

УДК 621.313.33

### ПРИМЕНЕНИЕ КВАЗИЧАСТОТНОГО УПРАВЛЕНИЯ В ДВУХСКОРОСТНЫХ ПРИВОДАХ

**Н. Н. Заблодский**

Национальный университет биоресурсов и природопользования  
ул. Героев Оборони, 15, г. Киев, 03041, Украина. E-mail: zablodskiyinn@gmail.com

**К. В. Худобин**

Международный Комитет Красного Креста  
ул. Большая Васильковская, 6, г. Киев, 01004, Украина. E-mail: wathab1987@mail.ru

Исследования асинхронного привода с тиристорной системой управления. Привод отличается наличием функции квазичастотного управления. С помощью математической модели, которая содержит модель асинхронного двигателя, учитывающей эффект вытеснения тока и насыщение магнитной цепи, проанализированы различные варианты формирования квазисинусоидального напряжения и определен принцип формирования напряжения, при котором конвейер имеет лучшие эксплуатационные характеристики.

Исследованы пусковые характеристики и показано, что для обеспечения устойчивой работы привода при номинальной скорости необходимо вводить задержку по времени для управляющего импульса, отпирающего тиристоры. Адекватность результатов, полученных на основе моделирования привода, подтверждена испытаниями натурального образца привода.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, квазичастотное регулирование, время задержки управляющего сигнала.

### ЗАСТОСУВАННЯ КВАЗИЧАСТОТНОГО КЕРУВАННЯ В ДВОШВИДКІСНИХ ПРИВОДАХ

**Н. Н. Заблодський**

Національний університет біоресурсів і природокористування України  
вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна. E-mail: zablodskiyinn@gmail.com

**К. В. Худобін**

Міжнародний Комітет Червоного Хреста  
вул. Велика Васильківська, 6, м. Київ, 01004, Україна. E-mail: wathab1987@mail.ru

Дослідження асинхронного приво́ду з тиристорною системою керування. Привід відрізняється наявністю функції квазичастотного керування. За допомогою математичної моделі, яка містить модель асинхронного двигуна, яка враховує ефект витіснення струму та насичення магнітного ланцюга, проаналізовані різні варіанти формування квазисинусоїдальної напруги і визначено принцип формування напруги, при якому конвеєр має кращі експлуатаційні характеристики.

Досліджено пускові характеристик і показано, що для забезпечення стійкої роботи приво́ду при номінальній швидкості необхідно вводити затримку за часом для керуючого імпульсу, що відмикає тиристори. Адекватність результатів, отриманих на основі моделювання приво́ду, підтверджена випробуваннями натурального зразка приво́ду.

**Ключові слова:** асинхронний двигун, квазичастотне регулювання, час затримки сигналу.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** В настоящее время имеется достаточное количество механизмов, для которых, по условиям их работы, требуется двухскоростной привод. К таким механизмам относятся шахтные скребковые конвейеры и центрифуги.

Тенденция развития забойных скребковых конвейеров определяется условиями их применения в комплексно-механизированных забоях, когда на скребковые конвейеры кроме основной функции по механизации доставки угля, возлагаются разнообразные добавочные функции.

Одной из таких функций, которая формирует новые требования к приводу, является функция по механизированной доставке оборудования (секций механизированных крепей и др.), его элементов, крепежного леса в очистной забой, как в процессе выемки угля, так и при ремонтах и монтажно-демонтажных работах. В [1] указано, что перемещение негабаритных грузов по выработкам допускается со скоростью 1/3 номинальной скорости.

Так же наличие второй скорости связано с требованиями «Правил безопасности в угольных шахтах». Низкая скорость должна быть не более 1/3 от

рабочей и с этой скоростью конвейер должен работать при запуске.

Эти требования определяют необходимость оснащения скребкового конвейера двухскоростным двигателем, скорости которого отличаются в 3 раза.

