**МОДЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ З ВИЯВЛЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ РЕЖИМІВ
ФУНКЦІОНУВАННЯ ГОЛОВНИХ ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ УСТАНОВОК ШАХТ****І. О. Сінчук, І. І. Пересунько, А. Б. Сьомочкин**

Криворізький національний університет

вул. Віталія Матусевича, 11, м. Кривий Ріг, 50027, Україна.

E-mail: olegovich.s@knu.edu.ua, i.peresunko@knu.edu.ua, a.syomochkyn@knu.edu.ua

У роботі проведено аналіз системи та методів пуску синхронних електричних двигунів вентиляторів головного провітрювання залізрудних шахт. Зроблено висновок про необхідність модернізації методу пуску синхронного електричного двигуна, при тому, що встановлена система прямого пуску має ряд недоліків та негативно впливає на енергетичні показники електромеханічного комплексу вентилятора головного провітрювання шахт. Пріоритетним напрямком у вирішенні комплексу вище зазначених проблем є використання сучасних досягнень в області напівпровідникової перетворювальної техніки, в частині розвитку ефективних схем і способів пуску та керування синхронним електроприводом. Проведено моделювання прямої системи пуску синхронного електричного двигуна з вентиляторним навантаженням. При цьому було підтверджено ряд недоліків прямого пуску та визначено кількість спожитої енергії.

При розробці нової адекватної дослідницької моделі було удосконалено модель прямого пуску синхронного електричного двигуна з вентиляторним моментом встановлено підсистему для покрокової зміни величини напруги та частоти і отримано експериментальні дані для оцінювання енергоефективності варіативних методів пуску електроприводів синхронного електроприводу головних вентиляторних установок шахт. Проведено моделювання запропонованого методу пуску для синхронного електричного двигуна з вентиляторним моментом. Цей метод пуску дозволив позбавитись головного недоліку, а саме великого пускового струму та дозволив підвищити енергоефективність електромеханічного комплексу вентиляторів головного провітрювання за рахунок того, що спожита активна енергія при пуску зменшується приблизно на 50 % в порівнянні з прямою системою пуску.

Ключові слова: енергоспоживання, керування, гірничорудні підприємства, вентилятори головного провітрювання, синхронні електричні двигуни.

**МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ВЫЯВЛЕНИЮ ЭНЕРГОЭФЕКТИВНЫХ РЕЖИМОВ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГЛАВНЫХ ВЕНТИЛЯТОРНЫХ УСТАНОВОК ШАХТ****И. О. Синчук, И. И. Пересунько, А. Б. Сьомочкин**

Криворожский национальный университет

ул. Виталия Матусевича, 11, г. Кривой Рог, 50027, Украина.

E-mail: olegovich.s@knu.edu.ua, i.peresunko@knu.edu.ua, a.syomochkyn@knu.edu.ua

В работе проведен анализ системы и методы пуска синхронных электродвигателей вентиляторов главного проветривания железорудных шахт. Сделан вывод о необходимости модернизации метода пуска синхронного электродвигателя, при том, что установленная система прямого пуска имеет ряд недостатков и негативно влияет на энергетические показатели электромеханического комплекса вентилятора главного проветривания шахт. Приоритетным направлением в решении комплекса вышеуказанных проблем является использование современных достижений в области полупроводниковой преобразовательной техники, в части развития эффективных схем и способов пуска и управления синхронным электроприводом. Проведено моделирование прямой системы пуска синхронного электрического двигателя с вентиляторной нагрузкой. При этом было подтверждено ряд недостатков прямого пуска и определено количество потребленной электроэнергии.

