

ної роботи та порівняння отриманих результатів з «еталонною» моделлю[7]. Для професії прохідника було визначено найважливіші з позиції біомеханіки елементи професійної діяльності наприклад, зачистка лунки (канавки) під встановлення стійки рамного кріплення.

Висновки і розвиток подальших досліджень.

1. Проведено дослідження та аналіз виробничого травматизму на АТ «Кривбасзалізрудком» з 2012 по 2019 роки. Встановлено що, в цілому, виробничий травматизм, не зважаючи на заходи попередження, присутній, знаходиться у незадовільному стані і потребує додаткових заходів для його недопущення. Як один з критеріїв при цьому, може бути обрана кількість порушень правил безпеки, у тому числі порушень, що повторюються.

2. Аналіз системи навчання з охорони праці працівників на підземних роботах показав, що на даний момент система навчання має інформаційний характер і не містить елементів відпрацювання навичок виконання конкретних технологічних операцій.

3. Комп'ютерні навчальні та контролюючі програми з охорони праці, що використовуються, сприяють підвищенню ефективності навчання. Водночас існуючі програми дозволяють тільки підвищити освітній рівень персоналу та не призначені для використання при відпрацюванні практичних навичок безпечних прийомів праці.

4. Для навчання та контролю наявності у підземного персоналу необхідних навичок безпечного виконання основних робіт може бути використана техніка візуалізації кінематики рухів.

Список літератури

1. ДСТУ OHSAS 18001:2010 Системы управления гигиеной и безопасностью труда. Требования (OHSAS 18001:2007, IDT) http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id_doc=27641.
2. Статистичний звіт виробничого травматизму АТ «Кривбасзалізрудком» 2020р.- 27с.
3. Звіт АТ «Кривбасзалізрудком» для захисту виробничої програми 2020 р.- 54с.
4. НПАОП 0.00-4.12-05. Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці (33829) <https://dnaop.com/html/33829/doc-0.00-4.12-05>
5. Програма підвищення ефективності системи охорони праці, промислової безпеки і охорони довкілля. Погоджена Правлінням комбінату АТ «Кривбасзалізрудком. 2018. 61с.
6. **Гришина А.М.** Предупреждение производственного травматизма на угольных шахтах на основе усовершенствования процедур обучения и контроля. Диссертация на соискание научной степени. – Санкт-Петербург, 2016. – 99с.
7. Raptor-4 Specifications – Biotech <http://www.biotechindia.net>.
8. Xsens - Sport Pro System <https://sportprosystems.ru> > xsens.
9. Системы Vicon .Digital Cinema Ukraine. <https://film.ua> > news.
10. AnyBody Modeling System Floating License софт <https://www.syssoft.ru/AnyBody-Technology/AnyBody-Modeling-System-Floating-License>.
11. Биомеханика ТРАСТ-М <http://www.neurocor.ru>

Рукопис подано до редакції 30.09.2022

УДК 621.311

Ю.Г. ОСАДЧУК, О.І. САВИЦЬКИЙ, кандидати техн. наук, доценти,
А.І. КУПІН, д-р техн. наук, проф., Ю.В. ШЕРСТНЬОВ, студент, магістрант
Криворізький національний університет

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ НАПРУГИ ЖИВЛЕННЯ ПІДСТАНЦІЙ ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНИХ КОМБІНАТІВ

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

Методи досліджень. 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.

Наукова новизна. 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.

Практична значимість. 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.

Результати. 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, перемикання 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.

doi: 10.31721/2306-5451-2022-1-55-39-45

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Якість електричної енергії значно впливає на технологічні процеси виробництва [4, 5]. Якість енергії може залежати у свою чергу як від постачальника енергії, так і від характеру навантаження споживача [6, 7] і нормується державним стандартом. Показники якості електроенергії для мереж середньої та високої напруги, методи випробування та інші характеристики якості електроенергії наведені у ДСТУ EN 50160:2014. Наявність у мережі гармонійних складових на об'єкті дослідження зумовлена характером приводної техніки тяглового обладнання електровозів та перетворювачів приводів конвеєрів з асинхронними двигунами 800-1000 кВт. Активна складова потужності корисно використовується, перетворюючись на механічну, світлову та інші види енергії. Навантаження в промислових мережах зазвичай має також індуктивний характер, що викликає споживання крім активної потужності істотної частки реактивної потужності. У зв'язку з цим споживана збільшена повна потужність, яка містить також гармонійні складові, призводить до наступного [2, 10, 11]: збільшення плати постачальнику електроенергії; додаткові втрати у провідниках внаслідок збільшення струму та, отже, зменшення пропускної спроможності мереж; завищення потужності трансформаторів та перетину кабелів, відхилення напруги мережі від номіналу; зниження якості електроенергії.

