

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ВЕНТИЛЯТОРНЫХ УСТАНОВОК

М.И. Коцур, И.М. Коцур, Н.С. Иваницкий, Д.А. Кравченко, В.Г. Савельев  
Запорожский национальный технический университет

**Аннотация.** Предложена система импульсного частотно-токового асинхронно-вентильного каскада для стационарных установок вентиляторов магистральной главной проветривания шахт, которая совмещает в себе положительные свойства классической системы импульсного регулирования и асинхронного вентильного каскада. Проведено исследование электромагнитных и энергетических процессов в системе электропривода с вентиляторной нагрузкой при переменных аэродинамических параметрах магистральной главной проветривания шахт.

**Ключевые слова:** преобразователь, вентиляторная установка, энергоэффективность, давление, импульс.

### Введение

Проветривание шахт вентиляторами главной проветривания (ВГП) - наиболее энергоемкий технологический процесс. Средняя установленная мощность приводов вентиляторов (600 – 1600) кВт, а наиболее мощных установок до 4000 кВт. Парк ВГП на шахтах Украины изношен более чем на 77%. [1]. Практически на всех шахтах для ВГП применяют системы нерегулируемого электропривода. Характерной особенностью шахтной вентиляционной сети, является постоянно меняющееся аэродинамическое сопротивление в процессе эксплуатации шахты. Это обусловлено изменением конфигурации схемы проветривания, протяженностью и площадью поперечного сечения горных выработок, состояния вентиляционных сооружений и выработанного пространства, а также другими факторами. Только через некоторое время сопротивление сети становится сравнимым с его начальным расчетным значением.

В последние годы снизилась производительность большинства шахт и сократилось количество действующих очистных забоев на относительно успешно работающих предприятиях. В результате потребность шахт в воздухе уменьшилась настолько, что КПД многих установок резко снизился.

### 1. Анализ последних исследований и публикаций.

С целью повышения экономичности значительного количества ВГП возможен переход на более низкую частоту вращения ротора двигателя, благодаря применения энергоэффективных

систем регулирования электропривода, таких как преобразователи частоты (ПЧ), индукторно-емкостные преобразователи (ИНП) и преобразователи по схеме асинхронно-вентильного каскада (АВК). С помощью этих систем можно независимо регулировать скорость и момент электродвигателя (асинхронного или синхронного) [2-4]. Однако ПЧ и ИЕП имеют большую установленную мощность, которая соизмерима с мощностью двигателя ВГП. Кроме того, применение ПЧ и ИЕП в высоковольтном электроприводе ВГП ограничено в использовании классом напряжения полупроводниковых элементов преобразователя.

В [5] предложена система импульсного частотно-токового регулирования асинхронно-вентильного каскада (ИЧТАВК), которая совмещает в себе положительные регулировочные характеристики импульсного регулирования с возможностью рекуперации энергии в сеть. По сравнению с ИЕП, преобразователь позволяет независимо поддерживать постоянный ток в роторе при изменяющихся параметрах АДФР в подсинхронном диапазоне вращения ротора [6]. Данная система регулирования хорошо зарекомендовала себя в электроприводах подъемно-транспортных механизмов, и может быть также эффективно использована для мощных высоковольтных электроприводов вентиляторных установок, где применение высоковольтных преобразователей частоты приводит к существенному увеличению их стоимости. Наличие источника тока (момента) в роторе преобразователя для управления вентиляторными нагрузками дает возможность при заданном напоре воздуха автоматически выбирать рабочую точку расходно-напорной характеристики объекта проветривания или гидроснабжения при переменной вели

© Коцур М. И., Коцур И. М., Н. С. Иваницкий,  
Д. А. Кравченко, В. Г. Савельев, 2017

чине расхода. Преобразователь позволяет повысить энергоэффективность электропривода установок и механизмов в различных отраслях промышленности [7].

Поэтому актуальной задачей является исследование регулировочных свойств и показателей энергоэффективности асинхронного электропривода по схеме ИЧТАВК с вентиляторной нагрузкой, обеспечивающий удовлетворительную электромагнитную совместимость с сетью.

Целью работы является повышение эффективности работы и энергетических показателей асинхронного электропривода по схеме ИЧТАВК с вентиляторной нагрузкой.