При разработке новой адекватной исследовательской модели было усовершенствовано модель прямого пуска синхронного электродвигателя с вентиляторным моментом, установлено подсистему для пошагового изменения величины напряжения и частоты, получены экспериментальные данные для оценки энергоэффективного метода пуска электроприводов синхронного электропривода главных вентиляторных установок шахт. Проведено моделирование предложенного метода пуска для синхронного электрического двигателя с вентиляторным моментом на валу двигателя, при этом он позволил избавиться от главного недостатка, а именно, большого пускового тока и позволил повысить энергоэффективность электромеханического комплекса вентиляторов главного проветривания за счет того, что потребленная активная энергия при пуске уменьшится примерно на 50 % в сравнении с прямой системой пуска.

Ключевые слова: энергопотребление, управление, горнорудные предприятия, вентиляторы главного проветривания, синхронные электрические двигатели.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Підприємства гірничо-металургійної галузі України споживають електроенергії більше 50 % від всього загальнопромислового обсягу держави [1]. Згідно введення в дію з 2019 року [2] протоколу нового формату розрахунків між споживачами електричної енергії (ЕЕ) та енергогенеруючими організаціями,

підприємства галузі, враховуючи нові важелі в зазначеній системі, змушені проводити активний пошук та впроваджувати в практику своєї роботи нові енергоорієнтовані заходи щодо зменшення енергетичного пресу.

Залізрудні підприємства з підземними способами видобутку залізрудної сировини (ЗРС) є

унікальними енергоємними виробництвами зі значним особистим енергетичним потенціалом щодо підвищення енергоефективності видобутку даного виду корисних копалин. Ця специфіка відрізняє дані види підприємств навіть від своїх найближчих аналогів – вугільних та сланцевих шахт [3–5]. Пов'язана ця специфіка з існуючою технологією видобутку ЗРС. Згідно структури їх функціонування в технологічному процесі задіяно незначна кількість (не більше 5-ти) енергоємних споживачів, котрі водночас споживають більше 80 % електроенергії всієї шахти [6]. В свою чергу, біля 30 % від цього обсягу споживають вентилятори головного провітрювання (ВГП) шахт. Встановлені електромеханічні комплекси ВГП залізрудних шахт, як правило містять 2 агрегати з синхронними електродвигунами (СД), потужність яких сягає від 600 до 1600 кВт [10].

В теперішньому варіанті частка витрат на провітрювання в собівартості залізрудної продукції досягає 25 % і ця цифра в потенціалі буде збільшуватись відповідно до тенденції зростання тарифів на електричну енергію і збільшення глибини видобутку ЗРС у шахтах [1]. Тому вдосконалення електромеханічних комплексів ВГП для підприємств гірничої промисловості в енергоекономічному спрямуванні є питанням актуальним. Саме ці установки, є одними з найважливіших елементів забезпечення безпеки життєдіяльності гірників при роботі в підземних виробках шахт. В силу цих і ряду інших технічних обставин проведення експериментальних досліджень в умовах діючих установок ВГП вкрай обмежено, а нерідко взагалі заборонено правилами безпеки та технічної експлуатації [7].

В такій ситуації на чергу денну в процесі дослідження виходить моделювання. В умовах сучасних дослідницьких аспектів досяжність результатів методами моделювання, з максимальним наближенням їх до реалій, залежить від достовірності як вхідних даних, так і від рівня адекватності моделі. Саме в такому аспекті і проводились наведені далі по тексту дослідження.

Мета роботи – розробка адекватної дослідницької моделі та отримання достатньої за обсягом необхідної інформації з експертного оцінювання енергоефективності варіативних методів пуску електроприводів синхронного електроприводу головних вентиляторних установок шахт.

Згідно мети досліджень сформульовані наступні наукові задачі:

- превентивний вибір для модельних досліджень варіантів методів пуску СД приводів ВГП;
- створення дослідницької моделі;
- аналіз отриманих результатів та формування висновків.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Умови роботи електромеханічного комплексу ВГП залізрудних шахт характеризуються наявністю протяжних електричних мереж живлення та різноманітністю навантажувальних діаграм [8].

