

УДК 621.31.83.52

Вплив різних форм напруги силового перетворювача в комплексі вентиляторів головного провітрювання

Пересунько^f І. І., ORCID [0000-0002-4901-0061](https://orcid.org/0000-0002-4901-0061)
Сінчук^s О. М., д.т.н. проф., ORCID [0000-0002-7621-9979](https://orcid.org/0000-0002-7621-9979)
Кальмус Д. О., ORCID [0000-0001-7604-8631](https://orcid.org/0000-0001-7604-8631)
Горшков В. В., ORCID [0000-0002-2316-3748](https://orcid.org/0000-0002-2316-3748)
Криворізький національний університет
Кривий Ріг, Україна

Михайличенко Д. А., ORCID [0000-0003-0382-2504](https://orcid.org/0000-0003-0382-2504)
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
Кременчук, Україна

Анотація—Гірничорудні підприємства належать до енергоємних підприємств. Зокрема, головні вентиляційні установки (ГВУ) споживають приблизно 30% від загального обсягу споживання електроенергії, оскільки провітрювання залізрудних копалень відбувається цілодобово, а електричні потужності цих установок сягають до 2 МВт. Електромеханічні комплекси ГВУ, в свою чергу, оснащені приводними синхронними електричними двигунами (СЕД) та застарілими системами пуску. Для підвищення енергоефективності комплексу ГВУ доцільно встановити багаторівневий силовий перетворювач частоти. Була запропонована схема багаторівневого перетворювача частоти з використанням LC - фільтрів в кожній фазі. Живлення СЕД буде здійснюватись шляхом ШІМ форми кривої вихідної напруги довільної конфігурації. Формування форм напруги перетворювача потребує детальнішого розгляду, а саме провести аналіз яким чином будуть впливати прямокутна, трапецеїдальна та синусоїдальна форми напруги на основні параметри приводного СЕД. І яка з цих форм напруг будуть оптимальними для СЕД в комплексі ГВУ.

Бібл. 12, рис. 5, табл. 2.

Ключові слова — залізрудні копальні; головні вентиляційні установки; електрична енергія; синхронні електродвигуни; перетворювачі частоти.

I. ВСТУП

Гірничо-металургійна галузь України, є основним джерелом поповнення валютних запасів держави, щорічно споживає біля 25% від загальнодержавного обсягу споживання електричної енергії (ЕЕ). При цьому бажаної і, більше того, задекларованої в ряді державних законодавчих актів тенденції до зменшення обсягів споживання ЕЕ підприємств в найближчі 10 – 15 років не очікується [1], [2]. Основними споживачами ЕЕ на залізрудних копальнях є: водовідлив, вентиляція головного провітрювання, скіпові підйомні установки, дробильно-сортувальна фабрика. Більш детальніше зупинимось на ВГП, ці установки оснащені не регульованими електродвигунами з використанням СЕД, енергоефективність комплексу залежить від кількості повітря що надходить в копальню до кількості спожитої ЕЕ. На теперішній час регулювання потоку повітря ВГП відбувається за рахунок повороту лопаток робочого колеса та відкриття заслінок, а спожита ЕЕ залежить від навантаження, але воно залишається незмінним.

Однак при ефективному керуванні процесом зміни швидкості ВГП ми досягнемо максимальної енергоефективності та знизимо споживання ЕЕ. Для цього потрібне удосконалення комплексу ВГП за допомогою застосування готових промислових зразків висковольтних перетворювачів чи розробити новий перетворювач частоти з структурою багаторівневих каскадних схем і, разом з тим, новий спосіб керування побудови кривої вихідної напруги.

II. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ І ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Процес підвищення ефективності функціонування комплексу ГВУ є двоєдиною задачею: забезпечення нормативних обсягів повітря, що подається в підземні виробки і зменшення рівнів споживання ЕЕ (рис.1) електромеханічними комплексами ГВУ. Вирішення такої «двоєдності» не проста задача, оскільки необхідне збільшення обсягів повітря, яке подається в підземні виробки, призведе до збільшення електричних потужностей електромеханічних



систем ГВУ. При рішеннях даних задач ми не будемо розглядати процес подачі повітря ГВУ в підземні виробки копалинь, зупинилось на другій з вищезгаданих задач.

Електромеханічні комплекси ГВУ обладнані високовольними електричними синхронними двигунами (СЕД) (табл. 1).

