

**В.В. РЫМША, И.Н. РАДИМОВ, М.В. ГУЛЫЙ,  
И.П. БАБИЧ, А.А. КАЛИНИЧЕНКО, С.А. ФОКИН**

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНОТРОННОЙ СИСТЕМЫ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Наведено результати розробки та практичної реалізації електромеханотронної системи малої потужності, яка містить безконтактний електродвигун та кульково-хвильовий редуктор. Створено математичну модель електромеханотронної системи у середовищі Matlab-Simulink, яка дозволяє розрахувати параметри та характеристики системи. Виготовлено макетний зразок, випробування якого підтвердили працездатність розробленої електромеханотронної системи.

**Ключові слова:** вентильний двигун з постійними магнітами, кульково-хвильовий редуктор, давач положення ротору, регулятор швидкості, метод скінченних елементів, математична модель, механічна характеристика, електромеханічна характеристика.

Представлены результаты разработки и практической реализации электромеханотронной системы малой мощности, в состав которой входят бесконтактный электродвигатель и шарико-волновой редуктор. Создана математическая модель электромеханотронной системы в среде Matlab-Simulink, позволяющая рассчитать параметры и характеристики системы. Изготовлен макетный образец, испытания которого подтвердили работоспособность разработанной электромеханотронной системы.

**Ключевые слова:** вентильный двигатель с постоянными магнитами, шарико-волновой редуктор, датчик положения ротора, регулятор скорости, метод конечных элементов, математическая модель, механическая характеристика, электромеханическая характеристика.

**Purpose.** Presentation of the results of development and practical implementation of an an electromechanotronic system of low power, which includes a brushless electric motor and a ball-wave gear. **Methodology.** The calculations of the magnetic fields of the motor are carried out with the finite elements method by FEMM program. The calculations of the characteristics of the system are carried out with the Matlab-Simulink simulation model. **Results.** As a result of calculations, the mechanical and electromechanical characteristics of the electromechanotronic system, which is designed, was obtained. Tests of the prototype model of the electromechanotronic system confirmed the principle workability of the adopted design and design solutions in its development. **Originality.** The use of the compact ball-wave gear and effective brushless motor are allowed to create small-size electromechanotronic system with maximum torque 30 Nm and rotation speed 50 rpm. **Practical value.** The developed electromechanotronic system, through a combination of the brushless motor and ball-wave gear, provides high accuracy and smooth movement of the working body, have a high energy and mass-dimensions.

**Keywords:** brushless motor, ball-wave gear, rotor position sensor, speed controller, finite elements method, mathematical model, mechanical characteristic, electromechanical characteristic.

**Введение.** Во многих областях промышленности широко применяются электромеханотронные системы (ЭМС), представляющие собой объединение бесконтактной электрической машины и механического преобразователя [1, 2]. Ряд таких применений требует обеспечения больших моментов при низкой частоте вращения, высокой точности и плавности перемещения рабочего органа, надежности в эксплуатации, высоких энергетических и минимальных массо-габаритных показателей.

Обеспечение данных требований возможно на основе комбинации вентильного двигателя с постоянными магнитами (ВДПМ) и шарико-волнового редуктора (ШВР), представляющего собой волновую передачу с промежуточными телами качения. Известно, что такие передачи имеют КПД, достигающий 90%, и отличаются высокой несущей способностью и износостойкостью [3].

В настоящей статье представлены результаты разработки и тестирования одного из вариантов такой ЭМС малой мощности с максимальным моментом 30 Нм при частоте вращения 50 об/мин, работающей в повторно-кратковременном режиме.

**Объект исследования.** Разработанная ЭМС состоит из:

- интегрированного электромеханического преобразователя (ЭМП) (рис. 1), в состав которого входят ВДПМ с датчиком положения ротора (ДПР) и ШВР. Вентильный двигатель, благодаря использованию высококоэрцитивных постоянных магнитов на рото-

ре, обладает хорошими эксплуатационными характеристиками и является одной из наиболее перспективных электрических машин в диапазоне малых и средних мощностей [4]. Такой электродвигатель обладает более высоким отношением номинального момента к массе, чем регулируемые двигатели иных конструкций; - регулятора скорости (РС) вращения выходного вала ВДПМ, который выполнен в виде отдельного блока, на вход которого с ДПР поступает сигнал о положении ротора  $\theta$ .

