

## ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ СУШКИ И ПЕРЕРАБОТКИ УГОЛЬНЫХ КОНЦЕНТРАТОВ И ШЛАМОВ

Н. Заблодский<sup>1</sup>, В. Грицюк<sup>2\*</sup>, Д. Морозов<sup>2</sup>, Е. Руднев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Кафедра электрических машин и эксплуатации электрооборудования, Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, Киев, Украина

<sup>2</sup>Кафедра автоматизированных электромеханических систем и электропривода, Донбасский государственный технический университет, Лисичанск, Украина

<sup>3</sup>Факультет автоматизации и электротехнических систем, Донбасский государственный технический университет, Лисичанск, Украина

\*Ответственный автор: e-mail [grits.86@mail.ru](mailto:grits.86@mail.ru), тел. +380999485433, факс: +380645172024

## ELECTROMECHANICAL TRANSDUCER FOR DRYING AND PROCESSING OF COAL CONCENTRATES AND SLUDGES

M. Zablodskyi<sup>1</sup>, V. Hrytsiuk<sup>2\*</sup>, D. Morozov<sup>2</sup>, Ye. Rudniev<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Electrical Machinery and Electrical Equipment Operating, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>Department of Automated Electromechanical Systems and Electric Drive, Donbas State Technical University, Lysychansk, Ukraine

<sup>3</sup>Faculty of Automation and Electrical Systems, Donbas State Technical University, Lysychansk, Ukraine

\*Corresponding author: e-mail [grits.86@mail.ru](mailto:grits.86@mail.ru), tel. +380999485433, fax: +380645172024

### ABSTRACT

**Purpose.** Determination of the effect of perforations in the hollow ferromagnetic rotor on dynamic characteristics of the electro-mechanical transducer.

**Methods.** Calculation of the dynamic characteristics of the electromechanical transducer with a hollow smooth and perforated rotor was performed using the theory of the general electrical machine, as well as the numerical solutions of differential equations by finite elements' method in three-dimensional statement.

**Findings.** The paper presents the research into the impact of rotor holes on the form of dynamic characteristics, which was carried out on the basis of comparing characteristics of the electromechanical transducer with those of smooth and perforated rotor. Introduction of rotor perforations brings about downward transposition of the mechanical dynamic characteristic parallel to itself. Starting the transducer with hollow ferromagnetic rotor, compared to starting the basic asynchronous motor, has a lower amplitude and smaller number of pulsations of electro-magnetic shock torque. We suggest calculating the dynamic characteristics of the electromechanical transducer with a hollow ferromagnetic rotor by way of combining the generalized theory of electrical machines with numerical solution of finite elements' method in three-dimensional statement. This approach was tested by juxtaposing the calculated and experimental data obtained for the physical model of the transducer with a hollow ferromagnetic rotor.

**Originality.** Dynamic characteristics of the electromechanical transducer with a hollow smooth and perforated rotor were obtained for starting with ventilation load.

**Practical implications.** The study results allow to expand the scientific theoretical basis of asynchronous machines with a ferromagnetic rotor and can be used to optimize the design and improve the efficiency of implementing electromechanical transducers with a hollow perforated rotor.

**Keywords:** electromechanical transducer, coal concentrate, drying, dynamic characteristics, perforated rotor, inductance

### 1. ВВЕДЕНИЕ

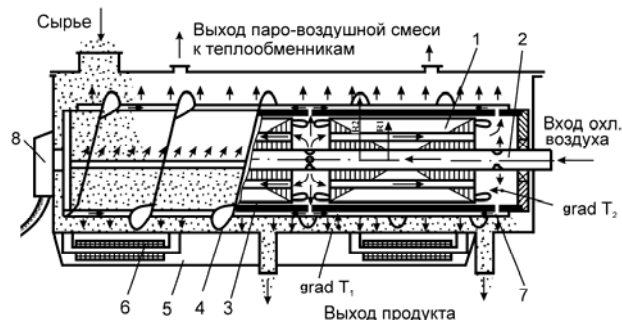
Из всех перерабатываемых углей на обогатительных фабриках большая часть обогащается мокрыми способами. Поэтому наряду с зольностью, содержанием серы, теплотой сгорания, влажность отгружаемого угля является одним из важнейших показателей качества. Снижение влажности угольных концентратов

и шламов связано с уменьшением объемов перевозок балласта в виде избыточной влаги, предотвращением смерзания в зимнее время и ведет к повышению эффективности работы тепловых электростанций и промышленных котельных.