Применение двухскоростного двигателя позволяет решить задачу и по снижению динамических нагрузок в тяговом органе без применения упругих звеньев (гидромуфт или электромагнитных муфт) путем выполнения определенной последовательности включения электродвигателей головного и хвостового привода на первую и вторую скорость [2].

В настоящее время для выполнения указанных требований в приводах скребковых конвейеров применяют двухскоростные асинхронные двигатели. У этих двигателей в пазах статора уложено две обмотки с соотношением числа пар полюсов 1:3.

Такое техническое решение, при всей своей простоте, имеет ряд недостатков:

- стоимость двухскоростных двигателей значительно выше, чем односкоростных, что определено затратами активных материалов и трудозатратами при изготовлении.

Так в двухскоростном асинхронном двигателе ЭКВФ315М12/4 затраты на черные металлы больше на 40 %, на цветные металлы на 20 % и на электроизоляционные материалы - на 60 %, по сравнению с односкоростным двигателем ЭДКОФВ315М4, имеющим те же характеристики, что и двигатель ЭКВФ315М12/4 при большей скорости. Также значительно возрастают трудозатраты на укладку обмоток.

- в двухскоростном приводе нет возможности использовать гидромолы для защиты тягового органа от динамических перегрузок при заклинивании его [3-4].

Эти недостатки двухскоростных приводов скребковых конвейеров заставляют искать новые решения. Одним из таких решений является применение тиристорной системы управления с функцией квазичастотного регулирования.

Применение тиристорной системы управления позволяет за счет квазичастотного управления получить низкую скорость асинхронного двигателя, осуществить плавный пуск двигателя и реализовать экстренное торможение [5].

Основное преимущество тиристорной системы управления по сравнению с преобразователем частоты является ее более низкая стоимость [6].

Квазичастотное управление предполагает путем коммутации сетевого напряжения формирование напряжения, которое содержит гармоники частоты ниже сетевой [7]. В этих условиях становится актуальным анализ возможных законов формирования напряжения пониженной частоты и выбор наилучшего.

Классическая система квазичастотного управления предполагает наличие 18 тиристоров, что обеспечивает достаточно широкие возможности регулирования. Однако ограничимся тиристорной системой управления, у которой в каждой фазе двигателя имеется по паре тиристоров, включенных встречно-параллельно.

В такой схеме силовой части принципиально возможно несколько принципов формирования напряжения. Представляет интерес проанализировать работу привода с каждым вариантом формирования напряжения. С этой целью была синтезирована математическая модель привода с двигателем ЭДКОФВ315М4, в которой учтены эффект вытеснения тока и насыщение магнитной цепи. Порядок синтеза модели асинхронного двигателя описан в [8-11].

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Рассмотрим три варианта формирования импульсов квазичастотной системой управления.

Первый вариант – система имеет по одному тиристор в каждой фазе, причем в двух фазах включаются тиристоры в одном направлении, а в третьей фазе – в противоположном. Систему импульсно-фазового управления этого варианта назовем СИФУ 1.

СИФУ 1 – наиболее изученная схема формирования напряжения [5]. В этой системе, для получения частоты 10 Гц переключения производятся через 0,0166 с. Форма кривой напряжения зависит от ЭДС вращения и индуктивности цепи. На рис. 1 приведена характерная осциллограмма напряжения, если нагрузка представляет собой активные сопротивления.

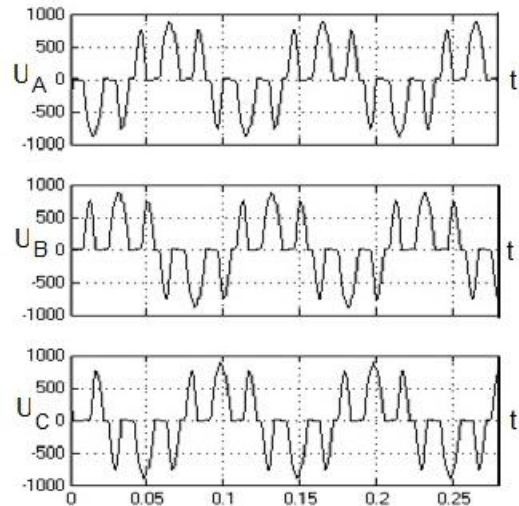


Рисунок 1 – Осциллограмма фазного напряжения с СИФУ 1

Второй вариант – в каждой фазе включаются по одному тиристор независимо от других фаз на время, достаточного для пропуска определенного числа полуволн – СИФУ 2.