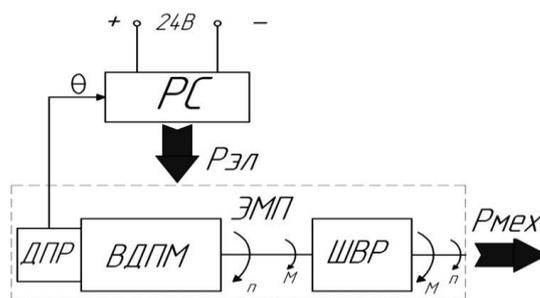


Рис. 1 – Функциональная схема ЭМС

**Цель исследования.** Целью работы является математическое моделирование и экспериментальное исследование разработанной ЭМС.

**Шарико-волновой редуктор.** Принципиальная конструктивная схема ШВР приведена на рис. 2.

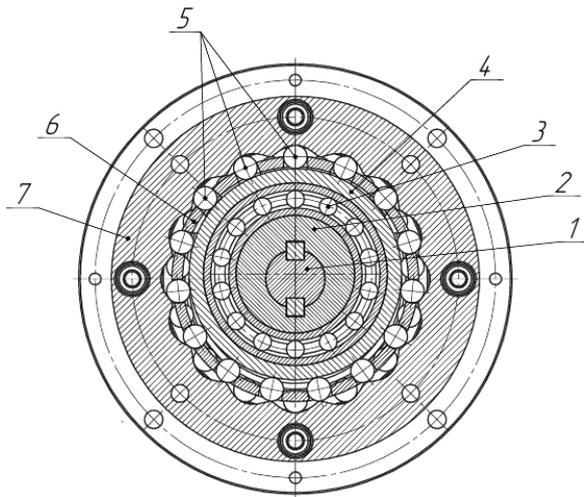


Рис. 2 – Принципиальная конструктивная схема ШВР

Вал 1 приводного ВДПМ, вращаясь, с помощью эксцентричного механизма (волнообразователя), содержащего эксцентрик 2, подшипник 3 и кольцо 4, вызывает радиальное перемещение шариков 5 (тел качения) в пазах сепаратора 6. Создается эффект «волны», бегущей по цепочке сепарированных тел качения, т.е. эта цепочка является аналогом гибкого элемента в классических волновых схемах. Тела качения, контактируя с наклонными рабочими поверхностями кулачковых секторов заторможенного венца 7, вызывают вращение сепаратора 6. Редукция скорости вращения сепаратора при заторможенном венце определяется количеством тел качения.

Также возможна конструкция ШВР, в которой заторможен сепаратор 6, а вращается венец 7. В этом случае при заторможенном сепараторе передаточное отношение равно числу кулачковых секторов венца.

В конструкции ШВР нагрузка передается с помощью шариков с общим углом зацепления от  $\pi/2$  до  $\pi$ . Например, при общем числе тел качения, равном 17, в зацеплении одновременно находится до 8 тел качения, что позволяет передавать большие крутящие моменты при малых массогабаритных показателях.

Для обеспечения требуемого максимального момента нагрузки  $M_{\max} = 30 \text{ Н}\cdot\text{м}$  и приемлемой величины частоты вращения ВДПМ по методике [5] был спроектирован одноступенчатый ШВР с передаточным отношением  $i_g = 17$ , числом выступов венца 18, числом шариков 17, диаметром шариков 5 мм, числом рядов редуктора 2. Расчетный КПД редуктора  $\eta_g = 0,85$ .

**Вентильный двигатель с постоянными магнитами.** Исходя из требуемых выходных характеристик ЭМС при максимальном моменте нагрузки  $M_{\max} = 30 \text{ Н}\cdot\text{м}$  электродвигатель должен обеспечивать

$$M_{\text{ВДПМ}} = \frac{M_{\max}}{i_g \cdot \eta_g} = \frac{30}{17 \cdot 0,85} = 2,1 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

при частоте вращения 850 об/мин. При этом масса ВДПМ должна быть минимально возможной. С этой целью при

проектировании ВДПМ выбрана многополюсная конструкция с числом полюсов 28, отличающаяся малой высотой спинок статора и ротора. Обмотка двигателя выполнена трехфазной с сосредоточенными катушками на каждом из 24 зубцов магнитопровода статора.

В результате проектирования были получены геометрические размеры активной части ВДПМ, приведенные в табл. 1.