К числу современных тенденций в сфере научных разработок XXI столетия относится использование

электромеханических преобразователей как звеньев технологической цепи по переработке сыпучих и вязких материалов. Перспективный класс полифункциональных электромеханических преобразователей энергии (ПЭМП), предназначенных для непосредственного осуществления технологических процессов, отличается усиленной концентрацией функциональных и энергетических свойств и практически полным использованием поступающей из сети электрической энергии (Zablodskiy, Plyugin, & Gritsyuk, 2016).

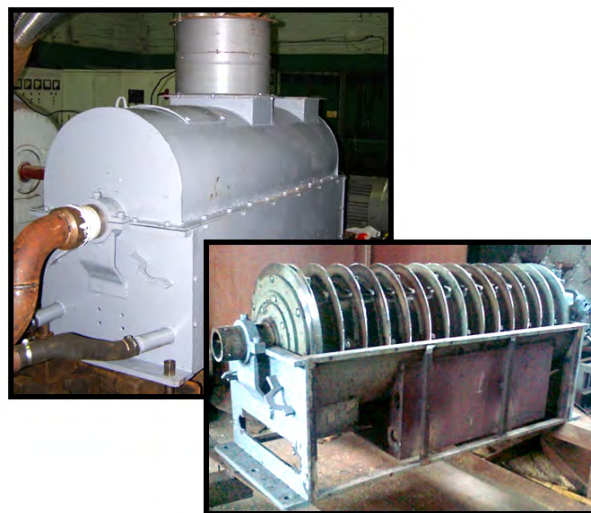
Создание ПЭМП и технологий на их основе базируется на идее совмещения в одном электромеханическом устройстве одновременно нагревательных, транспортирующих, смешивающих функций, интеграции тепловой энергии и направление последней в зону переработки сырья. В ПЭМП используется конструкция полого ферромагнитного ротора (ПФР), который выполняет одновременно функции ротора асинхронного двигателя (АД), нагревателя, исполнительного механизма и защитного корпуса. При этом ПФР охлаждается сырьем, которое перерабатывается. Дополнительным охлаждающим агентом в ПЭМП может выступать воздух и легкоплавкие материалы с высокой теплоемкостью и скрытой теплотой плавления. ПЭМП шнекового типа (Рис. 1) состоит из двух модулей, работающих в режиме противовключения.



**Рисунок 1. Конструктивно-технологическая схема шнекового ПЭМП:** 1 – статор двигательного (тормозного) модуля; 2 – полый неподвижный вал; 3 – внешний ротор-шнек; 4 – днище шнека; 5 – корпус; 6 – индукторы подогрева днища; 7 – аксиальные каналы ротора-шнека; 8 – ввод питающего напряжения

Два статора, расположенные на общем полом валу, создают встречно направленные электромагнитные моменты, обеспечивая необходимую скорость вращения полого цилиндра общего ротора без применения механического редуктора. Ротор, имеющий шнековую навивку, кроме функции перемещения рабочего материала одновременно обеспечивает нагрев последнего. ПЭМП не имеют аналогов в мире, что позволяет создавать конкурентоспособные технологии.

На Рисунке 2 представлен общий вид экспериментального образца шнекового ПЭМП, который изготовлен на Первомайском электромеханическом заводе им. К. Маркса. При условии минимума теплоотдачи в окружающую среду КПД шнекового ПЭМП достигает значения 0.98.



**Рисунок 2. Общий вид экспериментального образца шнекового ПЭМП**

Среди существующих устройств наиболее близкими по своей идеологии создания являются электромеханические преобразователи, совмещающие функции транспортировки веществ и генерации тепловой энергии. К важным результатам, полученным авторами (Kim & Ivanov, 2009), принадлежит теоретическое обоснование принципов конструирования электромеханических перекачивающих устройств. Реализованы такие устройства в виде асинхронных двигателей с вращающимися вторичными элементами, имеющими напорные лопасти, винтовую навивку и т.п.

В работе (Shinkarenko, Naniy, Kotlyarova, Dunev, & Egorov, 2014) определены принципы структурной классификации, приведены основы направленного синтеза электромеханических преобразователей движения, совмещенных с рабочим органом – механическим винтом. Первичная часть таких преобразователей представлена в виде последовательности полюсов, полярность которых чередуется с сосредоточенными обмотками, образующими винтовую активную поверхность. Они нашли применение в низкоскоростном электроприводе силовых передач (шпинделей, подъемников, упорных механизмов и др.).

Среди зарубежных публикаций последнего времени встречаются работы, посвященные разработкам двухстаторных вращательно-линейных электромеханических преобразователей, которые способны вращать и перемещать вдоль своей оси (Amiri, 2014). Такие устройства привлекают к себе все больший интерес и обычно встречаются в таких процессах, как бурение, перемешивание, нарезание резьбы, завинчивание, приведение в действие роботизированных устройств. В качестве ротора двухстаторного вращательно-линейного преобразователя, как правило, выступает ферромагнитный элемент цилиндрической формы. К значительным достижениям зарубежных ученых следует отнести результаты в области изучения физических процессов в таких преобразователях (Kluszczynski & Szczygiel, 2014).