Аналіз 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. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии [5] та Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях [6].

Постановка задачі. За даними зарубіжних досліджень, втрати країн Європи від неякісної електричної енергії щорічно досягають десятки млрд. євро. Збитки від неякісної електричної енергії мають тенденцію щорічного зростання (у США, наприклад, останні десять років вони подвоїлися). Аналогічних даних щодо України нині немає.

Одним із простих та дешевих способів усунення недоліків мереж є компенсація реактивної потужності шляхом підключення конденсаторів у різних точках мережі. Найбільш ефективними пристроями компенсації є автоматичні установки компенсації реактивної потужності (АК-РМ), які дозволяють автоматично максимально зрівнювати споживану та реактивну потужність, що виробляється в системі. Крім того, застосування потужних напівпровідникових перетворювачів для регулювання параметрів електродвигунів призводить до появи вищих гармонійних та негармонічних складових напруги та струму мережі. Тому зараз часто застосовуються фільтро-компенсуючі пристрої (ФКУ), що виконують функції компенсації реактивної потужності та фільтрації складових параметрів електромережі. 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.

Викладення матеріалу та результати. Проведемо моделювання підключення конденсатора в однофазній синусоїдальній системі в різні моменти часу для визначення оптимального моменту комутації. 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: $L=25\text{ мкГн}$; $C = 1\text{ мФ}$.

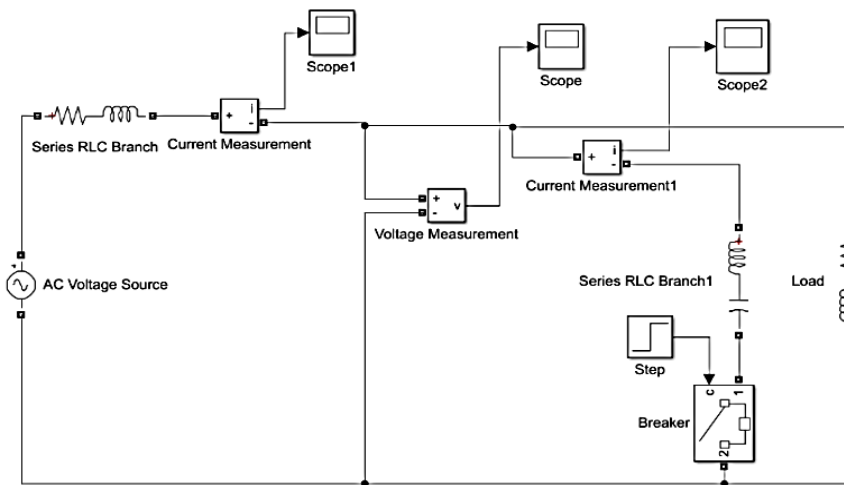


Рис. 1. Модель системи підключення конденсатора в однофазній синусоїдальній мережі в програмному забезпеченні MatlabSimulink

Дана модель дозволить імітувати комутацію конденсаторної батареї у різні моменти часу, внаслідок чого відбуваються зміни струму на лінії (рис.2а, б, в), струму на конденсаторі (рис.3а, 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.).