Таблица 1 – Геометрические размеры активной части ВДПМ

Наименование	Величина
Внешний диаметр статора, мм	80
Внутренний диаметр статора, мм	56
Число пазов статора	24
Число полюсов ротора	28
Зазор между статором и ротором, мм	0,2
Длина пакета статора, мм	25
Высота магнитов, мм	1,9
Ширина магнитов, мм	4,5

Для выбранной конструкции ВДПМ с геометрическими размерами из табл. 1 выполнены расчеты магнитного поля методом конечных элементов в программе FEMM [6] (рис. 3). По результатам расчетов магнитного поля оценивается степень насыщения участков магнитной цепи ВДПМ, рассчитывается электромагнитный момент, действующий на ротор (статор) ВДПМ, потокосцепление и индуктивность обмотки статора, момент инерции ротора и другие данные, необходимые для определения характеристик ВДПМ.

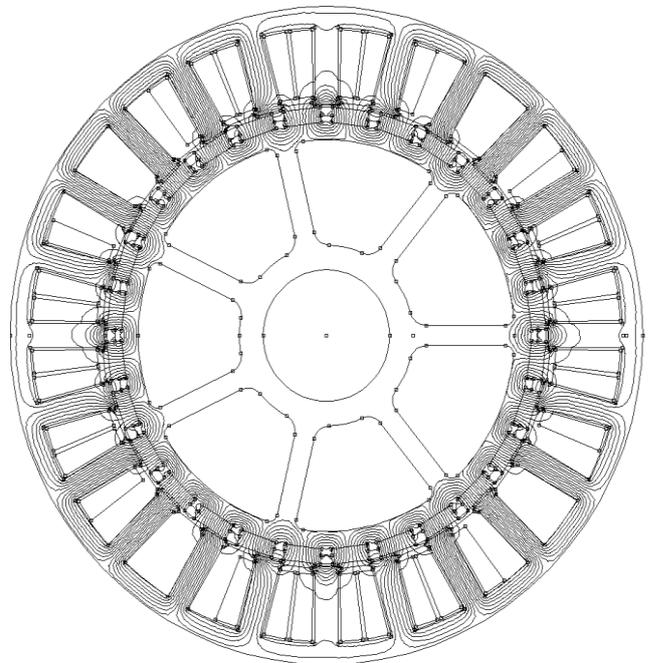


Рис. 3 – Магнитное поле ВДПМ

**Датчик положения ротора.** Для контроля положения ротора в корпусе ВДПМ установлен датчик

AS5074P. Выбор датчика AS5047P обусловлен следующим:

- высокое быстродействие датчика. Максимальная задержка на обновление текущей информации о положении ротора составляет 100 мкс;
- устойчивость к внешним воздействиям: пыли, влаги, вибрациям, а также функционирование в диапазоне рабочих температур от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+125^{\circ}\text{C}$ ;
- разрешающая способность датчика (14 бит), что позволяет с высокой точностью определять положение ротора, вычислять скорость вращения и улавливать углы коммутации фаз ВДПМ.

**Регулятор скорости.** РС представляет собой систему подчиненного регулирования координат, реализованную в программном виде на микроконтроллере TMS320. Логика коммутации транзисторов осуществляет 120-градусную коммутацию фаз ВДПМ с зависимым от скорости опережением включения фаз. Регулирование тока ВДПМ

створяется с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) Mosfet-транзисторами трехфазного инвертора напряжения. На вход РС поступает сигнал задания частоты вращения в виде управляющего тока в диапазоне  $\pm 20$  мА. При этом отрицательные значения управляющего тока соответствуют вращению вала ШВР по часовой стрелке, а положительные – против часовой стрелки.

**Результаты исследований.** Характеристики ЭМС рассчитываются с использованием математической модели ВДПМ среды Matlab-Simulink [7] с учетом особенностей разрабатываемой ЭМС. Структурная схема модели приведена на рис. 4. Модель содержит следующие функциональные блоки: ЭМС, задания частоты вращения, нагрузки. Блок ЭМС содержит модели трехфазного ВДПМ, управляемого Mosfet-инвертора с логикой коммутации силовых транзисторов, ПИ-регулятора тока ВДПМ (рис. 5).