## 2. Изложение основного материала исследования.

На рис. 1 приведена система ИЧТАВК. Особенностью данной системы является наличие импульсного регулятора в цепи выпрямленного тока ротора, представленного в виде импульсного преобразователя постоянного напряжения (ИППН) второго рода. Наличие конденсатора (С) обеспечивает исключение перенапряжения в обмотке ротора, вызванного частой коммутацией ключа (К). Диод (VD) предотвращает появление обратного тока с конденсатора при замыкании ключа. При размыкании ключа запасенная энергия в обмотке ротора, а также часть энергии скольжения, в зависимости от соотношения э.д.с. ротора и э.д.с. инвертора (И), рекуперируется в сеть при постоянном угле инвертирования мало-мощного инвертора, что обеспечивает минимальное потребление реактивной энергии из сети

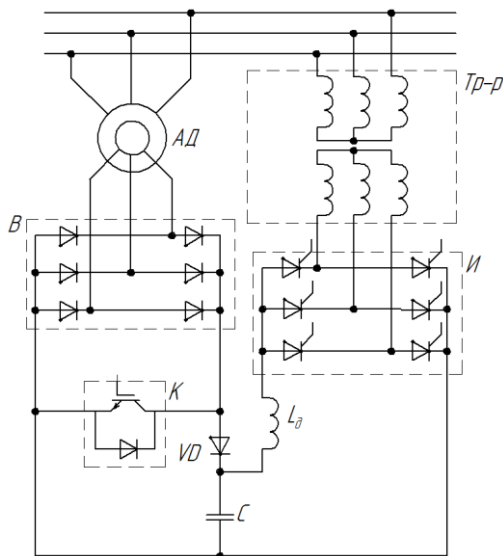


Рис. 1 – Преобразователь по схеме импульсного частотно-токового асинхронно – вентиляционного каскада

и позволит повысить коэффициент мощности привода во всем диапазоне частоты вращения ротора. Согласование э.д.с. ротора и э.д.с. инвертора может выполняться с помощью трансформатора или автотрансформатора. Коэффициент трансформации определяется выходным напряжением ИППН.

Для исследования регулировочных свойств и показателей энергоэффективности асинхронного электропривода по схеме ИЧТАВК в структуре средств Simulink MatLAB была разработана комплексная имитационная модель электромагнитных и энергетических процессов. Она включает в себя: подсистему модели высоковольтного асинхронного двигателя с фазным ротором, выполненного по общепринятым допущениям [8]; подсистему модели канала регулирования в цепи выпрямленного тока ротора, согласно [7]; блок расчета энергетических показателей, согласно [2,3,8], а также подсистему аэродинамической модели.

Подсистема аэродинамической модели описывается следующими выражениями [9]:

$$M_c = M_{xx} + k \cdot \omega_r^n, \quad (1)$$

$$k \cong (M_n - M_{xx}) / \omega_n^n, \quad (2)$$

$$M_n = \frac{H \cdot Q}{\eta \cdot \omega_r}, \quad (3)$$

где  $M_{xx}$  - момент холостого хода (момент трогания системы), Н·м;  $\omega_n$  - номинальная скорость АД, рад/с;  $\omega_r$  - действующая скорость АД, рад/с;  $n$  - показатель степени, значение которое зависит от типа установки (для вентиляторной нагрузки  $n=2$ );  $\eta$  - коэффициент полезного действия вентилятора;  $H$  - давление вентилятора, Па;  $Q$  - объемная подача вентилятора, м<sup>3</sup>/с.

Связь объемной подачи вентилятора (расхода воздуха) и давления в магистрали главного проветривания можно выразить через следующее соотношение [10]:

$$H = R \cdot Q^2, \quad (4)$$

где  $R$  - сопротивление главной вентиляционной сети, Па·с<sup>2</sup>/м<sup>6</sup>.

Ограничение тока в подсистеме модели ИЧТАВК выполняется подсистемой регулирования, которая представляет собой широтно-импульсный модулятор, обеспечивающий независимое задание коэффициента заполнения им