Більш електромеханічні комплекси ГВУ всіх без винятку залізрудних копалинь України не обладнані системами керування частотою обертів СЕД, або навіть установками їх плавного пуску. Такого стану достатньо для негативної оцінки енергоефективності функціонування ГВУ. На даний час, існує ряд досліджень, котрі стосуються створення сучасних енергоефективних систем електроприводу та автоматизації комплексу ГВУ [3]–[8]. Між тим всі ці дослідження являють собою рішення однієї проблеми багатьма різними способами – підвищення енергоефективності функціонування електромеханічних комплексів, ГВУ в цілому. В зв'язку з цим є всі підстави констатувати, що є потенціал підвищення енергоефективності ГВУ в напрямку створення комплексу, з мінімальною змінною вже встановленого обладнання, з додаванням високовольного перетворювача частоти для регулювання швидкості робочого колеса вентилятора [2], [9].

III. МЕТА І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є підвищення енергоефективності функціонування ГВУ залізрудних копалинь шляхом імплементації в структури їх електромеханічних комплексів новітніх схем перетворювачів для керування частотою обертання приводних синхронних електричних двигунів. Для досягнення цієї мети будуть вирішені такі наукові завдання:

- визначення в електротехнічному комплексі ГВУ місця підвищення енергоефективності;
- розробка схеми високовольного перетворювача напруги живлення синхронного двигуна електроприводу ГВУ.

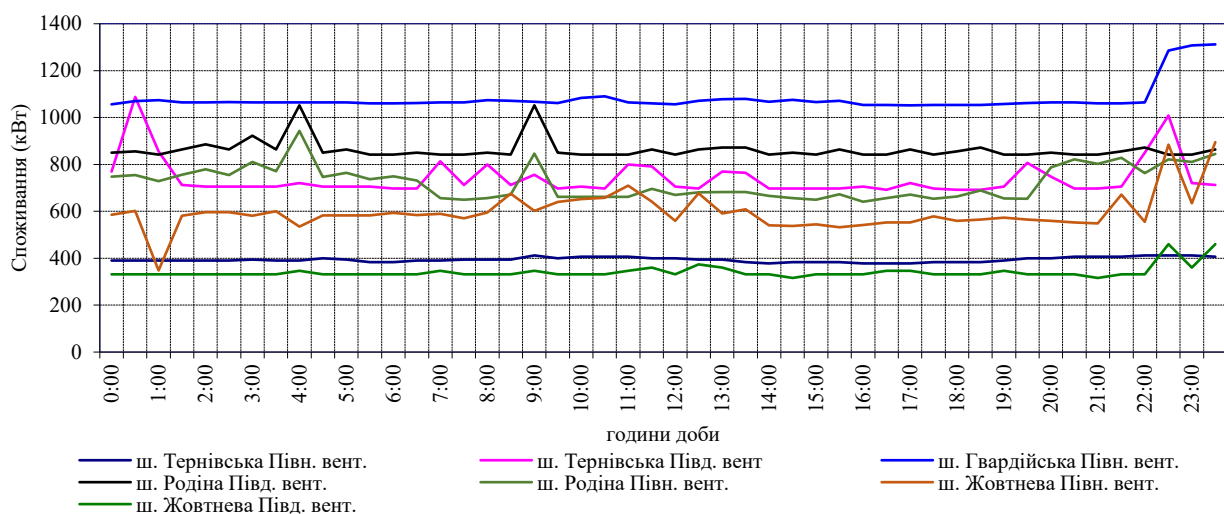


Рис.1 Графік споживання електричної енергії ГВУ в годинах доби шахтами підприємства ПАТ «КЗРК»

ТАБЛИЦЯ 1 ВСТАНОВЛЕНІ ПОТУЖНОСТІ ГОЛОВНИХ ВЕНТИЛЯТОРНИХ УСТАНОВОК РЯДУ ЗАЛІЗРУДНИХ КОПАЛЕНЬ КРИВОРІЗЬКОГО РЕГІОНУ.