Для формирования напряжения необходимой частоты в этой системе управления ток пропускается в течение двух полуволн одного направления. Управляющий импульс подается на соответствующий тиристор при прохождении фазного напряжения через ноль. В этом случае, если есть нулевой провод, тиристор откроется сразу. Если нулевой провод отсутствует, то длительность импульса должна быть достаточной, чтобы соответствующий импульс открыл подходящий тиристор в другой фазе.

На рис. 2 приведена характерная осциллограмма напряжения, если нагрузка представляет собой активные сопротивления.

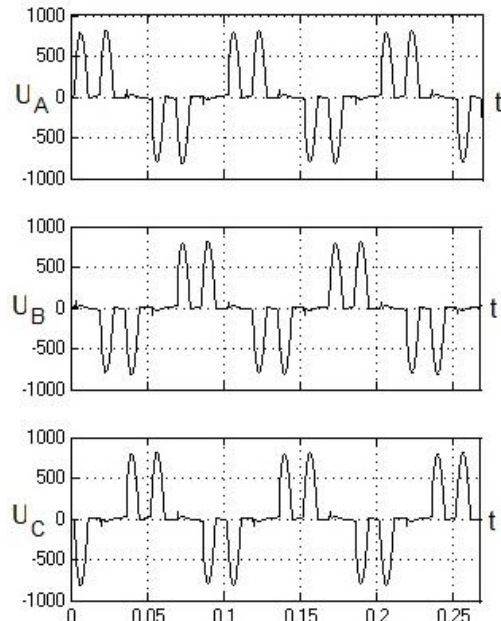


Рисунок 2 – Осциллограмма фазного напряжения с СИФУ 2

Третий вариант – система включает два тиристора в разных фазах в противоположных направлениях. Здесь возможно два варианта формирования тока.

Во-первых, (СИФУ 3.1), пара тиристоры открывается при прохождении линейного напряжения через ноль и пропускается по две полуволны одного направления.

Во-вторых, (СИФУ 3.2), попарно переключаются тиристоры по аналогии со схемой формирования тока в СИФУ 1, т. е. производится переключение через каждые 0,0166 с.

Осциллограмма фазного напряжения подобна осциллограмме на рис. 2. Нюансы зависят от длительности управляющего импульса.

Для оценки эксплуатационных качеств приводов определялись пусковые характеристики привода с различными СИФУ. В табл. 1 сведены результаты экспериментов с двигателем ЭДКОФВ315М4 (АД 1 – лопаточные пазы на роторе). Там же, для сравнения, приведены результаты экспериментальных исследований двигателя, который от двигателя АД 1 отличается пазами ротора (АД 2 – овалы пазы ротора). В качестве интегральной оценки предлагается ввести показатель качества пуска. Ввиду того, что нагрев двигателя пропорционален квадрату тока - этот показатель равен отношению пускового момента к квадрату пускового тока.

Таблица 1 – Пусковые характеристики привода

СИФУ	АД 1			АД 2		
	$I_n$	$M_n$	$M_n / I_n^2$	$I_n$	$M_n$	$M_n / I_n^2$
СИФУ1	8,035	1,679	0,026	10,728	4,07	0,035
СИФУ2	6,072	1,701	0,046	7,549	2,25	0,039
СИФУ 3.1	6,674	2,219	0,05	8,14	3,64	0,055
СИФУ 3.2	6,67	2,211	0,05	8,139	3,639	0,055

Для анализа качества получаемого напряжения с различными системами квазичастотного управления сравним спектральный состав напряжений, который приведен в табл. 2.