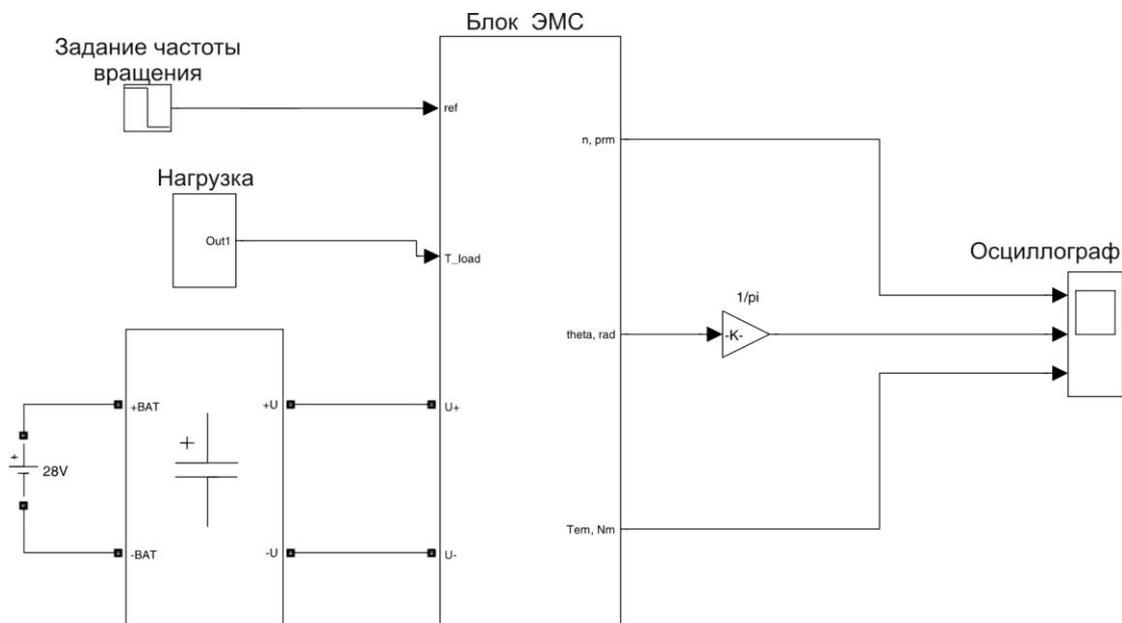


Рис. 4 – Структурная схема модели ЭМС

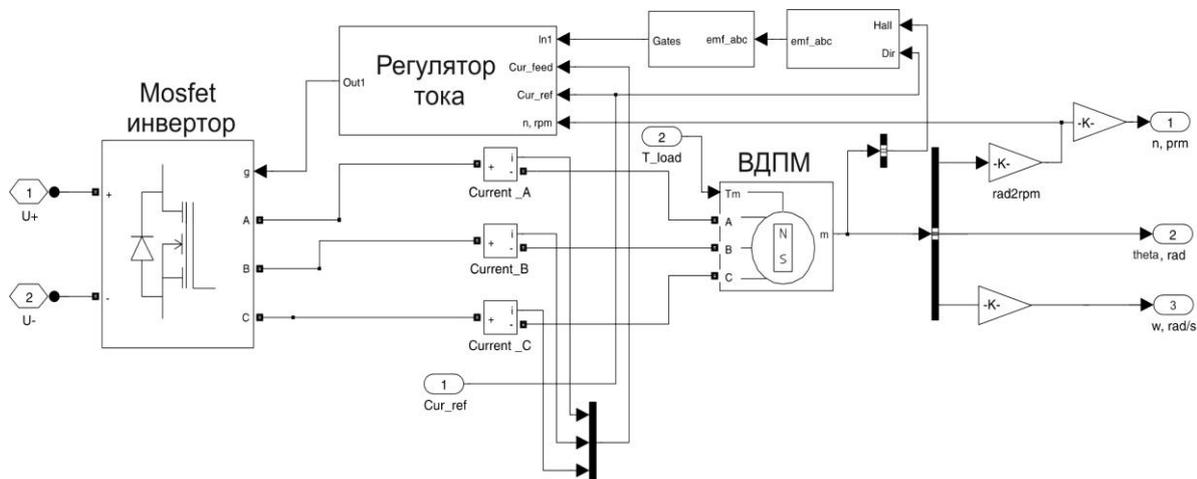


Рис. 5 – Структурная схема блока ЭМС

Модель управляемого Mosfet-инвертора с логикой коммутации позволяет учесть потери в силовых транзисторах и обратных диодах при двигательном и генераторном режимах работы ВДПМ.

В результате расчета магнитного поля и моделирования в среде Matlab-Simulink определены основные параметры и характеристики ВДПМ (табл. 2).