Гірничорудні підприємства України	Тип ГВУ	Потужність кВт	Напруга В	Тип електродвигуна
«Родіна», КЗРК	ВРЦД-31,5	1250*2 шт	6000	СДВ 15-3-4-12
	ВРЦД-3,3	1600*2 шт	6000	СДВС 15-64-10У3
«Жовтнева», КЗРК	ВЦ-5с	1250*2 шт	6000	СДН 17-39-20
	ВЦ-5	1250*2 шт	6000	СДН 17-39-20

IV. МАТЕРІАЛ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

В ряді наукових розробок декларується як енергоефективне керування ГВУ за допомогою комплексу перетворювач частоти – синхронний двигун [4]–[6]. В цьому випадку привід в рух відцентрового вентилятора ГВУ здійснюється високовольними СЕД, котрі живляться від багаторівневих перетворювачів частоти в частині статора (рис. 2). На основі аналізу, авторами в якості базової, для подальших досліджень, вибрана структура системи синхронного електроприводу за перетворювача частоти яка може бути створена на базі IGB транзисторного інвертора [8], [10].

Схема перетворювального блоку наведена на рис. 3.

В структурі, яка аналізується (рис. 3), інвертор за схемою однофазного мостового інвертора дозволяє шляхом ШІМ формувати криву вихідної напруги довільної конфігурації — з яких більш за все використовується прямокутна, синусоїдальна трапецеїдальна, рис. 4. [6].



Розкладання сигналу прямокутної форми (рис. 4) в ряд Фур'є має вигляд

$$u = \frac{4}{\pi} U_d \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \dots + \frac{1}{v} \sin v\omega t \right), \quad (1)$$

де $v = 2K - 1$, $K = 1, 2, 3, \dots$; третя гармоніка 33%, п'ята гармоніка 20%; $U_{m1} = \frac{4}{\pi} U_d = 1,273 U_d$ - амплітуда першої гармоніки; $\tilde{U}_1 = \frac{U_{m1}}{\sqrt{2}} = 0,9 U_d$ - діюче значення першої гармоніки; $\tilde{U}_\Sigma = U_d$ - діюче значення напруги; $K_u = \frac{\tilde{U}_1}{U_d} = 0,9$ - коефіцієнт спотворення; $K_u = \frac{U_{m1}}{U_d} = 1,273$ - коефіцієнт використання живлячої напруги.

На рис. 2 прийняті позначення: А,В,С – фази високовольтної мережі живлення; Т – трансформатор; $U_1 - U_n$ – IGB транзисторний перетворювальний блок; LZ – котушку індуктивності; CZ – конденсатор; U, V, W – фази підключення перетворювача частоти до електродвигуна; М – електродвигун.

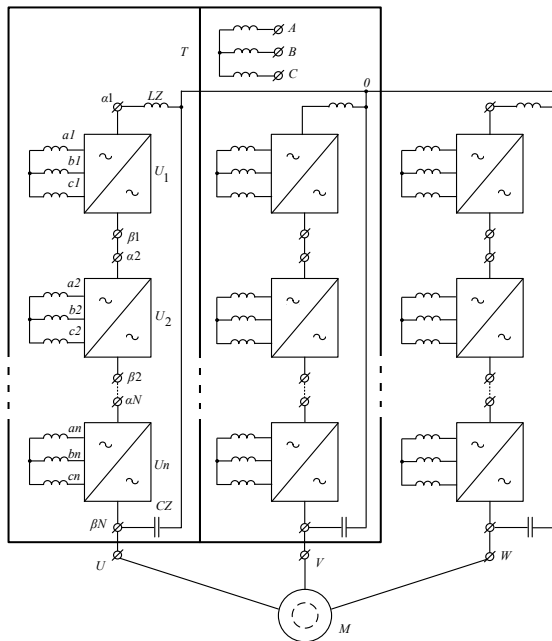


Рис.2 Структурна схема високовольтного каскадного перетворювача.

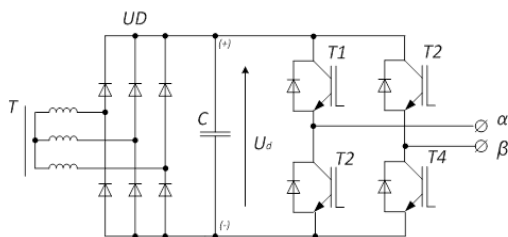


Рис.3 Принципова схема IGB транзисторного перетворювального блоку

На рис. 3 прийняті позначення: А,В,С - фази високовольтної мережі живлення; Т – трансформатор; UD - діодний випрямляч; U1 - IGBT інвертор, однофазний міст; T1 - T4 – IGB транзистори; С – конденсатор-накопичувач.