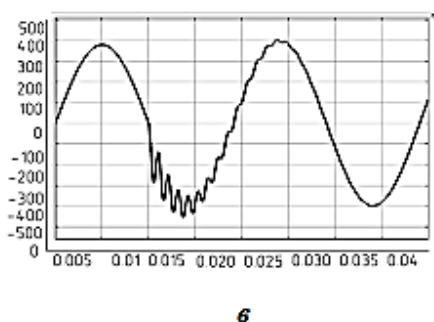
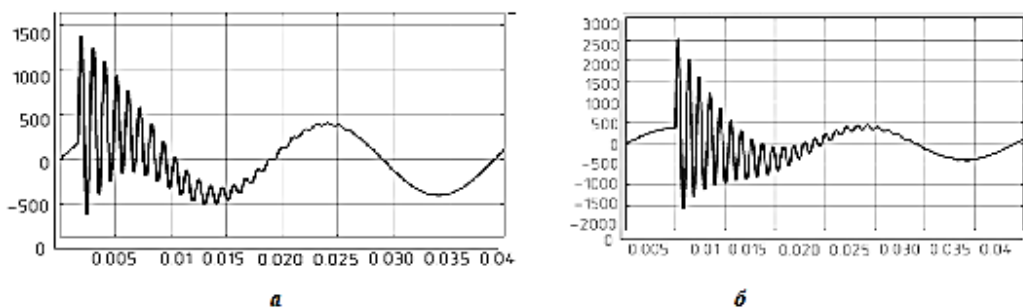


Рис. 2. Струм на лінії (CurrentMeasurement) в моменти включення: а - 30 ел. град (0,005/3 с.); б - 90 ел. град (0,005 с.); в - 180 ел. град. (0,01 с.)

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.

Аналіз отриманих графіків струму на лінії: 30 ел. град (0,005/3 с.). В результаті комутації конденсатора на лінії виник значний кидок струму (рис. 2а), 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. 2б), який порівняно з попереднім випадком (рис. 2а) значно більший. Після кидка почався загасаючий коливальний процес. Кидок струму становить 500% від номінального значення, час згасання процесу – 0,03с; 180 ел. град. (0,01 с.). В результаті комутації конденсатора на лінії не виникло значних кидків струму (рис. 2в).

Аналіз отриманих графіків струму на конденсаторі: кидок струму становить близько 1000% від номінального значення, час згасання процесу – 0,03 с. 30 ел. град (0,005/3 з.) (див. рис.3а); 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.3б). 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 (амплітудою до 150%) у порівнянні з попередніми випадками (див. рис.3а, 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:

Навантаження Three-PhaseSeriesRLCLoad P=8,50МВт; Q=2,87МВАр; Three-PhaseSource: U=6кВ; f=50 Гц; Three-PhaseSeries RLC Branch: R=1мкОм; L=1мкГн.

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

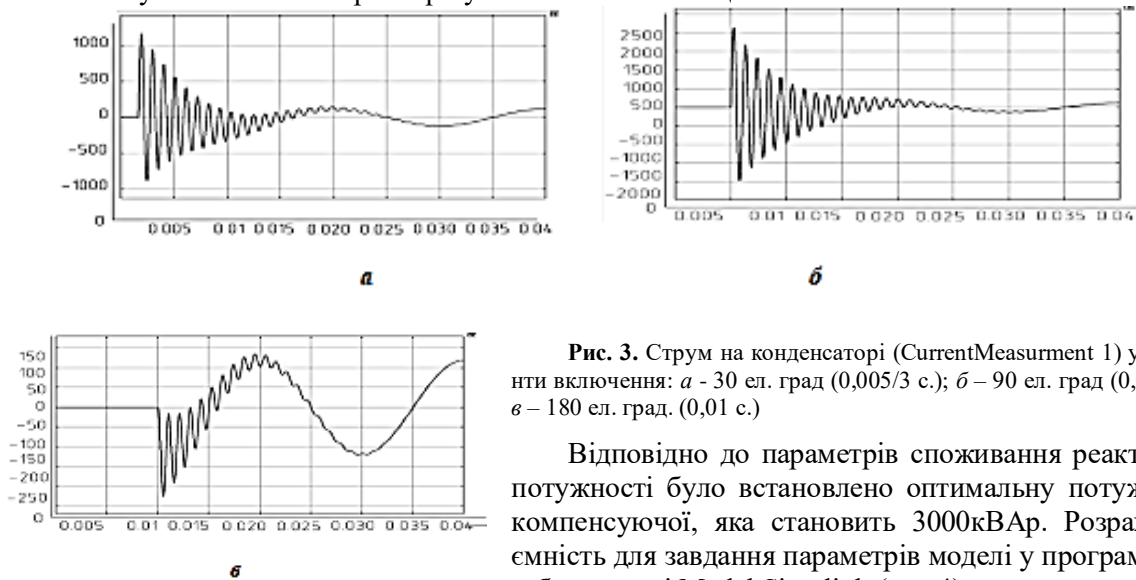


Рис. 3. Струм на конденсаторі (CurrentMeasurement 1) у моменті включення: а - 30 ел. град (0,005/3 с.); б - 90 ел. град (0,005 с.); в - 180 ел. град. (0,01 с.)