Таблица 2 – Параметры и характеристики ВДПМ

Наименование	Значение
Напряжение питания, В	24
Коэффициент момента, Н·м/А	0,152
Номинальный момент, Н·м	0,7
Номинальная частота вращения, мин <sup>-1</sup>	1390
Номинальная мощность, Вт	100
Сопротивление обмотки, Ом	0,24
Индуктивность обмотки, мГн	0,26
Электромагнитная постоянная времени, мс	1,1
Момент инерции ротора, кг·м <sup>2</sup>	1,02·10 <sup>-4</sup>
Электромеханическая постоянная времени, мс	1,06

На рис. 6 представлен переходный процесс пуска ЭМС без нагрузки. Видно, что за время 6 мс частота вращения вала ШВР достигает значения 53,5 об/мин, что составляет около 63 % от установившейся частоты вращения, что свидетельствует о высоком быстродействии разработанной системы.

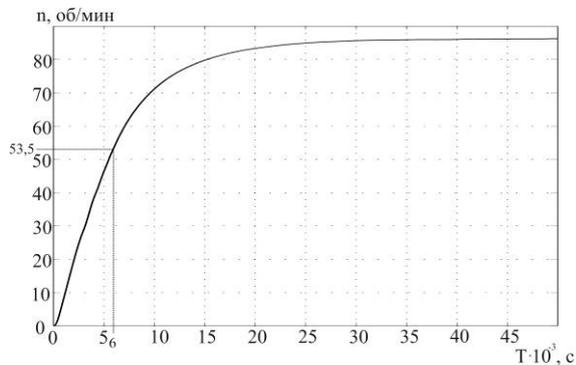


Рис. 6 – Переходный процесс пуска ЭМС до максимальной частоты вращения без нагрузки

Для оценки уровня перерегулирования по скорости ЭМС выполнено моделирование процесса разгона до частоты вращения выходного вала 25 об/мин при нагрузке 20 Н·м (рис. 7). Данная зависимость, как и зависимость на рис. 6, демонстрирует отсутствие перерегулирования при выходе на заданную частоту вращения, что является важным показателем для следящих электроприводов, требующих плавности движения исполнительного механизма.

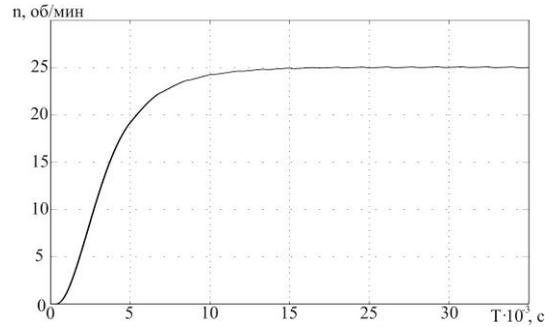


Рис. 7 – Переходный процесс разгона ЭМС при нагрузке

С целью проверки полученных при проектировании и моделировании результатов, а также для оценки работоспособности ШВР, требующего высокой точности изготовления волнообразователя и венца, был изготовлен макетный образец разработанной ЭМС, конструктивная схема ЭМП которого приведена на рис. 8, а общий вид образца ЭМС – на рис 9.

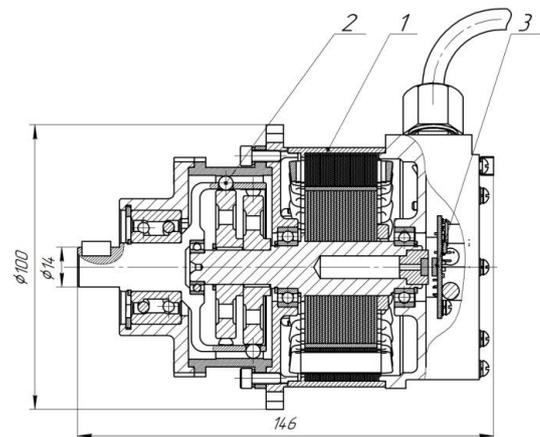


Рис. 8 – Конструктивная схема ЭМП: 1 - ВДПМ; 2 - ШВР; 3 - ДПР



Рис. 9 – Макетный образец ЭМС

Испытания макетного образца ЭМС были проведены в сертифицированном научно-техническом

центре «Станкосерт» (г. Одесса) на устройстве создания и измерения момента Magtrol.

Также на экспериментальном стенде были сняты электромеханические характеристики ЭМС и отдельно ВДПМ.