Существенными преимуществами технологий на основе ПЭМП является не только высокое значение КПД, но и значительные сокращения производствен-

ной площади, количества единиц оборудования и сроков его окупаемости. В связи с этим важной научно-прикладной проблемой электромеханики является оптимизация конструкции ПЭМП для выполнения специфических функций технологического назначения, таких как, сушка и переработка угольных шламов и концентратов, а также экструзионная обработка различных материалов.

Конструкция шнекового ПЭМП предполагает воздушную систему охлаждения, в которой охлаждающий агент поступает в межстаторную зону и зоны лобовых частей через три группы радиальных отверстий в роторе. Работа преобразователя с применением специальных режимов сушки и переработки требует заданной частоты вращения ротора-шнека. Кроме уменьшения интенсивности механического воздействия на материал, снижение частоты вращения ротора-шнека по причине радиальных отверстий, может привести к недопустимому увеличению температуры в рабочей зоне.

Распределение магнитной индукции в воздушном зазоре ПЭМП с перфорированным ротором в отличие от традиционных электрических машин имеет весьма оригинальный характер. Дискретное расположение отверстий ротора приводит к возникновению неравномерностей магнитного поля в воздушном зазоре, как в осевом, так и в тангенциальном направлениях, а также к перераспределению вихревых токов в роторе, что в свою очередь оказывает влияние на выходные характеристики ПЭМП.

Необходимо отметить, что в отечественной и зарубежной технической литературе отсутствуют работы, в которых бы рассматривались математические модели и методы расчета электромеханических преобразователей с перфорированным ротором, а также влияние перфораций ферромагнитного ротора на выходные характеристики.

## 2. ИЗЛОЖЕНИЕ МАТЕРИАЛА И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Как известно, анализ динамических режимов АД с ферромагнитным ротором может быть выполнен с использованием теории обобщенной электрической машины, в основе которой лежит замена реальной машины – двухполюсной двухфазной симметричной идеализированной машиной, с взаимно ортогональными обмотками на статоре и на роторе (Рис. 3).

Для такой машины справедлива система уравнений, состоящая из уравнений Кирхгоффа, уравнения электромагнитного момента и уравнения движения.

Индуктивности обмоток рассчитываются с использованием известных выражений. Важной особенностью системы уравнений является зависимость параметров вторичной цепи от скольжения, точное установление которых на основе теории обобщенной электрической машины не представляется возможным. Для установления этих зависимостей целесообразно применение методов полевого анализа.

Исследование влияния отверстий ферромагнитного ротора на форму динамической механической характеристики проводилось на базе сравнения характеристик ПЭМП с гладким и перфорированным ротором, полученных в среде “Matlab-Simulink”.

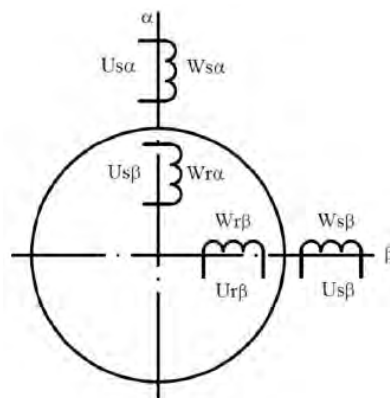


Рисунок 3. Обобщенная электрическая машина

Основными отличиями, которые обусловлены наличием перфораций ротора и требуют учета при расчете механических характеристик ПЭМП с гладким и перфорированным ротором являются значения параметров ферромагнитного ротора и его момент инерции. Оценка конкретного распределения вихревых токов, как по толщине, так и вдоль оси ротора необходима для расчета и проектирования. Вместе с тем, именно характер распределения вихревых токов определяет величину активного сопротивления массивного ротора, которое играет первостепенную роль в формировании выходных характеристик и свойств ПЭМП с перфорированным ротором.

Активное сопротивление гладкого и перфорированного роторов определялось по результатам численного эксперимента для различных значений скольжения (Рис. 4). Индуктивное сопротивление рассчитывалось на основании известного соотношения для ферромагнитного ротора  $\frac{x_2}{r_2} = 0.6$  (Lushchenko & Lesnik, 1984).

Расчет значений моментов инерции выполнялся на базе трехмерных геометрических моделей гладкого и перфорированного ротора с помощью встроенной функции “Subdomain Properties” программы “Comsol Multiphysics”.