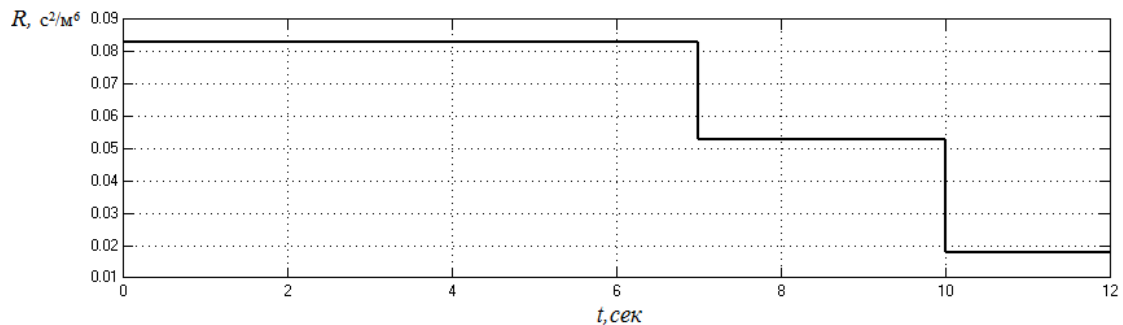
пульса  $\gamma$  и частоты коммутации  $f_k$ . Входными параметрами подсистемы регулирования ИЧТАВК являются: номинальное (заданное) значение давления в магистрали главного проветривания угольной шахты  $H_{ном}$ , действующие значения давления  $H$  и расхода воздуха  $Q$ . Подсистема модели регулирования ИЧТАВК обеспечивает саморегуляцию по поддержанию необходимого давления  $H_{ном}$  за счет изменения частоты вращения ротора АД  $\omega_r$ , которое задается величиной коэффициента заполнения импульса  $\gamma$  с дискретизацией по времени  $T$ :

$$\begin{cases} \gamma_i = \gamma_{i-1} + k_i(T_i) & \text{если } H \leq H_{ном} \\ \gamma_i = \gamma_{i-1} - k_i(T_i) & \text{если } H > H_{ном} \end{cases} \quad (5)$$

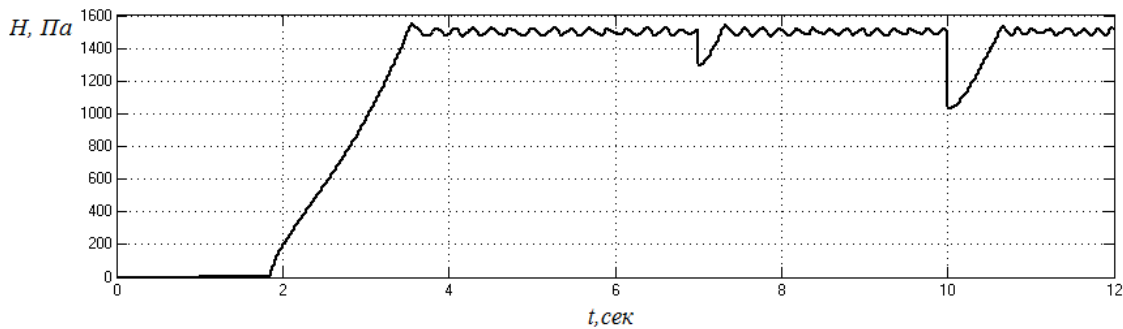
где  $k_i$  - дискретная величина, которая характеризует скорость изменения  $\gamma$  за время дискретизации  $T$ .

На рис. 2 приведены результаты моделирования в виде осциллограмм аэродинамических показателей и параметров регулирования: сопротивление магистрали  $R$  (рис. 2, а); давление в магистрали  $H$  (рис. 2, б); объемная подача вентилятора  $Q$  (рис. 2, в); момент сопротивления АД  $M_c$  (рис. 2, г); коэффициент заполнения импульса  $\gamma$  (рис. 2, д); скорость вращения ротора (рис. 2, е), для АД типа АК-4 мощностью 1000кВт при частоте коммутации силового ключа (К)  $f_k=600$  Гц.

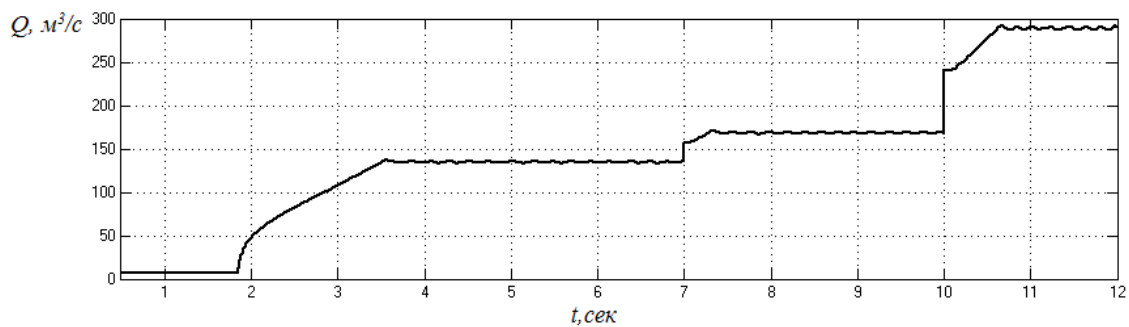
На осциллограммах отражен период разгона АД ( $t=0 \div 3,5$ сек.) с последующим выходом в квазиустановившейся режим работы ИЧТАВК ( $t=3,5 \div 7$ сек.) при неизменном сопротивлении