В результате испытаний была получена механическая характеристика ВДПМ (рис. 10) и ЭМС (рис. 11).

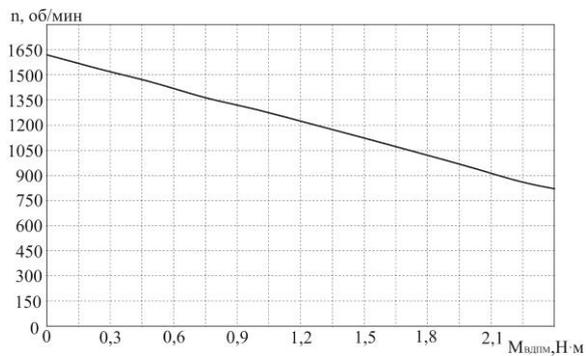


Рис. 10 – Механическая характеристика ВДПМ

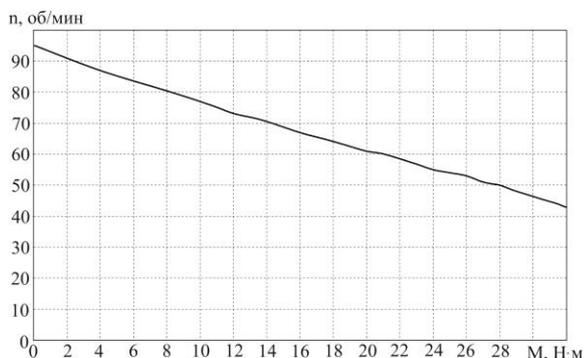


Рис. 11 – Механическая характеристика ЭМС

Из рис. 11 следует, что при требуемом моменте 30 Н·м частота вращения выходного вала ЭМС составляет 47,5 об/мин. Это на 5 % меньше расчетной частоты вращения, равной 50 об/мин.

На рис. 12 представлены электромеханические характеристики ЭМС и ВДПМ при условии приведения момента ВДПМ к выходному валу, считая, что КПД редуктора равен 1.

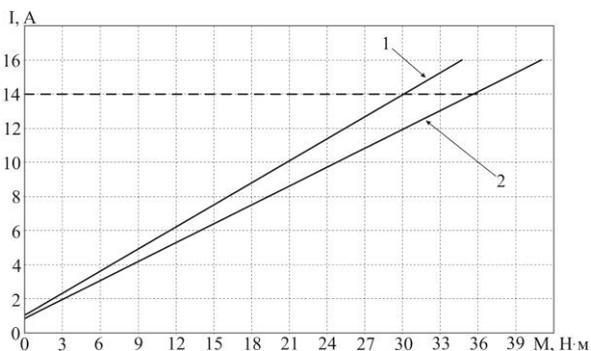


Рис. 12 – Электромеханические характеристики:  
1 – ЭМС, 2 – ВДПМ

Данное приведение момента, полученное в результате умножения момента ВДПМ на передаточное отношение ШВР, позволяет определить КПД ШВР в зависимости от нагрузки на валу ЭМС. Так, например, при токе ЭМС 14 А момент на валу ЭМС равен 30 Н·м, а приведенный момент ВДПМ – 36 Н·м. Тогда КПД ШВР при моменте нагрузки, равном 30 Н·м, определяется отношением момента нагрузки к приведенному моменту ВДПМ, а именно:  $30 / 36 = 0,833$ . Полученная таким образом зависимость КПД ШВР от момента нагрузки представлена на рис. 13.

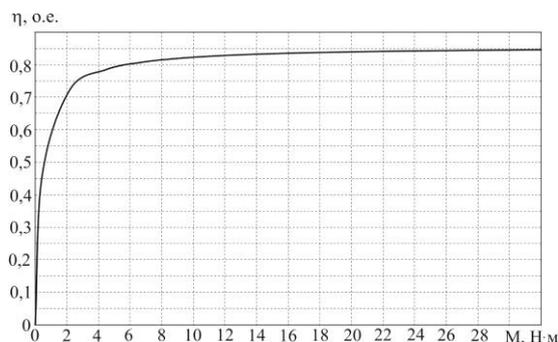


Рис. 13 – Зависимость КПД ШВР от момента нагрузки

Вид данной зависимости характерен для устройств преобразования энергии, к примеру, для трансформатора электрической энергии. В диапазоне нагрузок от 6 Н·м до 30 Н·м КПД ШВР находится в пределах 0,8–0,85, что несколько меньше КПД ШВР, известных из литературных источников. В дальнейшем, при изготовлении опытного образца ШВР, для достижения большего значения КПД, необходимо совершенствовать технологию изготовления деталей редуктора.