На рисунку 4, а наведена максимальна амплітуда прямокутної напруги. Проміжні значення напруги від нуля до максимального значення формують шляхом ШІМ [7].

Прикладення прямокутної напруги до двигуна викликає струм форма якого показана на рис. 4, а. Характерна особливість кривої струму є наявність пікового значення, які великі за амплітудою першої гармоніки струму що свідчить про необхідність вибору модулів IGB транзисторів для інвертору з більшим запасом за струмом [11]. Для ліквідації пікового значення струму у кінці напівхвилі напруги та для симетрії на початку наступної напівхвилі можна ввести ШІМ напруги за лінійним законом рис. 4, б. Таким чином є всі необхідні можливості до формування трапеції подібної форми вихідної напруги [7]. Що дозволить досягти покращення її гармонічного складу, в загальному випадку, $\gamma = var$, розклад трапеції в ряд Фур'є має вигляд:

$$u_v = \frac{4}{\pi} U_d \cdot \frac{\sin v\gamma}{v^2 \gamma} \cdot \sin v\omega t; \quad (2)$$

де $v = 2K - 1$, $K = 1, 2, 3, \dots$;

$$U_{m1} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sin \gamma}{\gamma} \cdot U_d; \quad (3)$$

$$\tilde{U}_1 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{\sin \gamma}{\gamma} \cdot U_d; \quad (4)$$

$$\tilde{U}_\Sigma = U_d \sqrt{1 - \frac{4\gamma}{3\pi}}; \quad (5)$$

$$K_u = \frac{2\sqrt{6}}{\sqrt{\pi(3\pi - 4\gamma)}} \cdot \frac{\sin \gamma}{\gamma}; \quad (6)$$

$$K_d = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sin \gamma}{\gamma}. \quad (7)$$

Максимальне значення коефіцієнта спотворення $K_u \rightarrow 1,0$ має місце при $\gamma = 62$ електричних градусів [6]. З практичних міркувань можна прийняти $\gamma = \pi/3$, тоді:

$$U_{m1} = 1,053 U_d; \quad (8)$$

$$\tilde{U}_1 = 0,745 U_d; \quad (9)$$

$$\tilde{U}_\Sigma = 0,745 U_d; \quad (10)$$

$$K_u = 0,9989 = 1,0;$$

$$K_d = 1,053.$$

При такому варіанті, відсутня третя гармоніка вихідної напруги, а п'ята гармоніка, має діюче значення $\tilde{U}_5 = 0,03 U_d$.



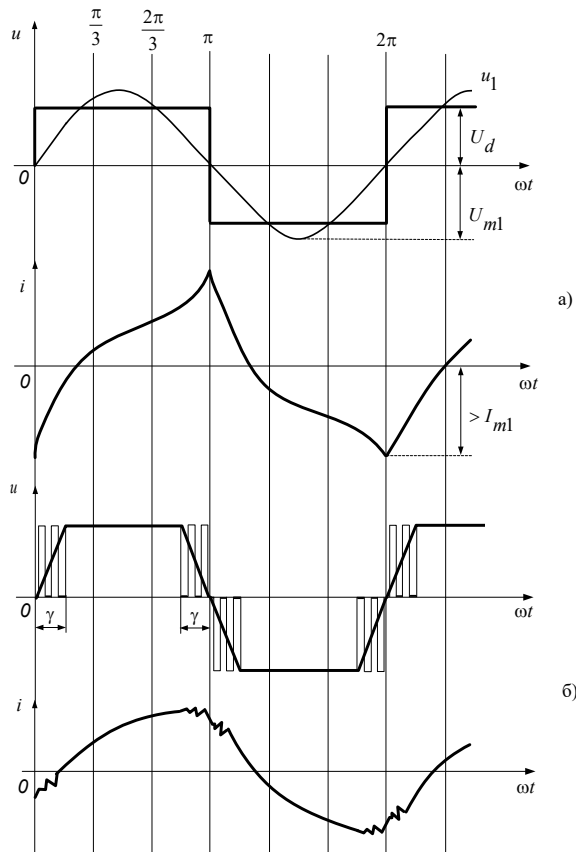


Рис. 4 Максимальні криві вихідних напруги і струму однофазного моста інвертора: а) прямокутна форма напруги; б) трапецеїдальних форма напруги.