Тому формування енергоефективних пускових характеристик є однією з важливих задач в системі електроприводу ВГП гірничорудних підприємств. Між тим в умовах сьогодення в електромеханічних комплексах ВГП в більшості випадків встановлені синхронні електричні двигуни із застосуванням прямого способу пуску. Даний спосіб має ряд недоліків [9–11].

Все це створює проблеми для функціонування електромеханічного комплексу електропривода взагалі і СД в тому числі, а саме перегрів обмоток та порушення нормального режиму роботи мережі живлення через значні рівні просідання напруги в ній.

Можливості експлуатуємих в дійсний період часу існуючих систем регулювання синхронного електроприводу в напрямку мінімізації цих явищ обмежені, оскільки існуючий спосіб керування базується на системі збудження двигуна, тобто лише шляхом зміни величини статорної напруги, але не його частоти. Окрім цього існуюча система збудження СД енергетично малоефективна і громіздка [11, 14].

Як додатковий негативний додаток слід відзначити такий факт як компенсація реактивної потужності в мережах шахт, де високовольтні СД є основним методом для її компенсації.

Пріоритетним напрямком у вирішенні комплексу вище зазначених проблем є використання сучасних досягнень в області напівпровідникової перетворювальної техніки, що в частині розбудови відкриває потенціальні можливості побудови нових схем, способів пуску та керування синхронним електроприводом [12–15].

Характеристика навантаження на валу синхронного електричного двигуна виглядає наступним чином (структура підсистеми наведена на рис. 1):

$$M_{\text{вент}} = M_{\text{см}} + k\omega^2,$$

де $M_{\text{см}} = 0,05$ в.о., $k = 0,65$ (швидкість у відносних одиницях).

Рисунок 1 – Структура підсистеми формування вентиляторної характеристики навантаження

Збільшення цього моменту призведе до того, що синхронний двигун в асинхронному режимі не зможе втягнутися в синхронізм, тому що стала швидкість асинхронного ходу буде занадто мала ($\approx 0,9$ в.о.), і енергії втягування в синхронізм буде недостатньо – синхронна машина перейде в режим випадання із синхронізму.

На рис. 2 показана структура моделі для дослідження прямого пуску синхронного електродвигуна з вентиляторним моментом на валу.

Рисунок 2 – Структура моделі для дослідження прямого пуску синхронного електродвигуна з вентиляторним моментом на валу

При моделюванні в якості прикладу використано типовий СД потужністю $S_n = 1600$ кВт з лінійною напругою живлення 6600 В з наступними параметрами схеми заміщення: синхронним $X_d = 1,56$, перехідним $X'_d = 0,296$, і понад перехідним $X''_d = 0,177$ опорами синхронного електричного двигуна по осі d , а також синхронним і понад перехідним опорами $X_q = 1,06$, $X''_q = 0,177$ опорами СД по осі q і опором розсіювання статора $X_l = 0,052$ постійні часу демпферної обмотки по осі d : перехідна $T'_d = 3,7$ с, понад перехідним $T''_d = 0,05$ с, і понад перехідним по осі q постійна часу $T''_q = 0,05$ с, активним опором фази статора $R_s = 0,0036$ в.о.

Прямий пуск синхронного двигуна здійснюється від системи електропостачання (рис. 3) 25 кВ 1000 МВА через понижуючий трансформатор 25кВ/6600В 6 МВА з параметрами, що приведені на рис. 4.

Рисунок 3 – Вікно налаштувань системи електропостачання

Рисунок 4 – Вікно налаштувань трансформатора

В якості додаткових навантажень використовуються активні опори 5 МВт і 1 МВт, які покращують обчислювальний процес, не впливаючи на результати отримані при моделюванні.

До входу Vfl синхронного електричного двигуна підключені блоки, які в кінці асинхронного пуску здійснюють короткочасне збудження синхронної машини, для успішного втягування в синхронізм, і потім знижують рівень збудження до робочої величини.