а)



б)



в)

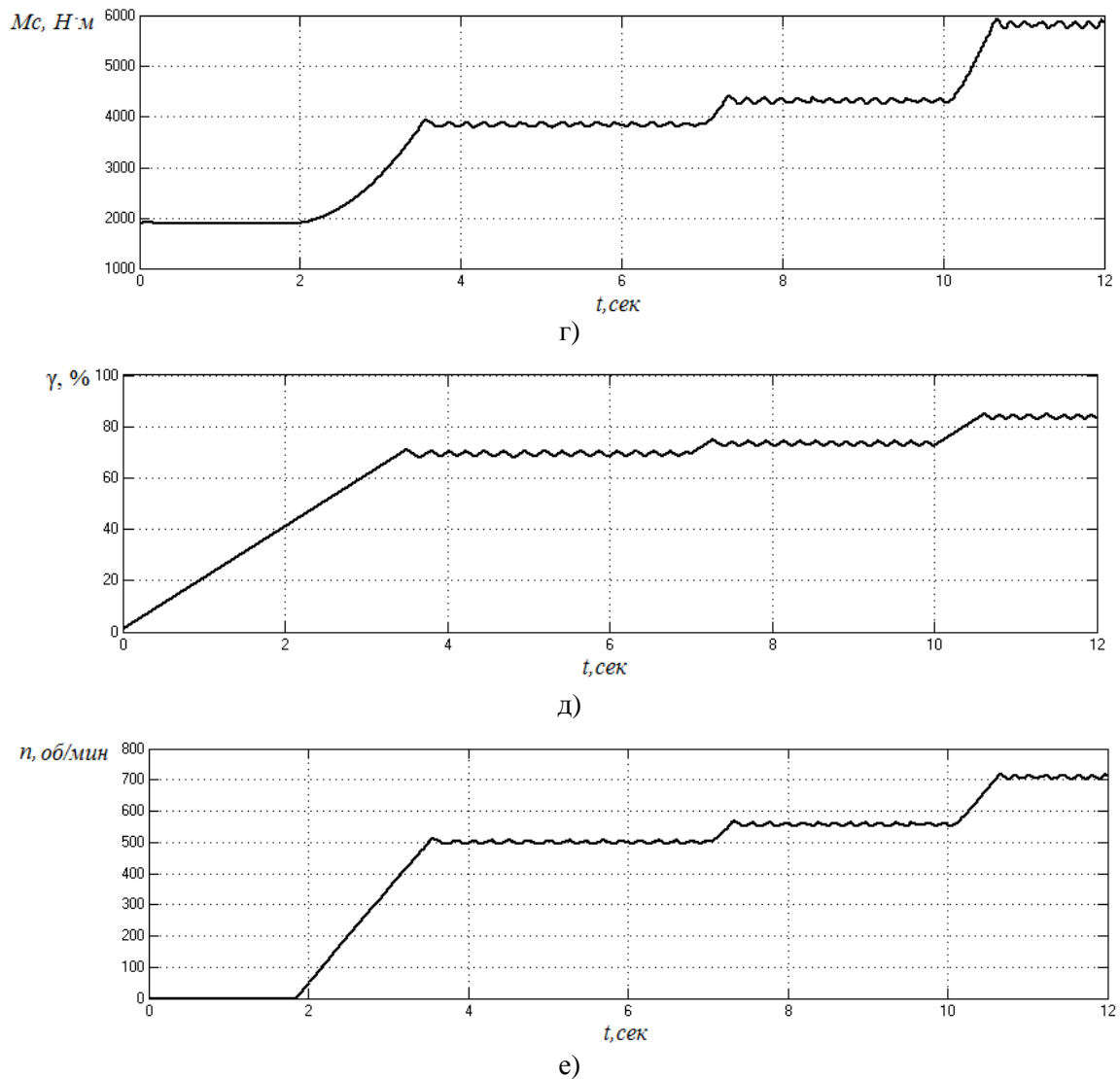


Рис. 2 – Результати моделювання в формі осцилограмм аеродинамічних показателів і параметрів регулювання ІЧТАВК для АД типу АК-4 потужністю 1000кВт