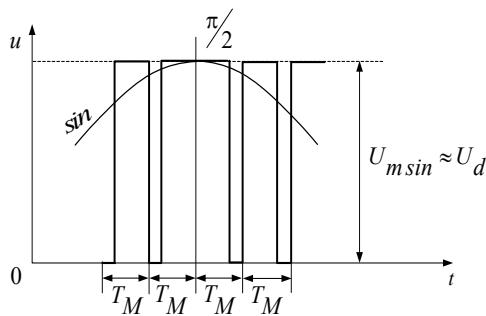


Рис. 5 ШІМ у верхній частині синусоїди.

Коефіцієнт вищої гармоніки $K_v = \tilde{U}_5 / \tilde{U}_1 = 0,04$, що менше на 0,06 ніж величини які рекомендуються стандартом якості електроенергії EN 50160:2010.

Окрім цього відзначимо, що важливою позитивною особливістю трапецеїдальної форми струму є відсутність при ШІМ на інтервалі $[\pi/3 \dots 2\pi/3]$ максимуму вихідної напруги [6].

В свою чергу, при формуванні інтегральної кривої напруги живлення за синусоїдальним законом ШІМ, U_d , на відміну від трапеції, як на максимумі так і на всьому діапазоні зміни напруги необхідна модуляція. Амплітуда синусоїди, що змодельована з прямокутника U_d , становить приблизно $U_{m \sin} \approx U_d$ (рис. 5), або більш точно згідно формули:

ТАБЛИЦЯ 2 АНАЛІЗ ФОРМ НАПРУГИ

Форма напруги	$K_u = \frac{U_1}{U_\Sigma}$	$K_u = \frac{U_{m1}}{U_d}$	Особливості
Прямокутна	0,9	1,273	3 гармоніка 33% 5 гармоніка 20% Наявність піку струму більш амплітуди.
Трапецеїдальна	1,0	1,053	Коефіцієнт вищої гармоніки $K_v = \frac{U_5}{U_1} = 0,04 < 0,06$ за стандартом, немає ШІМ на максимальній U_d
Синусоїдальна	0,675	0,955	ШІМ впроваджує всієї хвилі.

$$\int_{\pi/2 - \omega T_M}^{\pi/2} U_{m \sin} \cdot \sin \omega t \cdot d\omega t = 0,955 \cdot U_d \omega T_M \cdot (11)$$

де період модуляції $T_M = 1/f_M$. Звідки $U_{m \sin} = 0,955 U_d$, тоді $K_u = 0,955 / \sqrt{2} = 0,675$.

Отримані результати зведені до таблиці 2.

Аналіз показав, що спотворення синусоїдальних вихідних напруги та струму негативним чином впливає на роботу високовольтного синхронного двигуна, які буде викликати додатковий нагрів і вібрації двигуна, скорочуючи термін його служби. Також неприпустима робота СД з масивним ротором з високим коефіцієнтом несинусоїдальності вихідного струму, який призведе до нагріву ротора від магніторушійної сили вищих гармонік та призводить до виходу двигуна з ладу або до необхідності істотного (на 30-40%) зниження навантаження двигуна [12].

ВИСНОВКИ

- 1) Використання регульованого електроприводу ГВУ на підземних гірничодобувних підприємствах априорно є економічно виправданим заходом, що дозволить значно знизити витрату електроенергії установками головного провітрювання, полегшить пуск двигунів ГВУ і знизить пускові струми. Крім того, регульований електропривод збільшує статичний ККД і область технологічності використання



ГВУ, тим самим, додатково знижує споживання електроенергії. Між тим для досягнення бажаного рівня електроенергоєфективності електротехнічних комплексів, як всього комплексу ГВУ, необхідно розробити достатньо ефективні схеми перетворювачів напруги.