Під час асинхронного пуску СД величина збудження дорівнює 0, відповідно коло обмотки збудження є замкнутим. Таким чином прямий пуск ділиться на два етапи – асинхронний пуск СД за допомогою демпферних обмоток і обмотки збудження, і втягування в синхронізм.

За допомогою вимірювального блоку Continuous із входами струму і напруги здійснюється вимір миттєвої активної потужності СД, а інтегратор після зазначеного блоку виконує роль лічильника, підсумовує всю активну енергію за час пуску.

Нижче на рис. 5–8 наведені графіки перехідних процесів прямого пуску синхронного електричного двигуна з подальшим втягуванням в синхронізм.

Рисунок 5 – Напруга на затискачах статора синхронного електричного двигуна при прямому пуску з подальшим втягуванням в синхронізм

Рисунок 6 – Струм синхронного електричного двигуна при прямому пуску з подальшим втягуванням в синхронізм

Аналіз отриманих результатів свідчить, що під час прямого пуску синхронного електричного двигуна з вентиляторною характеристикою навантаження є недоліки:

- 5–10 кратні сплески струмів статора і ротора та відповідний вплив на моменти двигуна;

- затяжна тривалість процесу пуску;
- ускладнення втягування СД в синхронізм.

Рисунок 7 – Швидкість синхронного електричного двигуна при прямому пуску з подальшим втягуванням в синхронізм (в.о.)

Рисунок 8 – Спожита енергія при прямому пуску синхронного електричного двигуна з подальшим втягуванням в синхронізм (Дж)

З метою пошуку методів регулювання, які б не несли в собі вищезазначених недоліків, напрям досліджень був спрямований на комбіновані варіанти регулювання. Для дослідження пуску при покроковій зміні величини напруги та частоти синхронного електричного двигуна [9] використовувалася модель рис. 9, в якій блок системи електропостачання був замінений на підсистему.

Рисунок 9 – Структура моделі для дослідження пуску при покроковій зміні величини напруги та частоти синхронного електродвигуна з вентиляторним моментом на валу

На рис. 10 відображена логіка роботи зазначеної підсистеми:

- 0 ÷ 5 секунда асинхронний розгін на частоті 15 Гц напругою 6500 В;
- 5 ÷ 8 секунда асинхронний розгін на частоті 25 Гц напругою 10000 В;
- 8 ÷ 12 секунда асинхронний розгін на частоті 35 Гц напругою 13000 В;
- 12 ÷ 19,3 секунда асинхронний розгін на частоті 50 Гц напругою 25000 В;
- 19,3 ÷ 22 секунда втягування в синхронізм за допомогою форсування збудження;
- 22 ÷ 30 секунда сталий режим СД з нормальним збудженням.

На рис. 11–14 наведені графіки перехідних процесів при пуску з покроковою зміною величини напруги та частоти синхронного електричного двигуна з подальшим втягуванням в синхронізм.

Тобто даний спосіб регулювання являє собою варіант енергоефективного методу пуску СД в складі електротехнічного комплексу ВГП.

Рисунок 10 – Структурна схема підсистеми, що формує покрокову зміну величини напруги та частоти живлення СД

Рисунок 11 – Напруга на затискачах статора при пуску з покроковою зміною величини напруги та частоти СД

Рисунок 12 – Струм при пуску з покроковою зміною величини напруги та частоти СД

Рисунок 13 – Швидкість при пуску з покроковою зміною величини напруги та частоти СД

Рисунок 14 – Спожита енергія при пуску з покроковою зміною величини напруги та частоти СД

Варіант покрокової зміни напруги та частоти живлення практично не збільшує час запуску СД в порівнянні з існуючим, проте спожита при пуску активна енергія зменшується приблизно на 50 % (рис. 15) (з 115000000 джоулів, що дорівнює 3833333,3 Вт, до 57670000 джоулів, що дорівнює 1922333,3 Вт). Також при цьому способі пуску знижується пусковий струм який сягає рівня 2–4 номінальних значень.