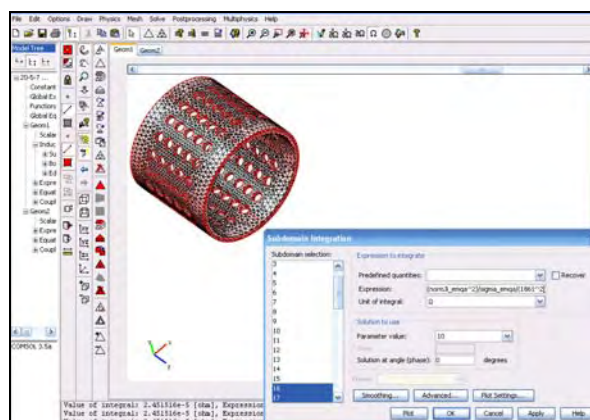


Рисунок 4. Определение активного сопротивления ротора

На Рисунке 5 представлена структура модели для исследования динамических механических характеристик ПЭМП с полым ферромагнитным ротором, работающего в составе теплогенерационной системы.

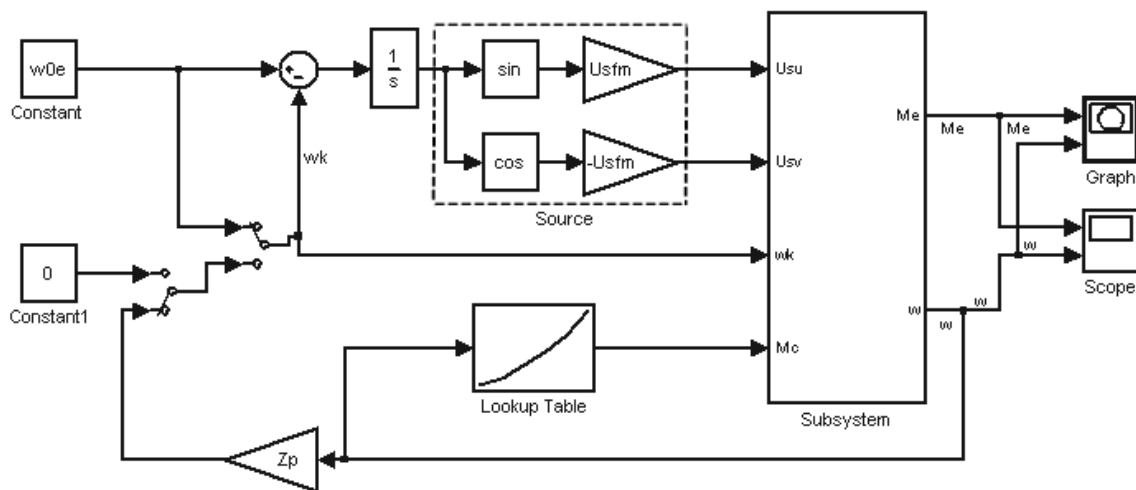


Рисунок 5. Структура модели для исследования динамических механических характеристик

Собственно модель объекта исследования свернута в подсистему (Subsystem), запитанную от источника (Source). Для измерения и построения зависимостей момента и скорости служат блоки Scope и Graph. Блок Lookup Table служит для задания функции момента нагрузки. Для машин с вентиляторной нагрузкой, плавно возрастающий по мере увеличения скорости момент сопротивления, может быть представлен в виде нелинейной функции:

$$M_o(s) = M_p \cdot \left(\frac{n}{n_n}\right)^2 + M_{co}, \quad (1)$$

где:

$M_p$  – расчетный момент сопротивления при  $n = n_n$ .  
При этом:

$$M_{co} = (0.05 \div 0.1) M_p. \quad (2)$$

В случае работы ПЭМП на закрытую задвижку возникает только статическое давление. В этом случае производительность равна нулю. В случае постепенно открывающейся задвижки, часть энергии вращения переходит в энергию движения среды, а первоначальное давление будет снижаться. Поэтому, зависимость напора от производительности (момента от скорости) будет иметь вид падающей кривой. Теоретически, точка пересечения кривой с осью производительности достигается, если транспортируемая среда содержит энергию движения и отсутствует статическое давление. Рабочая точка находится в месте пересечения характеристики ПЭМП и характеристики системы (Рис. 6).

Безусловно, основным фактором, определяющим различия механических характеристик ПЭМП с гладким и перфорированным ротором, являются значения активного и индуктивного сопротивления ротора. Введение перфораций ротора приводит к перемещению характеристики ПЭМП вниз параллельно самой себе. При этом, рабочая точка A1, перемещаясь по характеристике системы, займет положение A2, следовательно, с уменьшением расхода уменьшится развиваемый напор.

