключев Р. В., Босиков И. И., Гаврина О. А., Ляшенко В. И. Оценка эксплуатационной надежности электроснабжения развивающихся участков добычи руд на высокогорном руднике. *Горные науки и технологии*. 2021;6(3):211–220. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-3-211-220>.
3. Bornschlegl 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.
4. 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.
5. 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.
6. Buryanina N., Korolyuk Yu., Koryakina M., Suslov K., Lesnykh E. Four Samples Method for the Selection of Sinusoidal Components Parameters of Power System Emergency Mode. *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. Vladivostok, Russia, 1–4 October 2019. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934775.
7. Усманова Т.Х., Исаков Д.А. Актуальные вопросы энергоэкономических затрат добывающей промышленности. *Горная промышленность*. 2018. № 6 (142). С. 30–33.
8. Kupin, A., & Senko, A. (2015). Principles of intellectual control and classification optimization in conditions of technological processes of beneficiation complexes. *CEUR Workshop Proceedings*, (1356), pp. 153–160.
9. 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 grid systems. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 5(8(89)), pp.4-9.
10. Патент № 151007 Україна. Пристрій для підвищення енергоефективності технічних систем технологічних агрегатів з синхронними приводами / Осадчук Ю.Г., Кузнєцов Д.І., Калдарарь О.П., Купін А.І., Козакевич І.А., Учитель О.Д. та ін. Опубл. 25.05.2022. Бюл. № 21.
11. Niculescu, T., Arad, V., Marcu, M., Arad, S., & Popescu, F.G. (2020). Safety barrier of electrical equipment for environments with a potential explosion in underground coal mines. *Mining of Mineral Deposits*, 14(3), P. 78–86. <https://doi.org/10.33271/mining14.03.078>
12. Тарабин И.В., Скоков Р.Б., Терехин И.А., Горбачев С.А. Компенсация реактивной мощности как метод повышения качества электрической энергии и сокращения потерь на примере данных «МРСК СИБИРИ». *Фундаментальные исследования*. 2015. № 2 (ч. 22). С. 4876–4879.
13. Железко Ю.С. К вопросу автоматизации управления потоками реактивной мощности в системах электроснабжения. *Вестник Иркутского государственного технического университета*, 2018 / Том 22, № 7 (138) 2018. М. : Энергоатомиздат, 2018. С. 123-146.
14. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. М. : Энергоатомиздат, 2000. 252 с.
15. Надёжность и качество электроснабжения предприятий / Александров Д. С., Щербаков Е. Ф. Ульяновск : УЛГТУ, 2010. 155 с.
16. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий. М. : Энергоатомиздат. 2000. 331 с.
17. Сапрыка А.В. Повышение энергоэффективности осветительных комплексов с учётом качества электрической энергии : монография. Харьков : ХНАМГ, 2009. 126 с.

**Kupin A.I., Osadchuk Yu.G., Savytsky O.I., Sherstnov Yu.V.**

**ENHANCEMENT OF THE VOLTAGE SUPPLY QUALITY OF SUBSTATIONS AT MINING AND PROCESSING PLANTS**

*The article aims to substantiate application of new approaches to enhance the quality of voltage supply and current of substations at mining and processing plants along with improvement of switching-on/off processes of the filter compensating device.*

*There is performed a technological audit of enhancement of voltage supply efficiency of substations at mining and processing plants. The results of experimental researches are analyzed and generalized applying new and standard techniques. Based on the obtained results of switching-on/off processes of the filter compensating device are simulated applying Matlab Simulink to determine their negative effect on the power grid parameters and switchers life cycle.*

*Various options of switching capacitor units of filter compensating devices (FCD) are simulated and considered to evaluate their negative effect on the power network. Methods of correcting FCD power parameters are suggested to provide the enterprise's minimum payment for reactive power considering consumers' actual loading modes.*

*To enhance the quality of power network parameters, filter compensating devices are widely used to compensate for the reactive power and filter components of harmonic parameters of the power network. Switching of capacitor units often leads to significant voltage and current exceeding and their life cycle reduction resulting in additional losses. Therefore, examination of the filter compensating devices operation to enhance the quality of voltage supply of substations at mining and processing plants is of great scientific importance and practical value.*

*The work presents main scientific and practical results to substantiate the enhancement of the voltage supply and current of substations at mining and processing plants. Simulation enables determining a rational moment considering the inertia of the switchers, capacitor unit switching that provides the best of power grid parameters. This moment denotes the phase current graph crossing zero at the lowest possible load. At the same time, the effect of the higher harmonics on power network parameters reduces and the life cycle of the switchers increases.*

**Key words:** *mining and processing plants, power network, quality of power network parameters, energy efficiency.*