Таблица 2 – Гармонический состав напряжения на фазах двигателя при различных системах квазичастотного управления

Амплитуда гармоники	Тип СИФУ			
	СИФУ1	СИФУ2	СИФУ3.1	СИФУ3.2
$U_1$	435,12	331,79	415,66	352,75
$U_3$	0,09	1,407	0,198	0,312
$U_5$	464,85	273,98	444,05	279,5
$U_7$	0,21	221,16	0,879	218,28
$U_{11}$	108,51	107,56	104,5	88,13
$U_{13}$	118,22	57,27	112,032	36,48
$U_{17}$	0,99	19,56	0,088	19,76
$U_{19}$	0,72	31,06	0,026	25,30

Для удобства анализа в табл. 3 приведены относительная амплитуда первой гармоники  $U_{1*}$  и доля первой гармоники в действующем значении фазного напряжения  $U_{1отн}$

Таблица 3 – Характеристика гармонического состава СИФУ

Тип СИФУ	$U_{1*}$	$U_{1отн}$
СИФУ 1	0,47	0,663
СИФУ 2	0,36	0,663
СИФУ 3.1	0,36	0,691
СИФУ 3.2	0,38	0,691

Относительная амплитуда первой гармоники определялась по формуле

$$U_{1*} = \frac{U_1}{660 \cdot \sqrt{2}} \quad (1)$$

Доля первой гармоники в действующем значении фазного напряжения рассчитывалась по формуле

$$U_{1отн} = \frac{U_1}{\sqrt{\sum_{i=1}^{19} U_i^2}} \quad (2)$$

Из табл. 3 видно, что все СИФУ имеют примерно одинаковую относительную амплитуду первой гармоники. В тоже время самое высокое значение амплитуды первой гармоники СИФУ 1 не гарантирует высокий пусковой момент. Дело в том, что в гармоническом составе СИФУ 1 есть пятая гармоника, но отсутствует седьмая. Поэтому момент пятой гармоники, который является тормозным, не компенсируется моментом от седьмой гармоники. Это положение можно подтвердить, проанализировав пусковые характеристики. Так у двигателя с двойной клеткой пусковой момент значительно ниже, чем у двигателя с овальным пазом. Объясняется это тем, что за счет эффекта вытеснения тока, который в двигателях с двойной клеткой проявляется сильнее, момент от пятой гармоники сильнее тормозит машину. Поэтому пусковой момент у двигателя с двойной клеткой 1,679, а у двигателя с овальным пазом этот параметр равен 4,07.

На основании изложенного можно сделать вывод, что лучшие пусковые свойства, а также лучшие характеристики и более устойчивую работу обеспечивает СИФУ 3.2.

Вторым важным свойством для оценки качества привода является работа при номинальной скорости. Эксперименты показали, что при всех СИФУ в случае работы на активную нагрузку наблюдается срыв коммутации, в результате чего скорость колеблется в очень широких пределах, вплоть до изменения направления вращения. Работу двигателя можно стабилизировать, если в каждую фазу включить фильтрующую индуктивность. Включение индук-

тивності дозволяє знизити вплив вищих гармонік, но одночасно зменшує і пусковий момент. Крім того, наявність фільтруючої індуктивності збільшує вартість привода, що знижує його конкурентоспособність.

Аналіз роботи привода з СИФУ 3.2 показав, що стійку роботу можна забезпечити, шляхом зміщення переднього фронту управляючого імпульсу в сторону запозднання відносно моменту переходу напруги через нуль на 3–5 мс.

На рис. 3 показані механічні (а) і токові (б) характеристики двигача, розраховані за математичною моделлю при різних значеннях часу затримки управляючого сигналу СИФУ (3,5–5 мс.).