#### Выводы.

1. Разработана электромеханическая система, состоящая из вентильного электродвигателя с постоянными магнитами, шарико-волнового редуктора и системы регулирования скорости, обеспечивающая максимальный момент 30 Н·м при частоте вращения выходного вала 47,5 об/мин.
2. В среде Matlab-Simulink, с учетом особенностей разработанной ЭМС, создана математическая модель, использующая результаты расчета магнитного поля вентильного электродвигателя, выполненные методом конечных элементов. Модель позволила рассчитать параметры и характеристики как ВДПМ, так и ЭМС в целом.
3. Спроектирован и изготовлен макетный образец малогабаритного ШВР с передаточным отношением 17.
4. Изготовлен макетный образец разработанной ЭМС с габаритами ЭМП 146мм×100мм и массой 2,7 кг. Результаты испытаний макетного образца ЭМС показали его работоспособность и позволили определить КПД ШВР от момента нагрузки.

## Список литературы

1. Ткачук В. І. Електромеханотроніка / В. І. Ткачук. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2006. – 440 с.
2. Карнаухов Н. Ф. Электромеханические и мехатронные системы / Н. Ф. Карнаухов. – Ростов н/Д: Феникс, 2006. – 320 с.
3. Хохряков Б. Г. Электроприводы нового поколения для запорно-регулирующей арматуры / Б. Г. Хохряков // Арматуростроение. – 2004. - № 4 (30). – С.32-33.
4. Овчинников И. Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность) / И. Е. Овчинников: Курс лекций. – СПб.: КОРОНА-Век, 2007. – 336 с.
5. Маргулис Б. Г. Методика определения основных параметров силовой волновой передачи с промежуточными телами качения / Б. Г. Маргулис, А. С. Шайда // Машинобудування. Вісник приазовського державного технічного університету. – 2008. Вип. 18. – С. 125-128.
6. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. FEMM 4.2 32 bit 11 Oct 2010 Self-Installing Executable. – Режим доступа: <http://www.femm.info/wiki/OldVersions>. Дата обращения 10 марта 2014 г.
7. Черных И. В. Моделирование электромеханических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – М.: ДМК Пресс: СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

## References (transliterated)

1. Tkachuk V. I. Electromechanotronics [Electromechanotronic]. Lviv: Publishing house of the National University of "Lviv Polytechnic", 2006. – 440 p.
2. Karnaukhov N. F. Electromechanical and mechatronic systems [Electromechanical and mechatronic systems]. Rostov-on-Don: Feniks, 2006. – 320 p.
3. Hohryakov B. G. Elektroprivody novogo pokoleniya dlya zaporno-reguliruyemykh armaturi [New-generation electric drives for shut-off and control valves]. Armature construction. – 2004. - № 4 (30). – pp. 32-33.
4. Ovchinnikov I. E. Ventylnye elektricheskie dvigateli i privod na ix osnove (malaya i srednaya mochnost) [Brushless electric motors and drive based on them (small and medium power)]. Lecture course. - St. Petersburg: CROWN-Vek, 2007. - 336 p.
5. Margulis B. G. Metodika opredeleniya osnovnix parametrov silovoy volnovoy peredachi s promegutochnimi telami kacheniya [The procedure for determining the main parameters of a power wave transmission with intermediate rolling elements]. Mechanical engineering. Bulletin of the Azov State University. -2008. Issue 18. – pp. 125-128.
6. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. FEMM 4.2 32 bit 11 Oct 2010 Self-Installing Executable. Web. 10 March 2014 – Режим доступа: <http://www.femm.info/wiki/OldVersions>.
7. Chernyh I. V. Modelirovanie electromexanicheskix ustroystv v Matlab, SimPowerSystems i Simulink [Simulation of electromechanical devices in Matlab, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow, DMK Press Publ., St. Petersburg. Piter Publ., 2008, 288 p.