магістралі головного проветривання  $R=0,083$  Па·с<sup>2</sup>/м<sup>6</sup>. В момент часу  $t=7$  сек виконується імітація змінення опору головного проветривання  $R$  (від 0,083 до 0,053) Па·с<sup>2</sup>/м<sup>6</sup>, а також в момент часу 10 сек (від 0,053 до 0,018) Па·с<sup>2</sup>/м<sup>6</sup>, що свідчить про різке збільшення виробки вугля в шахті. В результаті різкого зменшення опору головного проветривання шахти зменшується тиск в магістралі. Система ІЧТАВК реагує на змінення  $H$  в магістралі, задаючи більше значення коефіцієнта заповнення імпульсу  $\gamma$  згідно (5) до тих пор, поки тиск вентилятора  $H$  не досягне заданого значення  $H_{ном}$ .

Таким чином, збільшення тиску в магістралі забезпечується збільшенням струму ротора, відповідно, моменту АД. Причому в момент саморегуляції при плавній зміні коефіцієнта заповнення імпульсу ( $\gamma$ ) виключа-

ється поява ударних складових струмів і моменту АД, забезпечуючи стабільну роботу системи електропривода.

На рис. 3 наведені розрахункові значення коефіцієнтів потужності АД типу АК-4 (криві 1, 2, 3), а також загальний коефіцієнт потужності привода (криві 4, 5, 6) відповідно для номінальних потужностей АД  $P_n$  630, 800 і 1000 кВт. З аналізу отриманих результатів слід, що застосування ІЧТАВК дозволить в середньому підвищити коефіцієнт потужності вентиляторної установки на 0,25 порівняно з нерегульованим електроприводом за рахунок роботи інвертора з постійним мінімальним кутом інвертування  $\beta$ , при якому інвертор споживає мінімальну кількість реактивної потужності з мережі. Зменшення коефіцієнта потужності з ростом робочого ковзання АД викликане зменшенням споживання активної потужності з мережі АД, а також зростанням вмісту вищих гармонік

ник токов статора и ротора АД, так как величина коэффициента гармонических искажений статора и ротора АД обратно пропорциональна величине коэффициента заполнения импульса  $\gamma$  [8].

Использование ИЧТАВК в электроприводах вентиляторных установок также позволит сохранить общий коэффициент полезного действия в подсинхронном диапазоне частоты вращения ротора на достаточно высоком уровне 92-94,5% (рис.4).

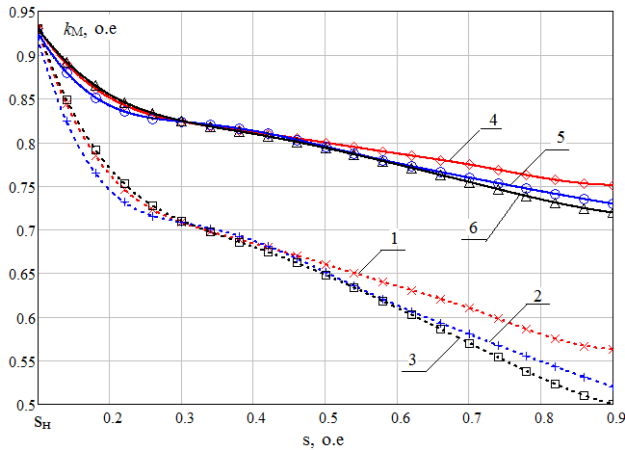


Рис. 3– Зависимости коэффициента мощности АД типа АК-4 и коэффициента мощности привода ИЧТАВК от рабочего скольжения