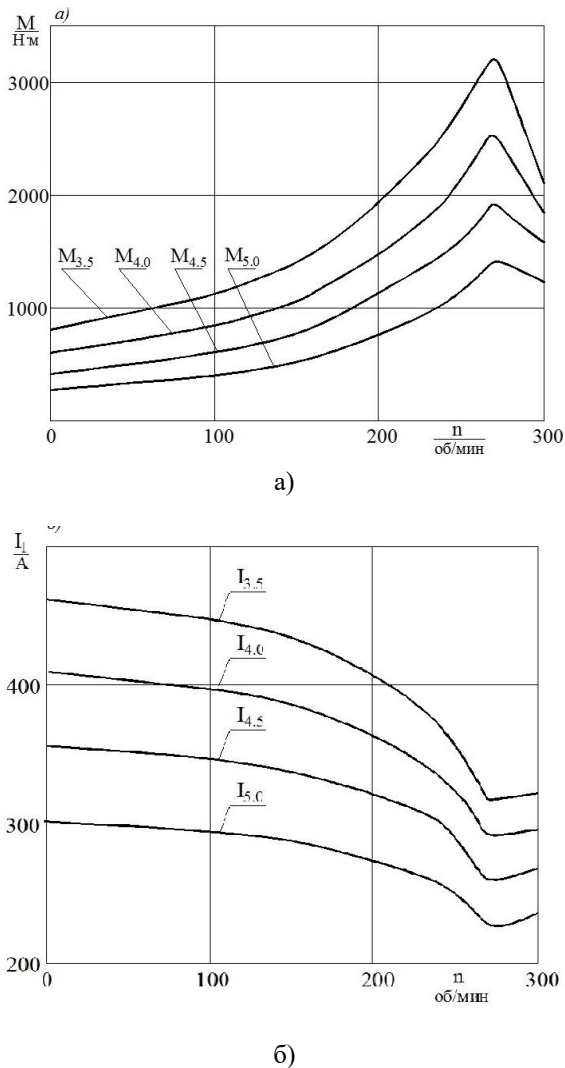


Рисунок 3 – Механічні (а) і токові (б) характеристики двигача при різних значеннях часу затримки СИФУ3.2

Для експериментальної перевірки результатів, отриманих на математичній моделі, був виготовлений макетний зразок привода з СИФУ 3.2.

На рис. 4 приведені осцилограми струму і швидкості, з яких видно, що двигач працює стійко.

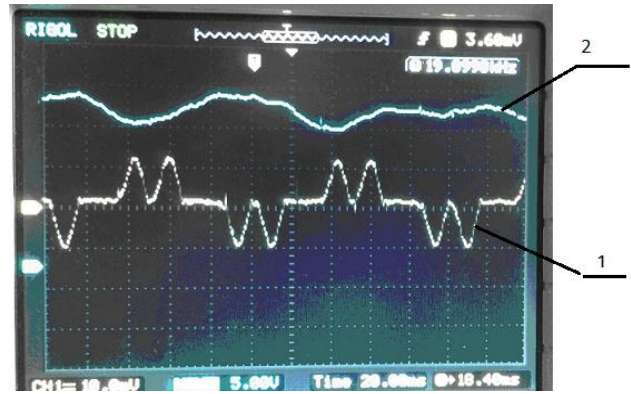


Рисунок 4 – Осцилограма струму (1) і частоти обертання (2) при номінальній швидкості

**ВИВОДИ.** В даній роботі розроблена математична модель і проведено дослідження роботи тиристорного привода з квазічастотною системою управління. Показано, що застосування тиристорного управління на основі квазічастотного регулювання забезпечує знижену швидкість при пуску конвеєра, що дозволяє підвищити техніко-економічні характеристики, забезпечити вимоги, пред'являемі до привода скребкового конвеєра в питанні забезпечення «маршевої» швидкості.

Виконані порівняння пускових характеристик привода з різними законами формування напруги, на основі яких пропонується для забезпечення зниженої швидкості при пуску конвеєра формувати напругу за законом, який забезпечує СИФУ 3.2.