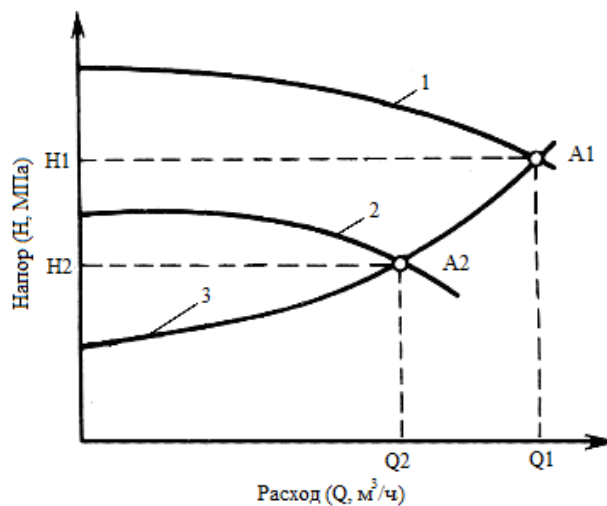


Рисунок 6. Характеристики ПЭМП и системы: 1 – характеристика ПЭМП с полым гладким ротором; 2 – характеристика ПЭМП с полым перфорированным ротором; 3 – характеристика системы

На Рисунке 7 представлены динамические механические характеристики ПЭМП с гладким и перфорированным ротором, наглядно демонстрирующие процесс пуска при вентиляторной нагрузке. Из результатов моделирования видно, что характеристика ПЭМП с полым перфорированным ротором находит рабочую точку при меньших значениях момента и скорости, соответственно его работа будет сопровождаться большими потерями и нагревом.

Начало пуска ПЭМП сопровождается всплеском момента и непродолжительными по времени его пульсациями (Рис. 8), имеющими более выраженный характер для ПЭМП с гладким ротором. Амплитуда пускового момента ПЭМП с перфорированным ротором на 27% меньше значения амплитуды пускового момента ПЭМП с гладким ротором. При этом время выхода на установившийся режим для обоих случаев практически одинаково и составляет порядка  $t_y \approx 0.4$  с.

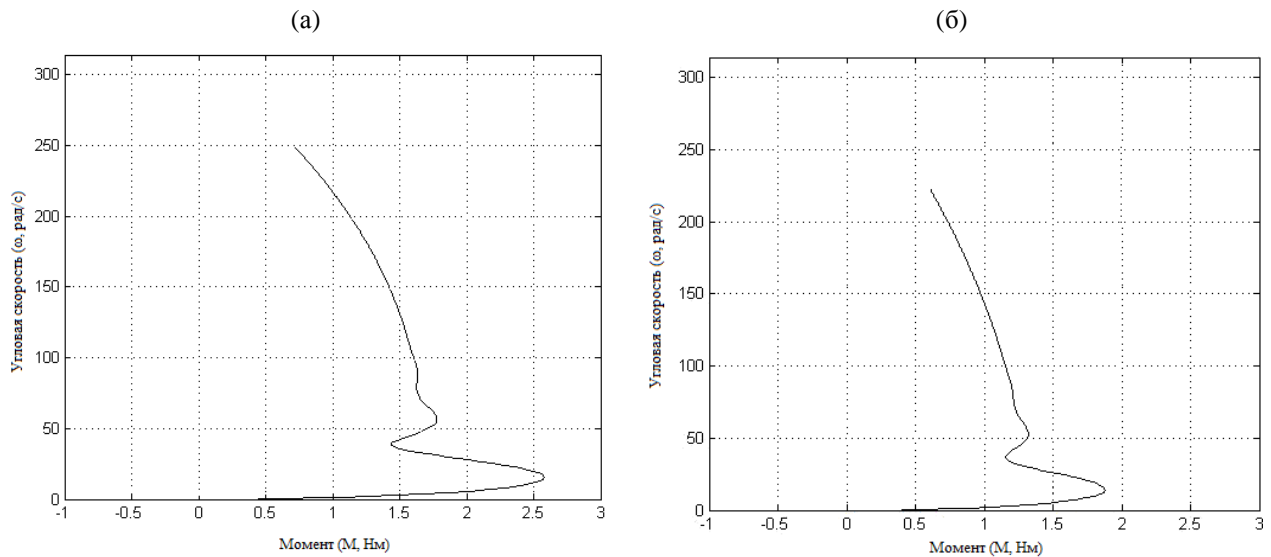


Рисунок 7. Динамические механические характеристики ПЭМП: (а) с полым гладким ротором; (б) с полым перфорированным ротором