- 2) Запропонований перетворювач, напруги живлення СД містить вхідний трансформатор, вихідні обмотки якого підключені до послідовно з'єднання блоків, що створює додаткову фазу, котра, як і інші, містить ланку «діодний випрямляч конденсатор – накопичувач» і однофазний IGB транзисторний інвертор, а також вихідні LC-фільтри. Таке рішення, відрізняється від відомих тим, що LC-фільтри в кожній фазі перетворювача напруги приєднані тільки до одного блоку, що реалізує ШІМ напруги живлення.
- 3) Запропонована структура і спосіб управління IGBT - перетворювачем дозволяє підвищити ККД системи в цілому, а також знизити масу і об'єм транзисторних модулів і елементів фільтра.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

[1] О. М. Сінчук, І. І. Пересунко, and Д. А. Михайличенко, "Using the direct frequency converter for the startup of powerful synchronous electric motors.," *Sci. Tech. J. "Microsystems, Electron. Acoust.*, vol. 104, pp. 38–42, 2018, DOI: [10.20535/2523-4455.2018.23.5.132728](https://doi.org/10.20535/2523-4455.2018.23.5.132728).

[2] О. Сінчук, І. Сінчук, І. Пересунко, and В. Степаненко, "Formation of an integrated energy efficiency indicator for mining enterprises.," *Min. Miner. Depos.*, vol. 11, no. 4, pp. 71–78, 2017, DOI: [10.15407/mining11.04.071](https://doi.org/10.15407/mining11.04.071).

[3] О. М. Сінчук, С. М. Боіко, Ф. І. Караманьч, І. А. Козакевич, М. Л. Барановська, and А. М. Ялова, *Aspects of the problem of applying distributed energy in iron ore enterprises electricity supply systems*. Warsaw: iScience Sp. z.o.o., 2018.

[4] А. В. Праховник, В. П. Розен, and В. В. Дегтярев, *Energy saving modes of power supply of mining enterprises*. M.: Nedra, 1986.

[5] А. М. Веінгер, *Adjustable synchronous electric drive*. M.: Energoatomizdat, 1985.

[6] О. Н. Сінчук, В. Я. Захаров, and Д. А. Михайличенко, "Simulation of the startup of an implicit pole synchronous electric motor.," *Electrotech. Comput. Syst. Sci. Tech. J.*, vol. 84, pp. 24–30, 2012,

URL: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?Z21ID=&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=njuu_all&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21COLORTERMS=0&S21P03=1=&S21STR=Ж29197/2012/8.

[7] R. T. Schreiner, *Mathematical modeling of AC drives with semiconductor frequency converters*. Ekaterinburg: URO RAS, 2000, ISBN: 5-7691-1111-9.

[8] B. Wu, *High-Power Converter and AC Drives*. IEEE Press, 2006, ISBN: 978-0-471-73171-9.

[9] I. O. Сінчук et al., *Brief commentaries on the problem of power consumption management at iron ore underground mines*. Warsaw: iScience Sp. z.o.o., 2019.

[10] Steven W. Blume, *Electric Power System Basics for the Nonelectrical Professional, 2nd Edition*. Wiley-IEEE Press, 2016, ISBN: 978-1-119-18019-7.

[11] L. Tihanyi, *EMC in Power Electronics*. N.Y.: IEEE Press, 1995, ISBN: 9780080572505.

[12] Cherny A.P., A. I. Gladar, Y. G. Osadchuk, I. R. Kurbanov, and A.N.Oshun, *Starting systems of unregulated electric drives*, Scherbatykh Kremenchug: Scherbatykh AV, 2006.

Надійшла до редакції 06 травня 2019 р.



Влияние различных форм напряжений силового преобразователя в комплексе вентиляторов главного проветривания

Пересунько^f И. И., ORCID [0000-0002-4901-0061](https://orcid.org/0000-0002-4901-0061)
Синчук^s О. Н., д.т.н, проф., ORCID [0000-0002-7621-9979](https://orcid.org/0000-0002-7621-9979)
Кальмус Д. О., ORCID [0000-0001-7604-8631](https://orcid.org/0000-0001-7604-8631)
Горшков В. В., ORCID [0000-0002-2316-3748](https://orcid.org/0000-0002-2316-3748)
Криворожский национальный университет
Кривой Рог, Украина

Михайличенко Д. А., ORCID [0000-0003-0382-2504](https://orcid.org/0000-0003-0382-2504)
Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
Кременчуг, Украина