Рисунок 15 – Різниця спожитої активної енергії (у %) між прямим пуском та при пуску з покроковою зміною величини напруги та частоти СД

ВИСНОВКИ. В умовах тенденції зростання цін на електричну енергію і збільшення при цьому питомої ваги енергетичного сегмента в комплексі собівартості видобутку корисних копалин, обґрунтовано та запропоновано варіативний підхід до зменшення цього негативного процесу шляхом зменшення енергоємності функціонування одного з найбільш вагомих споживачів електричної енергії шахт – головних вентиляторних установок, шляхом розробки та впровадження в структури електроприводів даних споживачів енергоефективних методів та засобів керування режимами пуску в межах енергоорієнтованих характеристик приводних синхронних двигунів.

Визначені теоретичні засади та логістика модельних досліджень дозволяють формувати критерії та структуру узагальненого алгоритму керування електромеханічним комплексом головними вентиляторними установками гірничорудних підприємств.

ЛІТЕРАТУРА

1. Sinchuk O., Sinchuk I., Peresunko I., Stepanenko V. Formation of integrated energy efficiency indicator for mining industry companies. *Mining of Mineral Deposits*. 2017. № 11 (4). P. 71–78.
2. Про ринок електричної енергії : Верховна Рада України. Закон України від 13 квіт. 2017. № 27-28. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19>. (дата звернення: 12.06.2021).
3. Sinchuk I. O., Boiko S. M., Baranovska M. L., Kozakevych I. A., Somochkyn A. B., Kalmus D. O., Peresunko I. I., Vinnik M. A., Lokhman N. V., Chorna V. O. Brief commentaries on the problem of power consumption management at iron ore underground mines : Multi-authored monograph : iScience, Warsaw, Poland, 2019. 98 p.
4. Wallace K., Prosser B., Stinnette J. D. The practice of mine ventilation engineering. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2015. Vol. 25. Iss. 2. P. 165–169. DOI: 10.1016/j.ijmst.2015.02.001.
5. Білецький В. С., Смирнов В. О. Переробка і якість корисних копалин. Донецьк : Східний видавничий дім, 2005. 324 с.
6. Sinchuk O., Sinchuk I., Kozakevych I., Fedotov V., Serebrennikov V., Lokhman N., Beridze T., Boiko S., Pyrozhenko A., Yalova A. Development of the functional model to control the levels of electricity consumption by underground iron-ore enterprises. *Eastem-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. 6 (3). P. 20–27.
7. Правила безпеки під час розробки родовищ рудних та нерудних корисних копалин підземним способом : Закон України від 23 груд. 2016 р. № 1592. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0129-17#Text>. (дата звернення: 12.06.2021).
8. Пересунько І. І., Сінчук О. М., Кальмус Д. О., Горшков В. В., Михайличенко Д. А. Вплив різних форм напруги силового перетворювача в комплексі вентиляторів головного провітрювання. *Науково технічний журнал «Мікросистеми, електроніка та акустика»*. 2019. Том 24. № 3. С. 57–63. DOI: <https://doi.org/10.20535/2523-4455.2019.24.3.172680>.
9. Пересунько І. І., Кравченко Д. С., Браславський А. С., Шерстньов Ю. В. Вплив змін напруги і частоти мережі живлення на роботу синхронних двигунів. *«Гірничий вісник» збірник наукових праць*. 2018. Вип. 103. С. 178–182.
10. Сінчук О. М., Пересунько І. І., Михайличенко Д. А. Використання безпосереднього перетворювача частоти для пуску потужних синхронних електродвигунів. *Науково технічний журнал «Мікросистеми, електроніка та акустика»*. 2018. Том 23. № 3 (104). С. 38–42.
11. Kumar G. V., Sastry V. R., Krishna Rao G. V. Minimizing power consumption in multiple fan networks by optimum fan selection. *Proceedings 7th American Mine Ventilation Symposium*, 5–7 June, 1995, Lexington, Kentucky, USA. P. 491–497.
12. Местер И. И., Засухин И. Н. Автоматизация контроля и регулирования рудничного проветривания. М. : Недра, 1974. 240 с.
13. Hardcastle S., Kocsis C., Lacroix R. Strategic mine ventilation control: a source of potential energy savings. *Proceedings of Montreal Energy & Mines*, Montreal, April 29–May 2, 2007. P. 255–263.
14. Semenov V., Fisunov A., Nikishin I. Energy-efficient mine ventilation control system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 900. 012019. 10.1088/1757-899X/900/1/012019. 2020.
15. Sjöström Stefan, Klintonäs E., Johansson P., Nyqvist J. Optimized model-based control of main mine ventilation air flows with minimized energy consumption. *International Journal of Mining Science and Technology*. 30. 10.1016/j.ijmst.2020.05.016. 2020.