Дослідження впливу на величину пускового моменту часу затримки управляючого імпульсу показали, що зміна часу затримки управляючого сигналу СИФУ дозволяє суттєво змінити пускові характеристики двигача.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сторчак С.О. Об утверждении Правил безопасности в угольных шахтах // Приказ №257 от 16.11.2004, зарегистрированный в Министерстве юстиции Украины 23.03.2005 за №327/10607.
2. Математическая модель для исследования нагрузок в двухскоростном многодвигательном приводе и тяговом органе скребкового конвейера / В.П. Кондрахин, А.А. Мельник, В.В. Косарев, Н.И. Стадник, И.В. Косарев // Научные труды ДонНТУ, Серия «Горно-электромеханическая». – 2008. – Вып. 16. – С. 132–140.
3. Осичев А.В., Ткаченко А.А. Оценка динамических свойств электропривода скребкового конвейера СР72 при различных причинах заклинивания его рабочего органа // Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика» науково-технічного журналу «ЕЛЕКТРОІНФОРМ» // «ЕКОінформ». – 2009. – Вып. 516. – С. 148–150.

4. Скородумов Б.А., Вишневецкий Г.В. Исследование факторов, влияющих на запуск скребковых конвейеров // «Горные машины и автоматика» – 1990. – Вып. № 4. – С. 21–22.

5. Худобин К.В., Цодик И.А. Применение тиристорного управления в приводе скребкового конвейера // Вестник «ДонГТУ». – 2013. – Вып. 38. – С. 303–308.

6. Маренич К.Н. Асинхронный электропривод горных машин с тиристорными коммутаторами. – Донецк: ДонГТУ, 1997. – 64 с.

7. Автоматизированный электропривод машин и установок шахт и рудников / К.Н. Маренич, Ю.В. Товстик, В.В. Турупалов, С.В. Василюк, И.Я. Лизан // Учеб. пособ. для студ. высш. учебн. завед. – Донецк: ООО «Технопарк ДонГТУ «УНИТЕХ» – 2015. – 252 с.

8. Цодик И.А., Худобин К.В. Исследование асинхронного привода с квазичастотным управле-

нием // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ» – 2012. – Вып. 61. – С. 124–128.

9. Цодик И.А., Худобин К.В. Синтез динамической модели асинхронного двигателя на основе численно-полевых расчетов // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ. – 2013. – Вип. 3/2013(80) – С. 16–19.

10. Худобин К.В., Цодик И.А. Учет эффекта вытеснения тока и насыщения магнитной цепи в математической модели асинхронного двигателя // Наукова практичний журнал «Електротехніка і електромеханіка». – 2014. – Вип. 2. – С. 56–59.

11. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин// Учеб. для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.

## APPLICATION OF QUASI FREQUENCY CONTROL IN THE TWO-SPEED DRIVE

**N. Zablodskiy**

Natsionalnyy universitet bioresursov i prirodopolzovaniya

vul. Geroyev Oborony, 15, g. Kiyev, 03041, Ukraine. E-mail: zablodskiyinn@gmail.com

**K. Khudobin**

International Committee of the Red Cross

vul. Velika Vasilkivska, 6, g. Kiyev, 01004, Ukraine. E-mail: wathab1987@mail.ru

**Purpose.** To improve the chain conveyor it must be staffed with two-speed asynchronous drive. One of technically and economically feasible options for such a drive - a drive with thyristor control system with the function of quasi-frequency modulation.

**Formulation of a problem.** We have explored the asynchronous drive with thyristor control system. Drive is distinguished by the features of the quasi-frequency modulation control systems. It is necessary to determine the characteristics of the drive with different principles of the formation of quasi-sinusoidal voltage.

**Methodology.** We have used the mathematical model comprising a model of the induction motor, taking into account the effect of the displacement current and the saturation of the magnetic circuit, analyzed various options for forming of quasi-sinusoidal voltage.