Аннотация—Горнорудные предприятия относятся к энергоемким предприятий. В частности, главные вентиляционные установки (ГВУ) потребляют примерно 30% от общего объема потребления электроэнергии, поскольку проветривания железорудных шахт происходит круглосуточно, а электрические мощности этих установок достигают 2 МВт. Электромеханические комплексы ГВУ, в свою очередь, оснащены приводными синхронными электрическими двигателями (СЭД) и устаревшими системами пуска. Для повышения энергоэффективности комплекса ГВУ целесообразно установить многоуровневый силовой преобразователь частоты. Была предложена схема многоуровневого преобразователя частоты с использованием LC - фильтров в каждой фазе. Питание СЭД будет осуществляться путем ШИМ формы кривой выходного напряжения произвольной конфигурации. Формирование форм напряжения преобразователя требует более детального рассмотрения, а именно — анализа каким образом будут влиять прямоугольная, трапецеидальных и синусоидальная формы напряжения на основные параметры приводного СЭД. И какая из этих форм напряжений будут оптимальными для СЭД в комплексе ГВУ.

Библ. 12, рис. 5, табл. 2

Ключевые слова — железорудные шахты; главные вентиляционные установки; электрическая энергия; синхронные электродвигатели; преобразователи частоты.



UDC 621.31.83.52

Influence of Various Forms Voltage of the Power Converter in the Complex of Fans of the Main Air Handling

I. I. Peresunko^f, ORCID [0000-0002-4901-0061](https://orcid.org/0000-0002-4901-0061)O. M. Sinchuk^s, Dr.Sc.(Eng.) Prof., ORCID [0000-0002-7621-9979](https://orcid.org/0000-0002-7621-9979)D. O. Kalmus, ORCID [0000-0001-7604-8631](https://orcid.org/0000-0001-7604-8631)V. V. Gorshkov, ORCID [0000-0002-2316-3748](https://orcid.org/0000-0002-2316-3748)

Kryvy Rih National University

Kryvy Rih, Ukraine

D. A. Mikhailichenko, ORCID [0000-0003-0382-2504](https://orcid.org/0000-0003-0382-2504)

Kremenchuk National University named after Mikhail Ostrogradsky

Kremenchuk, Ukraine

Abstract—Mining enterprises are examples of energy-intensive enterprises. At the same time, in the total volume of electric energy consumption, they consume about 80% such as: a crushing and sorting factory, a main drainage system, skip hoisting installations and main ventilation installations. In particular, ventilation plants consume approximately 30% of the total electricity consumption, this fact is due to the fact that according to the technology of underground mining, the iron ore mines are aired around the clock, and the electrical capacities of these plants reach 2 MW.

Electromechanical complexes of fan installations, in turn, are equipped with synchronous drive electric motors. In order to regulate the performance of the main ventilation unit, inefficient measures are used: turning fan blades, and opening and turning working flaps. Meanwhile, with an increase in the depth of production of iron ore below 1500 m, the effectiveness of the existing ventilation process of underground workings is complicated, and these measures become even more ineffective.

The process of the necessary improvement of ventilation systems in iron ore mines and the development of appropriate energy efficient systems to control the rotational speed of the synchronous drive motor of the main ventilation unit must be carried out in a plane of reach to reduce the electrical energy consumption of these units, in turn, will lead to the desired reduction of electrical energy consumption by iron ore mines at all. One of the real directions to achieve this goal is the creation of high-voltage converters, which will increase the energy efficiency of the electric drive of the main fan systems as a whole. In this study, based on the analysis, the possibility of using a power converter based on a multi-level cascade voltage inverter is considered. The proposed method of controlling and shaping the high-voltage supply voltage of the converter will increase the efficiency of the electromechanical system as a whole, as well as reduce the weight and volume of transistor modules and filter components, in the final form will achieve the desired level of performance of electromechanical complexes and all main fan systems as a whole.

The prospect of introducing a controlled electric drive for main ventilation installations in underground mining enterprises is a priori economically viable measure that will significantly reduce power consumption by main ventilation systems, facilitate the start-up of synchronous motors and reduce starting currents. In addition, an adjustable electric drive increases the static efficiency and the range of technological use of the main ventilation systems, and, thereby, further reduces power consumption. Meanwhile, to achieve the desired level of electrical energy efficiency of electrical systems, as the entire complex of the main ventilation systems, it is necessary to develop sufficiently efficient circuits of voltage converters.

Ref. 12, fig. 5, tabl. 2

Keywords — iron ore mines; main ventilation systems; electrical energy; synchronous motors; frequency converters.