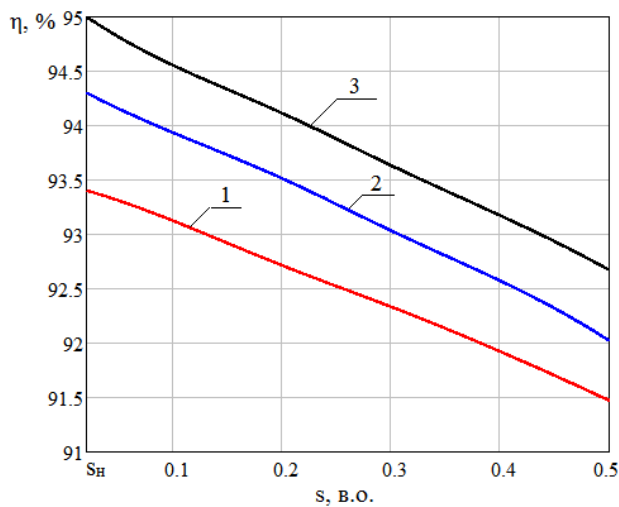


Рис. 4 - Расчетные зависимости коэффициента полезного действия привода ИЧТАВК с вентиляторной нагрузкой от величины рабочего скольжения АД.

Согласно рис.3, рис.4 оптимальный уровень энергоэффективности обеспечивается в диапазоне рабочих скольжений  $s=0,5 \div s_n$ . Поэтому при проектировании систем электропривода вентиляторных установок для магистралей главного проветривания шахт необходимо, чтобы начальное и конечное расчетные значения аэродинамического сопротивления  $R$ , а также необходимое

значение давление магистрали  $H$  были подобраны таким образом, чтобы диапазон рабочих скольжений АД был в пределах  $s=0,5 \div s_n$ . Кроме того, АД должен быть выбран с наибольшей возможной номинальной мощностью, обеспечивающий работу вентилятора в диапазоне этих рабочих скольжений АД.

Таким образом система электропривода по схеме ИЧТАВК для вентиляторных установок магистрали главного проветривания позволит обеспечить энергоэффективность на достаточно высоком уровне, саморегуляцию аэродинамических параметров, значительно снизить капитальные затраты при модернизации электропривода вентиляторных установок, а также повысить их стабильность и надежность, тем самым снизить уровень аварийности на шахтах Украины.

### Выводы

Предложена система ИЧТАВК для стационарных установок вентиляторов магистрали главного проветривания шахт, которая совмещает в себе положительные свойства классической системы импульсного регулирования и асинхронного вентиляционного каскада.

Проведено исследование электромагнитных и энергетических процессов в системе ИЧТАВК с вентиляторной нагрузкой, при переменных аэродинамических параметрах магистрали главного проветривания шахт. Установлено, что система ИЧТАВК способна с высокой точностью и надежностью реагировать на изменения аэродинамических параметров магистрали главного проветривания шахт, а также позволит повысить коэффициент мощности электропривода при вентиляторной нагрузке до уровня  $0,8 \div 0,93$ , и коэффициента полезного действия до уровня  $(92,5 \div 94,5)\%$  при регулировании в диапазоне рабочих скольжений ротора приводного вентиляторного двигателя  $s = 0,5 \div s_n$ , что соответственно в среднем на 0,25 и 40% выше по сравнению с системами нерегулируемого электропривода.

Разработаны рекомендации по проектированию и рациональному выбору установленной мощности вентилятора для магистрали главного проветривания для обеспечения наилучшего уровня энергоэффективности электропривода.

### Список использованной литературы

1. Мазин, В. А. Снижение энергозатрат на проветривание шахт [Текст] /А. В. Мазин, О. В. Ольховский, В. А. Костенко // Уголь Украины. – 2008. – №8. – С. 19–21.
2. Онищенко, Г. Б. Асинхронный вентиляционный каскад [Текст] / Г. Б. Онищенко - М., Энергия, 1967. – 152 с.

3. Браславский, И. Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод [Текст]: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков; – М.: Академия, 2004. – 256 с.

4. Волков, И. В. Электроприводы со стабилизированным током в силовых цепях [Текст] / И. В. Волков, В. Н. Исаков. – М.: Радио и связь, 1991. – 216 с.

5. Пат. України 64126, МПК H02P 27/05(2006.01) Пристрій імпульсного керування процесами перетворення енергії в асинхронному двигуні з фазним ротором [Електронний ресурс] / П.Д. Андриєнко, М.І. Коцур, І.М. Коцур; заявл. 22.04.11; опубл. 25.10.2011, Бюл. № 20, 2011р. – Режим доступу: <http://www.uipv.org>.

6. Коцур, М. І. Особенности режимов работы модифицированной системы импульсного регулирования асинхронного двигателя с фазным ротором [Текст] / М. И. Коцур, П. Д. Андриенко, И. М. Коцур, // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ, 2012. – № 3(19) – С. 163–165.