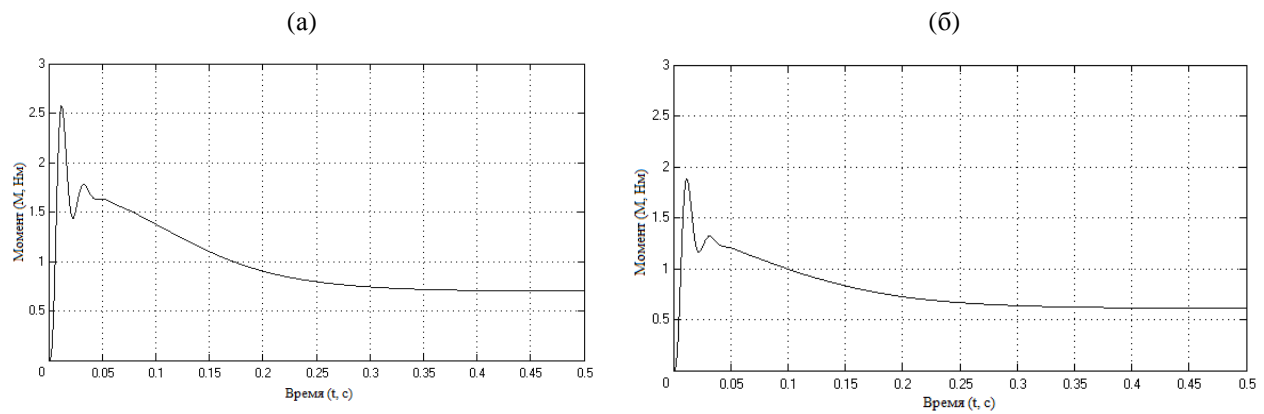


Рисунок 8. Зависимости  $M = f(t)$  при пуске ПЭМП: (а) с полым гладким ротором; (б) с полым перфорированным ротором

Зависимости угловой скорости вращения гладкого и перфорированного ротора ПЭМП от времени представлены на Рисунке 9. В обоих случаях процесс разгона быстрый и протекает практически без пульсаций.

На Рисунке 10 для сравнения представлены временные зависимости электромагнитного момента (а) и угловой скорости вращения (б) ротора базового АД при пуске с вентиляторной нагрузкой.

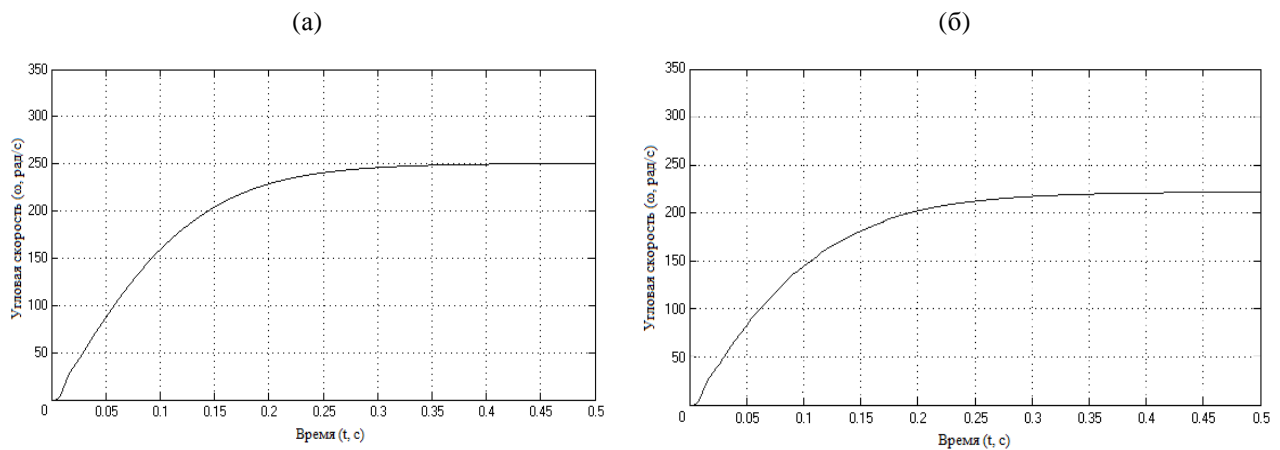


Рисунок 9. Зависимости  $\omega = f(t)$  при пуске ПЭМП: (а) с полым гладким ротором; (б) с полым перфорированным ротором