**Results.** We measured the performance of the scraper conveyor with a drive that has allowed to define the principle of forming the voltage, at which the scraper conveyor has the best characteristics. To ensure stable operation at rated speed we proposed to impute a time delay for the thyristor pulse control. The dependence of the starting characteristics from the pulse control time delay was researched.

It is shown the resulting characteristics of the engine, which were received on the base of exploration of mathematical model with displacement current effect and the saturation of the magnetic circuit. The test results of the prototype fully coincide with the test results of the mathematical model. Drive stably running at a rated speed.

**Originality.** Well-trying asynchronous drive with thyristor control system. Drive is distinguished by the features of quasi-frequency modulation. Using a mathematical model comprising a model of the induction motor, taking into account the effect of the displacement current and the saturation of the magnetic circuit, analyzed various options for forming of quasi-sinusoidal voltage.

**Practical value.** We are defined the principles of formation of quasi-sinusoidal voltage, at which the chain conveyor has a better starting characteristics.

Proposed features of the pulse control formation will ensure stable operation on a rated speed. Reference 11, tables 3, figures 4.

**Key words.** Scraper conveyor, the induction motor, thyristor control system, quasi-frequency modulation (impulse modulation), mathematical model, the delay control signal, starting characteristics, prototype.

## REFERENCES

1. Storchak, S. (2005), "On Approval of Safety Regulations in coal mines", Order the Ministry of Justice of Ukraine no. 257 from 16.11.2004.

2. Kondrahin, V., Melnik, A. Kosarev, V., Stadnik, N., Kosarev, I. (2008), "Mathematical model for investigating stresses in two-speed multi-motor drive and traction organ scraper conveyor", *Scientific*

works of Donetsk National Technical University, iss. 16, pp. 132–140.

3. Osichev, A., Tkachenko, A., (2009), "Evaluation of dynamic properties of electric scraper con Weier SR72 for various reasons-wedging of its working body", *Special Issue "The problem of automatic electric drive. Theory and Practice"*, scientific technical journal. "ELEKTROINFORM", iss. 516, pp. 148–150.

4. Skorodumov, B., Vishnevetskii, G. (1990), "Research on factors affecting on the launching the conveyors", *Mining machines and equipment*, iss. 4, pp. 21–22.

5. Khudobin, K., Tsodik, I. (2013), "Application of thyristor control in the drive of the scraper conveyor", *Bulletin "DonNTU"*, iss. 38, pp. 303–308.

6. Marenich, K. (1997), *Asinhronnyiy elektroprivod gorniyh mashin s tiristornymi kommutatorami* [Asynchronous electric mining machines with thyristor switches: Donetsk State Technical University], Donetsk, Ukraine.

7. Marenich, K. Tovstik, Y., Turupalov, V., Vasilets, S., Lisa, I., (2015), *Avtomatizirovannyiy elektroprivod mashin i ustanovok shaht i rudnikov* :

*Ucheb. posob. dlya stud. vyissh. uchebn. zaved* [Automatic Electric machines in the coal mines: Textbook for students of higher education institutions]: ООО "Technopark DonSTU" Unitech", Donetsk, Ukraine.

8. Khudobin, K., Tsodik, I. (2012), "Research of the asynchronous drive with quasi-frequency control system", *Bulletin of National Technical University "HPI"*, iss. 61, pp. 124–128.

9. Khudobin, K., Tsodik, I. (2013), "Synthesis of a dynamic model of the induction motor on the basis of numerical calculation", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, iss. 3, pp. 16–19.

10. Khudobin, K., Tsodik, I. (2014), "Accounting for the effect of current displacement, and saturation of the magnetic circuit in a mathematical model of the induction motor", *Electrical engineering and Electro-Mechanics*, iss. 2, pp. 56–59.

11. Kopylov, I. (2001), *Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin: Ucheb. dlya vuzov* [Mathematical modeling of electrical machines: Textbook for high schools], Higher School, Moscow, Russia.

Стаття надійшла 20.01.2016.