7. Коцур, М. І. Сравнительный анализ энергоэффективности систем регулирования асинхронного двигателя с фазным ротором [Текст] / М. И. Коцур, П. Д. Андриенко, И. М. Коцур // Ползуновский вестник. – 2013. – № 4-2. – С.114–120.

8. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин [Текст]/ И. П. Копылов. – М.: Высшая школа, 2001. – 327 с.

9. Чермалых, В. М. Моделирование режимов работы электромеханических систем с учетом вида нагрузки [Текст] / В. М. Чермалых, А. В. Чермалых, А. В. Данилин, И. Я. Майданский // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. – 2009. - № 4 (57). – С. 10–111.

10. Антощенко, Н. И. Новый подход к регулированию вентиляции угольных шахт [Текст] / Н. И. Антощенко, В. В. Калюжный, В. П. Коптиков, Г. Б. Тында, П. Д. Андриенко, А. В. Садовой // Уголь Украины. – 2014. – № 3. – С. 29–32.

### References

1. Mazin, V. A., Olhovskiy O. V., Kostenko V. A. (2008) Reduction of power consumption for ventilation of the mines [Snizhenie energozatrat na pro-ventrivanie shaht], Ugol Ukrainyi, issue 8. pp. 19–21.

2. Onischenko, G. B. (1967) Wound-rotor slip recovery system [Asinhronnyiy ventilnyiy kaskad], Moscow, Energiya, 152 p.

3. Braslavskiy, I. Ya., Ishmatov Z.Sh., Polyakov V.N. (2004) Energy-saving asynchronous electric drive [Energoberegayuschiy asinhronnyiy elektroprivod], Moscow, Akademiya, 256 p.

4. Volkov, I. V., Stiazhkin S.V., Podolnyi S. V. (2009) System of stabilized current for automated electric drives [Systemy stabilizirovannogo toka dlya avtomatizirovannykh elektroprivodov], *Trudih Instituta Elektrodinamiki NAN Ukrainih*, issue 23, pp. 64–72.

5. Andrienko, P.D., Kotsur M. I., Kotsur I. M. (2011) Patent of Ukraine 64126, Int. Cl.<sup>3</sup> H02P 27/05(2006.01) Device for impulse control by energy coversion processes in wound-rotor induction motor [Prystryi impulsnogo keruvannya procesamy peretvorennya energiyi v asinkhronnomu dvyguni z faznym rotorom] published 25.10.2011, Bulletin №20. URL: <http://www.uipv.org>.

6. Kotsur, M. I., Andrienko P. D., Kotsur I. M. (2012) Operation modes features of modificate pulse control system of asynchronous motor with phase rotor [Osobennosti rezhimov raboty modifitsirovannoy sistemy impulsnogo regulirovaniya], *Elektromechanichni ta enegrozberigayuchi sistemy*, Volume 19, Issue 3, pp. 163–165.

7. Kotsur, M. I., Andrienko P. D., Kotsur I. M. (2013) Comparative analysis of energy efficiency of drive control systems of asynchronous motor with phase rotor [Srantitelnyy analiz energoeffektivnosti sistem regulirovaniya asinhronnogo dvygatelya s faznym rotorom], *Polzunovskiy vestnik*, Issue 4-2, pp. 114–120.

8. Kopulov, I. P. (2001) Mathematical modeling of electrical machines [Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin], Moscow, Vysshaya shkola, 327 p.

9. Chermalyih, V. M., Chermalyih A. V, Daniilin A. V, Maydanskiy I. Ya. (2009) Operating modes simulation of the electromechanical systems with considering of the load type [Modelirovanie rezhimov raboty elektromechanicheskikh sistem s uchetom vida nagruzki], *VIsnik KDPU Imeni Mihayla Ostrogradskogo*, issue 4 (57), pp. 107–111.

10. Antoschenko, N. I., Kalyuzhnyiy V. V., Koptikov V. P., Tyinda G. B., Andrienko P. D., Sadovoy A. V. (2014) A new approach to regulating the ventilation of the coal mines [Novyyiy podhod k regulirovaniyu ventilyatsii ugolnyih shaht], *Ugol Ukrainyi*, issue 3. pp. 29–32.