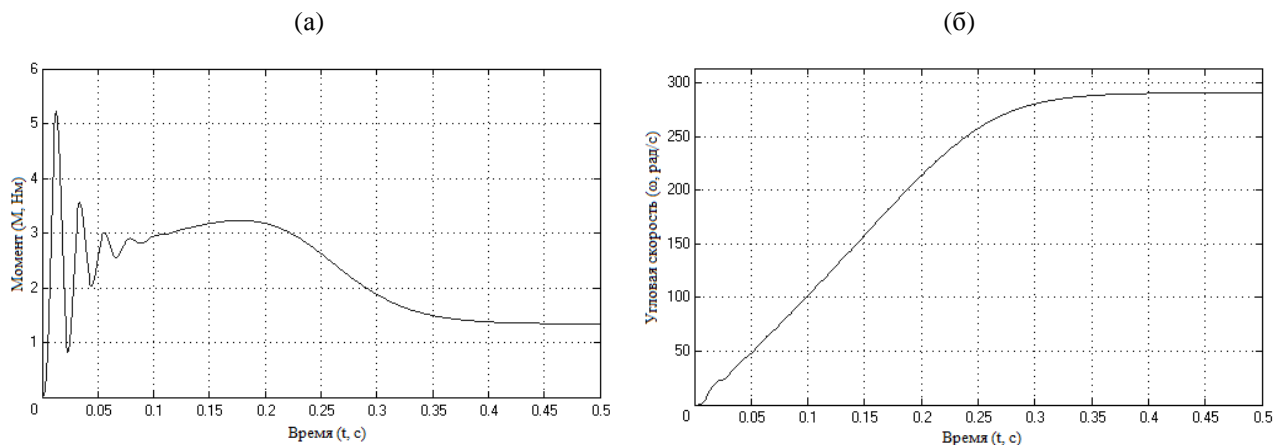


Рисунок 10. Зависимости  $M = f(t)$  и  $\omega = f(t)$  базового АД при пуске с вентиляторной нагрузкой

### 3. ВЫВОДЫ

В сравнении с пуском базового асинхронного двигателя, пуск ПЭМП с полым ферромагнитным ротором существенно отличается меньшей амплитудой и количеством пульсаций ударного электромагнитного момента. Таким образом, пуск ПЭМП с полым ферромагнитным ротором можно рассматривать как более мягкий, а значит более благоприятный с точки зрения снижения гидравлических ударов и механических нагрузок на рабочий орган.

Предложен подход к расчету динамических характеристик электромеханического преобразователя с полым ферромагнитным ротором, заключающийся в сочетании метода теории обобщенной электрической машины с численным решением методом конечных элементов в трехмерной постановке. Данный подход опробован путем сопоставления расчетных и опытных данных полученных для физической модели преобразователя с полым ферромагнитным ротором.

### БЛАГОДАРНОСТЬ

Проведение данного исследования было бы невозможным без поддержки, осуществленной в рамках госбюджетной научно-исследовательской тематики № 208 “Разработка подсистемы прогноза и управления динамикой метановости горных выработок”, выполняемой в Донбасском государственном техническом университете. Авторы выражают признательность профессору Н.И. Антошенко за поддержку в проведении исследований.

### ABSTRACT (IN RUSSIAN)

**Цель.** Определение влияния перфораций полого ферромагнитного ротора на динамические характеристики электромеханического преобразователя.

**Методика.** Расчет динамических характеристик электромеханического преобразователя с полым гладким и перфорированным ротором выполнялся с использованием теории обобщенной электрической машины, а также с использованием численного решения дифференциальных уравнений методом конечных элементов в трехмерной постановке.

**Результаты.** Представлено исследование влияния отверстий ротора на форму динамических характеристик, которое проводилось на базе сравнения характеристик электромеханического преобразователя с гладким и перфорированным ротором. Введение перфораций ротора приводит к перемещению динамической механической характеристики вниз параллельно самой себе. Пуск преобразователя с полым ферромагнитным ротором, в сравнении с пуском базового асинхронного двигателя, отличается меньшей амплитудой и количеством пульсаций ударного электромагнитного момента. Предложен подход к расчету динамических характеристик электро-

### REFERENCES

- Amiri, E. (2014). Circuit Modeling of Double-Armature Rotary-Linear Induction Motor. In *IECON 2014-40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 431-436). New Jersey: IEEE. <https://doi.org/10.1109/IECON.2014.7048536>
- Kim, K., & Ivanov, S. (2009). On the Problem of Determining Speed-Torque Characteristics of Thermal Electromechanical Converters. *Russian Electrical Engineering*, 80(8), 459-465. <https://doi.org/10.3103/s1068371209080094>
- Kluszczyński, K., & Szczygiel, M. (2014). How to Convert a Factory-Manufactured Induction Motor into Rotary-Linear Motor? Part 1 Constructional Issues. In *15th International Workshop on Research and Education in Mechatronics (REM)* (pp. 1-6). New Jersey: IEEE. <https://doi.org/10.1109/rem.2014.6920239>
- Lushchenko, A.I., & Lesnik, V.A. (1984). *Asinhronnye mashiny s massivnym ferromagnitnym rotorom*. Kyiv: Naukova dumka.
- Shinkarenko, V., Naniy, V., Kotlyarova, V., Dunev, A., & Egorov, A. (2014). Osobennosti identifikatsii geneticheskoy informatsii v elektromehaniicheskikh preobrazovatel'jakh dvizheniya tipa “vint – gajka”. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, (38), 156-160.
- Zablodskiy, N., Plyugin, V., & Grytsyuk, V. (2016). Polyfunctional Electromechanical Energy Transformers for Technological Purposes. *Russian Electrical Engineering*, 87(3), 140-144. <https://doi.org/10.3103/s1068371216030123>