Відповідно до параметрів споживання реактивної потужності було встановлено оптимальну потужність компенсуючої, яка становить 3000кВАр. Розраховуємо ємність для завдання параметрів моделі у програмному забезпеченні MatlabSimulink (рис.4)

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

Підставимо у формулу (1) значення реактивного опору конденсатора

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

Отримуємо

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

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 : $L_c=1$ мГн.

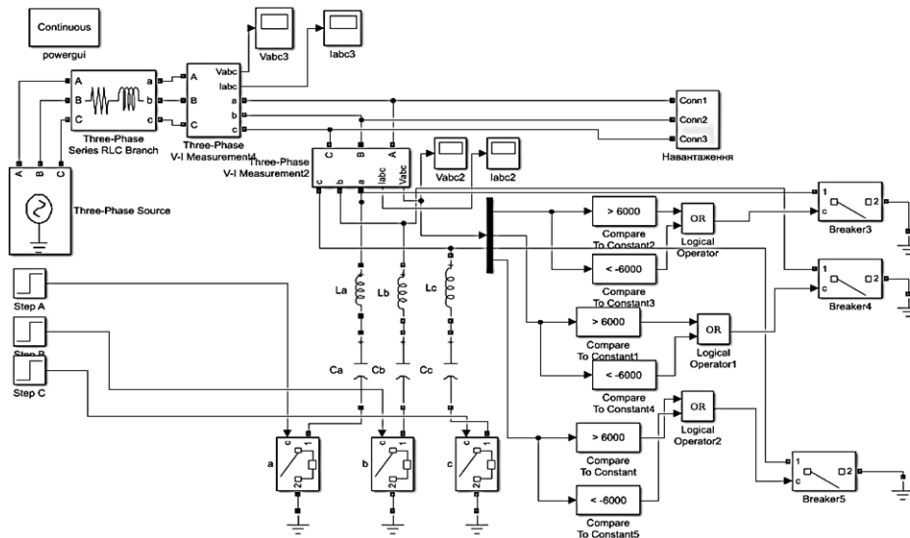


Рис.4. Модель для дослідження варіантів комутації конденсаторних батарей

Одночасне вмикання конденсаторів (0,01с): Внаслідок комутації конденсатора на конденсаторі (рис.5а) виник значний кидок струму (580% від номінального значення).

Також можна побачити чітко виражену несинусоїдність струму, що свідчить про наявність гармонік (рис.5б). Наявність останніх є вкрай небажаним [12]. Аналізуючи гармонійний ряд для фази А (Ia3) (див. рис.5б), 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%.

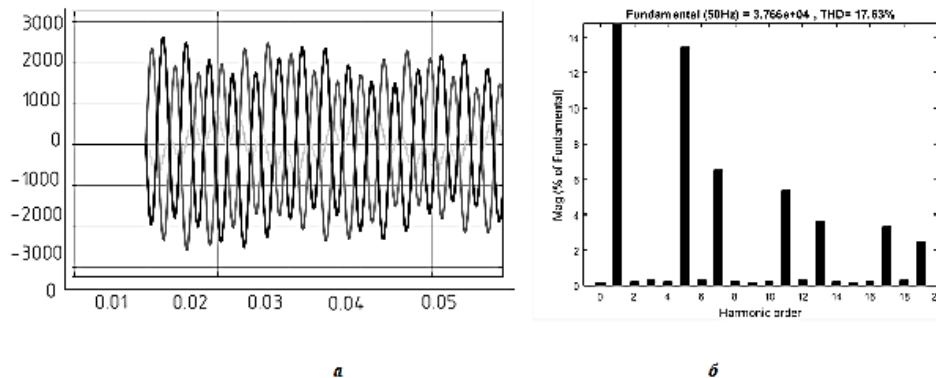


Рис.5. Струм на конденсаторі (а) і гармонічні складові струму на лінії (б) при одночасному включенні конденсаторних батарей (фаза А-жовтий колір, В – зелений, С – червоний)

Внаслідок послідовної комутації конденсатора на конденсаторі (рис.6 а) виник значний кидок струму (від номінального значення 180%).