## EFFICIENCY IMPROVING OF THE DRIVE SYSTEM FOR FAN INSTALLATIONS

M. Kotsur, I Kotsur, N. Ivanitskiy, D. Kravchenko, V. Saveliev  
Zaporizhzhya national technical university

**Abstract.** The drive system for pulse frequency-current slip-power recovery scheme for fans stationary installations of the main mine ventilation, which combine the positive properties of the classical pulse control system and slip-power recovery scheme is proposed. A feature of this system is the existence of the pulse regulator in the rectified rotor current circuit, represented as the step-up voltage converter and an inverter operating at a constant inversion angle. With the help of the developed simulation model of the asynchronous drive for complex researches, electromagnetic and energy processes in the drive system of the pulse frequency-current slip-power recovery scheme with the fan load and variable aerodynamic parameters of the main mine ventilation line were researched. The drive system of the pulse frequency-current slip-power recovery scheme is able to respond with high accuracy and reliability to changes in the aerodynamic parameters of the main mine ventilation is proved. The electric drive system for pulse frequency-current slip-power recovery scheme allows to increase the power factor of the electric drive fan load up to  $0,8 \div 0,93$ , and the efficiency up to  $92.5 \div 94.5\%$  with the regulating in the working rotor slip of the drive fan motor in the range  $s = 0,5 \div s_m$ . This is correspondingly an average higher by 0.25 and 40% compared to systems of unregulated electric drive. The recommendations on the design and rational choice of the installed fan power for the main ventilation line for procuring the best level of energy efficiency of the electric drive are developed.

**Key words:** converter, fan installation, energy efficiency, pressure, pulse.

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ВЕНТИЛЯТОРНИХ  
УСТАНОВОК

М.І. Коцур, І.М. Коцур, Н.С. Іваницький, Д.О. Кравченко, В.Г. Савельєв  
Запорізький національний технічний університет

**Анотація.** Запропоновано систему імпульсного частотно-струмового асинхронно-вентильного каскаду для стаціонарних установок вентиляторів магістралі головного провітрювання шахт, яка поєднує в собі позитивні властивості класичної системи імпульсного регулювання і асинхронного вентильного каскаду. Проведено дослідження електромагнітних і енергетичних процесів в системі електроприводу з вентиляторним навантаженням при змінних аеродинамічних параметрів магістралі головного провітрювання шахт.

**Ключові слова:** перетворювач, вентиляторна установка, енергоефективність, тиск, імпульс.

Получено 28.03.2017

**Коцур Михаил Игоревич**, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры электрических и электронных аппаратов Запорожского национального технического университета. Жуковского 64, г. Запорожье, Украина, E-mail: kotsur\_m@ukr.net, тел. +38-061-769-85-20.



**M. Kotsur**, PhD, Assoc. Professor, Department of the electrical and electronic apparatus, Zaporizhzhya National Technical University, Zhykovskiy street 64, Zaporizhzhya, Ukraine.

**ORCID ID:** 0000-0002-0072-5437



**Коцур Игорь Михайлович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электрических машин Запорожского национального технического университета. Жуковского 64, г. Запорожье, Украина, E-mail: igor.m.kotsur@gmail.com, тел. +38-061-769-84-11.

**I. Kotsur**, PhD, Assoc. Professor, Department of the electrical machines, Zaporizhzhya National Technical University, Zhykovskiy street 64, Zaporizhzhya, Ukraine.

**ORCID ID:** 0000-0001-6394-7849



**Иваницкий Назарий Степанович**, магистрант кафедры электрических машин Запорожского национального технического университета. Жуковского 64, г. Запорожье, Украина.

**N. Ivanitskiy**, student of the Department of the electrical machines, Zaporizhzhya National Technical University, Zhykovskiy street 64, Zaporizhzhya, Ukraine.

**ORCID ID:** 0000-0001-6252-5214



**Кравченко Денис Александрович**, магистрант кафедры электрических машин Запорожского национального технического университета. Жуковского 64, г. Запорожье, Украина.

**D. Kravchenko**, student of the Department of the electrical machines, Zaporizhzhya National Technical University, Zhykovskiy street 64, Zaporizhzhya, Ukraine.

**ORCID ID:** 0000-0003-0517-5013



**Савельев Василий Григорьевич**, доцент, доцент кафедры электрических машин Запорожского национального технического университета. Жуковского 64, г. Запорожье, Украина, тел. +38-061-769-84-11.

**V. Saveliev**, Assoc. Professor, Department of the electrical machines, Zaporizhzhya National Technical University, Zhykovskiy street 64, Zaporizhzhya, Ukraine.

**ORCID ID:** 0000-0001-7026-2397