MODEL STUDIES WITH IDENTIFICATION OF ENERGY EFFICIENT MODES OF FUNCTIONING OF MAIN FAN UNITS

I. Sinchuk, I. Peresunko, A. Somochkyn

Kyryvi Rih National University

vul. Vitaly Matusevich, 11, Kyryvi Rih, 50027, Ukraine.

E-mail: olegovich.s@knu.edu.ua, i.peresunko@knu.edu.ua, a.syomochkyn@knu.edu.ua

Purpose. The paper analyzes the system and methods of starting synchronous electric motors of fans of the main ventilation of iron ore mines. It is concluded that it is necessary to modernize the method of starting a synchronous electric motor, despite the fact that the installed direct start-up system has a number of disadvantages, and negatively affects the energy indicators of the electromechanical complex of the main ventilation fan of mines. The priority direction in solving the complex of the above problems is the use of modern achievements in the field of semiconductor

conversion technology, in terms of the development of effective circuits and methods for starting and controlling a synchronous electric drive. **Originality.** The method of separate regulation of size and frequency of output voltage of the multilevel converter of a clock at quasi-frequency start of the synchronous electric drive is offered, limits admissible values of starting currents to admissible values. **Methodology.** Simulation of transient processes of starting a synchronous electric motor with step-by-step changes in voltage and frequency of supply, which made it possible to determine the energy efficiency of this method. **Result.** A new method of starting with a step-by-step change in the voltage and frequency of a synchronous motor is proposed. The modeling of the proposed starting method for a synchronous electric motor with a fan torque on the motor shaft was carried out, while it allowed to get rid of the main drawback, namely, a large starting current and made it possible to increase the energy efficiency of the electromechanical complex of the main ventilation fans due to the fact that the consumed active energy during start-up will decrease approximately 50% compared to a direct starting system. **Practical value.** The proposed method and the obtained results of the study made it possible to prove that the effectiveness of the proposed method is very high and this will save most of the electrical energy when starting the fans of the main ventilation of iron ore mines. Figures 15, references 15.

Key words: energy consumption, control, mining enterprises, main ventilation fans, synchronous electric motors.