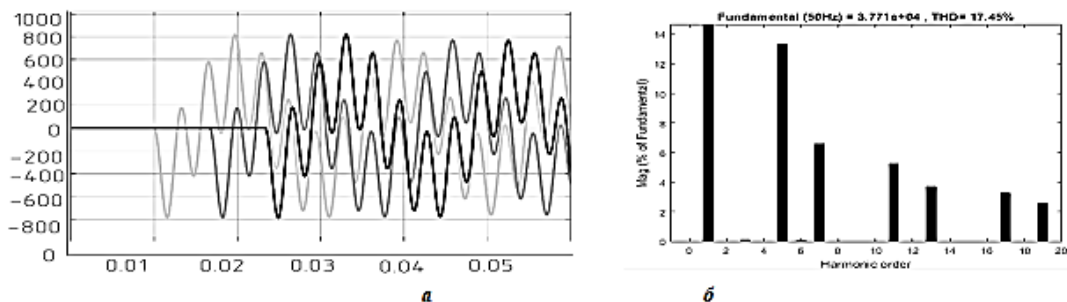


Рис. 6. Струм на конденсаторі (а) і гармонічні складові струму на лінії (б) при послідовному включенні конденсаторних батарей (фаза А-жовтий колір, В – зелений, С – червоний)

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 (Ia3) (див. рис.6 б), можна зробити висновок, що найбільш значущими по амплітуді 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 несинусоїдності під кінець перехідного процесу трохи зменшився і становить 17,45%.

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. Комутація конденсаторних установок призводить до наявності гармонік струму, і напруги, причому як показують результати досліджень, можуть робити значний вплив на інші параметри мережі.

Висновки і напрямок подальших досліджень. Для подальших досліджень у цій темі можливо, наприклад, розробка алгоритмів варіантів зменшення перенапруг при комутації енергоємних споживачів. Дотримання усіх вимог цих алгоритмів дає можливість зменшення часу розвантаження підстанції для комутації ФКУ і відповідно збільшити час продуктивної роботи фабрики. Виконано моделювання та розглянуто різні варіанти комутації конденсаторних установок з метою оцінки їх негативного впливу на мережу живлення. Почергове включення фаз у трифазній мережі дозволить майже вдвічі зменшити початковий кидок струму на лінії та майже втричі в конденсаторі. Ще однією перевагою почергової комутації є те, що такий спосіб дозволяє зменшити спотворення синусоїди. Досліджено електромеханічні параметри вимикачів ФКУ та знайдено затримки часу для вибору раціонального моменту включення (перемикання) конденсаторних установок, що забезпечує найкращі показники параметрів мережі. Цей момент, як відомо, відповідає моменту переходу графіка струму через нуль. При цьому знижується вплив вищих гармонічних на параметри мережі живлення. Це підтверджено дослідженнями моделі. Визначено оптимальні параметри таймерів включення та відключення (зону нечутливості) ФКУ в момент скидання навантаження. Це дозволило збільшити життєвий цикл роботи вимикачів та конденсаторів.

Список літератури

1. **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.
2. **Kupin, A., Vdovichenko, I., Muzyka, I., & Kuznetsov, D.** (2017). Development of an intelligent system for the prognostication of energy produced by photo volt aiccells in smart grid systems. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 5(8(89)), 4-9
3. **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>
4. **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>
5. **Железко Ю.С.** Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии - М.: Энергоатомиздат, 1985. -224с.
6. **Жежеленко И.В.** Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. - М.: Энергоатомиздат, 1986. -168с.
7. **Пучков Л. А., Пивняк Г. Г.** (ред.) Электрификация горного производства. В 2-х томах. М: Изд-во Московского государственного горного университета; 2007.
8. **Абрамович Б.Н.** Система бесперебойного электроснабжения предприятий горной промышленности // Записки Горного института. 2018. Т.229.С.31-40. DOI:10.25515/PMI.2018.1.31
9. **Bornschlegl 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>
10. **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>.
11. **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.
12. **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.
13. **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.
14. **Jacques Delaballe** Электромагнитная совместимость. Библиотека электрика (Публикации компании "Шнейдер Электрик"), вып.11.-К.: ДИА, 2010. -48с

Рукопис подано до редакції 03.10.2022