Поступила (received) 19.01.2018

## Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Розробка і дослідження електромеханотронної системи малої потужності / В.В. Римша, І.М. Радимов, М.В. Гулий, І.П. Бабіч, О.А. Калініченко, С.А. Фокін // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 26–32. – Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2409-9295.**

**Разработка и исследование электромеханотронной системы малой мощности / В.В. Рымша, И.Н. Радимов, М.В. Гулий, И.П. Бабич, А.А. Калиниченко, С.А. Фокин // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 26–32. – Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2409-9295.**

**Development and investigation of the electromechanotronic system of low power / V.V. Rymsha, I.N. Radimov, M.V. Gulyy, I.P. Babich, A.A. Kalinichenko, S.A. Fokin // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2018. – No. 5 (1281). – P. 26–32. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2409-9295.**

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Римша Віталій Вікторович**, доктор технічних наук, професор, ТОВ «Електротехніка – Нові технології», заступник директора, тел. +38(048)738-58-55; e-mail: [office@ukrainemotors.com.ua](mailto:office@ukrainemotors.com.ua).

**Рымша Виталий Викторович**, доктор технических наук, профессор, ООО «Электротехника – Новые технологии», заместитель директора, тел. +38(048)738-58-55; e-mail: [office@ukrainemotors.com.ua](mailto:office@ukrainemotors.com.ua).

**Rymsha Vitaly Viktorovich**, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, «Electrotechnika - New technology» LTD, Deputy Director, tel. +38(048)738-58-55; e-mail: [office@ukrainemotors.com.ua](mailto:office@ukrainemotors.com.ua).

**Радимов Ігор Миколайович**, кандидат технічних наук, доцент, ТОВ «Електротехніка – Нові технології», засновник, тел. +38(048)738-58-55; e-mail: [igor.radimov@gmail.com](mailto:igor.radimov@gmail.com).

**Радимов Игорь Николаевич**, кандидат технических наук, доцент, ООО «Электротехника – Новые технологии», учредитель, тел. +38(048)738-58-55; e-mail: [igor.radimov@gmail.com](mailto:igor.radimov@gmail.com).

**Radimov Igor Nikolaevich**, Candidate of Technical Sciences, associate professor, «Electrotechnika - New technology» LTD, founder, tel. +38(048)738-58-55; e-mail: [igor.radimov@gmail.com](mailto:igor.radimov@gmail.com).

**Гулий Михайло Вікторович**, кандидат технічних наук, ТОВ «Електротехніка – Нові технології», головний електронік, тел. (048)738-58-55, e-mail: ukrainemotors@ukr.net.

**Гульїй Михаїл Вікторович**, кандидат технічних наук, ООО «Электротехника - Новые технологии», главный электроник, тел. (048)738-58-55, e-mail: ukrainemotors@ukr.net.

**Gulyu Michail Victorovich**, Candidate of Technical Sciences, “Electrotechnika - New technology” LTD, Chief electronics, tel. +38 (048) 738-58-55, e-mail: ukrainemotors@ukr.net.

**Бабіч Ігор Петрович**, ДП «КБ «Південне», Головний конструктор та начальник конструкторського бюро приводів та спеціальних систем, тел. (056)770-85-96, e-mail: info@yuzhnoye.com.

**Бабич Игорь Петрович**, ГП «КБ «Южное», Главный конструктор и начальник конструкторского бюро приводов и специальных систем, тел. (056)770-85-96, e-mail: info@yuzhnoye.com.

**Babych Igor Petrovich**, State Design Office “Yuzhnoye”, Chief Designer-Head of actuators, instruments and mechanisms, tel. +38 (056) 770-85-96, e-mail: info@yuzhnoye.com.

**Калініченко Олександр Андрійович**, ДП «КБ «Південне», начальник відділу гідравлічних та електромеханічних приводів, тел. (0562)38-47-86, e-mail: info@yuzhnoye.com.

**Калиниченко Александр Андреевич**, ГП «КБ «Южное», начальник отдела гидравлических и электромеханических приводов, тел. (0562)38-47-86, e-mail: info@yuzhnoye.com.

**Kalinichenko Aleksandr Andreevich**, State Design Office “Yuzhnoye”, Head of department of the hydraulic and electromechanical drives, tel. +38 (0562)38-47-86, e-mail: info@yuzhnoye.com.

**Фокін Сергій Анатолійович**, ДП «КБ «Південне», начальник сектору, тел. (0562)38-47-86, e-mail: info@yuzhnoye.com.

**Фокин Сергей Анатольевич**, ГП «КБ «Южное», начальник сектора, тел. (0562)38-47-86, e-mail: info@yuzhnoye.com.

**Fokin Sergey Anatolyevich**, State Design Office “Yuzhnoye”, Head of sector, tel. +38 (0562)38-47-86, e-mail: info@yuzhnoye.com.