REFERENCES

1. Sinchuk, O., Sinchuk, I., Peresunko, I., & Stepanenko, V. (2017). Formation of integrated energy efficiency indicator for mining industry companies. *Mining of Mineral Deposits*, 11 (4), 71–78.
2. Verkhovna Rada Ukrainy. (13 April 2017). *Zakon № 27-28, Pro rynek elektrychnoi enerhii* [About the electric power generating market]. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19>. [in Ukrainian]
3. Sinchuk, I. O., Boiko, S. M., Baranovska, M. L., Kozakevych, I. A., Somochkyn, A. B., Kalmus, D. O., Peresunko, I. I., Vinnik, M. A., Lokhman, N. V., & Chorna, V. O. (2019). *Brief commentaries on the problem of power consumption management at iron ore underground mines*. Multi-authored monograph. Poland, Warsaw: iScience.
4. Wallace, K., Prosser, B., & Stinnette, J. D. (2015). The practice of mine ventilation engineering. *International Journal of Mining Science and Technology*, 25, 2, 165–169. DOI: 10.1016/j.ijmst.2015.02.001
5. Biletskyi, V. S., & Smyrnov, V. O. (2005). *Pererobka i yakist korysnykh kopalyn* [Processing and quality of minerals]. Donetsk: Skhidnyi vydavnychiy dim. [in Ukrainian]
6. Sinchuk, O., Sinchuk, I., Kozakevych, I., Fedotov, V., Serebrenikov, V. et al. (2018). Development of the functional model to control the levels of electricity consumption by underground iron-ore enterprises. *Eastem-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (3), 20–27.
7. Ukrainian law (23 Dec. 2016). *Pravyla bezpeky pid chas rozrobky rodovysch rudnykh ta nerudnykh korysnykh kopalyn pidzemnym sposobom* [Safety rules for the hour of development of ore and non-difficult cinnamon copalins by the underground method]. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0129-17#Text>. [in Ukrainian]
8. Peresunko, I. I., Sinchuk, O. M., Kalmus, D. O., Horshkov, V. V., & Mykhailychenko, D. A. (2019). Vplyv riznykh form napruhy sylovoho peretvoriuvacha v kompleksi ventyliatoriv holovnoho provitriuvannia. *Naukovo tekhnichniy zhurnal «Mikrosystemy, elektronika ta akustyka»*, 24, 3, 57–63. DOI: <https://doi.org/10.20535/2523-4455.2019.24.3.172680>. [in Ukrainian]
9. Peresunko, I. I., Kravchenko, D. S., Braslavskiy, A. S., & Sherstnov, Yu. V. (2018). Vplyv zmin napruhy i chastoty merezhi zhyvlennia na robotu synkhronnykh dvyhuni. *«Hirnychiy visnyk» zbirnyk naukovykh prats*, 103, 178–182. [in Ukrainian]
10. Sinchuk, O. M., Peresunko, I. I., & Mykhailychenko, D. A. (2018). Vykorystannia bezposerednoho peretvoriuvacha chastoty dlia pusku potuzhnykh synkhronnykh elektrodivyguniv. *Naukovo tekhnichniy zhurnal «Mikrosystemy, elektronika ta akustyka»*, 23, 3 (104), 38–42. [in Ukrainian]
11. Kumar, G. V., Sastry, V. R., & Krishna, G. V. (1995). Minimizing power consumption in multiple fan networks by optimum fan selection. *Proceedings 7th American Mine Ventilation Symposium*, Lexington, Kentucky, USA, 491–497.
12. Mester, Y. Y., & Zasukhyn, Y. N. (1974). *Avtomatyzatsiya kontrolya y rehulyrovannia rudnychnoho provetryvannia* [Automation of control and regulation of mine ventilation]. Moscow: Nedra. [in Russian]
13. Hardcastle, S., Kocsis, C., Lacroix, R., & Hardcastle, S. (2007). Strategic mine ventilation control: a source of potential energy savings. *Proceedings of Montreal Energy & Mines*, Montreal, 255–263.
14. Semenov, A., Fisunov, A., & Nikishin, I. (2020). Energy-efficient mine ventilation control system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 900. 012019. 10.1088/1757-899X/900/1/012019.
15. Sjöström, S., Klintenäs, E., Johansson, P., & Nyqvist, J. (2020). Optimized model-based control of main mine ventilation air flows with minimized energy consumption. *International Journal of Mining Science and Technology*. 30. 10.1016/j.ijmst.2020.05.016.

Стаття надійшла 13.05.2021.