механического преобразователя с полым ферромагнитным ротором, заключающийся в сочетании метода теории обобщенной электрической машины с численным решением методом конечных элементов в трехмерной постановке. Данный подход опробован путем сопоставления расчетных и опытных данных полученных для физической модели преобразователя с полым ферромагнитным ротором.

**Научная новизна.** Получены динамические характеристики электромеханического преобразователя с полым гладким и перфорированным ротором при пуске с вентиляторной нагрузкой.

**Практическая значимость.** Результаты исследования позволяют расширить научно-теоретическую базу асинхронных машин с ферромагнитным ротором и могут быть использованы для оптимизации конструкции и повышения эффективности использования электромеханических преобразователей с полым перфорированным ротором.

**Ключевые слова:** *электромеханический преобразователь, угольный концентрат, сушка, динамические характеристики, перфорированный ротор, индуктивность*

## ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

**Мета.** Визначення впливу перфорацій порожнистого ферромагнітного ротора на динамічні характеристики електромеханічного перетворювача.

**Методика.** Розрахунок динамічних характеристик електромеханічного перетворювача з порожнистим гладким і перфорованим ротором виконувався з використанням теорії узагальненої електричної машини, а також з використанням чисельного рішення диференціальних рівнянь методом кінцевих елементів у тривимірній постановці.

**Результати.** Представлено дослідження впливу отворів ротора на форму динамічних характеристик, що проводилося на базі порівняння характеристик електромеханічного перетворювача з гладким і перфорованим ротором. Введення перфорацій ротора призводить до переміщення динамічної механічної характеристики вниз паралельно самій собі. Пуск перетворювача з порожнистим ферромагнітним ротором, у порівнянні з пуском базового асинхронного двигуна, відрізняється меншою амплітудою та кількістю пульсацій ударного електромагнітного моменту. Запропоновано підхід до розрахунку динамічних характеристик електромеханічного перетворювача з порожнистим ферромагнітним ротором, що полягає в поєднанні методу теорії узагальненої електричної машини з чисельним рішенням методом кінцевих елементів у тривимірній постановці. Даний підхід випробуваний шляхом порівняння розрахункових і дослідних даних, отриманих для фізичної моделі перетворювача з порожнистим ферромагнітним ротором.

**Наукова новизна.** Отримано динамічні характеристики електромеханічного перетворювача з порожнистим гладким і перфорованим ротором при пуску з вентиляторним навантаженням.

**Практична значимість.** Результати дослідження дозволяють розширити науково-теоретичну базу асинхронних машин з ферромагнітним ротором і можуть бути використані для оптимізації конструкції й підвищення ефективності використання електромеханічних перетворювачів з порожнистим перфорованим ротором.

**Ключові слова:** *електромеханічний перетворювач, вугільний концентрат, сушка, динамічні характеристики, перфорований ротор, індуктивність*

## ARTICLE INFO

Received: 03 November 2016

Accepted: 30 November 2016

Available online: 30 December 2016

## ABOUT AUTHORS

Mykola Zablodskyi, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Electrical Machinery and Electrical Equipment Operating, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 15 Heroiv Oborony St, 8/1, 03041, Kyiv, Ukraine. E-mail: [zablodskiyann@gmail.com](mailto:zablodskiyann@gmail.com)

Volodymyr Hrytsiuk, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automated Electromechanical Systems and Electric Drive, Donbas State Technical University, 84 Peremohy Ave., 93100, Lysychansk, Ukraine. E-mail: [grits.86@mail.ru](mailto:grits.86@mail.ru)

Dmytro Morozov, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Automated Electromechanical Systems and Electric Drive, Donbas State Technical University, 84 Peremohy Ave., 93100, Lysychansk, Ukraine. E-mail: [dimorozov2@yandex.ua](mailto:dimorozov2@yandex.ua)

Yevhen Rudniev, Candidate of Technical Sciences, Dean of the Faculty of Automation and Electrical Systems, Donbas State Technical University, 84 Peremohy Ave., 93100, Lysychansk, Ukraine. E-mail: [rudnev\\_evgen@mail.ru](mailto:rudnev_evgen@mail.ru)