

В.І. КОРТУНОВ, А.М. МАСЛЕННИКОВ, А.В. ЄГОРОВ, О.О. ДУНЄВ

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРНОГО РЕЖИМУ РОБОТИ БЕЗЩІТКОВОГО ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПРИ ПІДВИЩЕНІЙ ЧАСТОТІ ОБЕРТАННЯ

У статті розглядається конструкція безщіткового двигуна постійного струму, що серійно випускається, з прямим приводом в генераторному режимі роботи при частоті обертання вище номінальної. У проведених експериментах підвищення частоти обертання виконувалося за допомогою трифазного асинхронного двигуна номінальною потужністю 5,5 кВт та частотою обертання 2920 об/хв, яка надалі збільшувалася за рахунок пасового двоступінчастого редуктора зі зміною коефіцієнта редукції від 0,16-1,6. Однак, зі зростанням частоти обертання зростають і магнітні втрати, які в свою чергу, збільшують необхідне значення механічної потужності, що підводиться, і призводять до теплового навантаження безщіткової машини постійного струму. Збільшення частоти обертання генератора призводить до зростання ЕРС і при тому ж значенні струму статора призводить до зростання потужності, що віддається до навантаження. В ході експерименту напруга випрямлялась за допомогою трифазного діодного мосту і згладжувалась конденсатором, після чого підключався реостат навантаження. Подані розрахунки магнітних втрат потужності для різних марок електротехнічної сталі наочно показують нелінійну залежність між частотою магнітного поля та їх величиною. Експериментальні дослідження проводились при різних частотах обертання безщіткової машини постійного струму в широкому діапазоні від 140 об/хв до 5228 об/хв, при цьому були отримані значення вихідної потужності в залежності від частоти обертання. Встановлено, що під час роботи машини у генераторному режимі необхідно враховувати особливості експлуатації генераторів у вітроелектроустановках, автономних джерелах живлення чи гібридних силових установках. В одному випадку, варто обмежувати частоту обертання від приводного механізму, а в іншому, режим роботи при підвищеній частоті обертання може бути необхідний для часткового форсування і віддачі більшої потужності при короткочасному використанні.

Ключові слова: безщітковий двигун постійного струму, постійні магніти, підвищена частота обертання, генераторний режим.

В.И. КОРТУНОВ, А.М. МАСЛЕННИКОВ, А.В. ЕГОРОВ, А.А. ДУНЕВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ БЕСЩЕТОЧНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЕ ВРАЩЕНИЯ

В статье рассматривается серийно выпускаемая конструкция бесщеточного двигателя постоянного тока с прямым приводом в генераторном режиме работы при частоте вращения выше номинальной. В проведенных экспериментах повышение частоты вращения производилось с помощью трехфазного асинхронного двигателя номинальной мощностью 5,5 кВт и частотой вращения 2920 об/мин, которая в дальнейшем увеличивалась за счет ременного двухступенчатого редуктора с изменением коэффициента редукции от 0,16-1,6. Однако, с ростом частоты вращения возрастают и магнитные потери, которые в свою очередь, увеличивают необходимое значение подводимой механической мощности и приводят к тепловой перегрузке бесщеточной машины постоянного тока. Увеличение частоты вращения генератора приводит к росту ЭДС и при том же значении тока статора приводит к росту мощности, отдаваемой в нагрузку. В ходе эксперимента напряжение выпрямлялось с помощью трехфазного диодного моста и сглаживалось конденсатором, после чего подключался нагрузочный реостат. Представленные расчеты магнитных потерь мощности для разных марок электротехнической стали наглядно показывают нелинейную зависимость между частотой магнитного поля и их величиной. Экспериментальные исследования проводились при разных частотах вращения бесщеточной машины постоянного тока в достаточно широком диапазоне от 140 об/мин до 5228 об/мин, при этом были получены значения выходной мощности в зависимости от частоты вращения. Установлено, что при работе машины в генераторном режиме необходимо учитывать особенность эксплуатации генераторов в ветроэлектроустановках, автономных источниках питания или гибридных силовых установках. В одном случае, стоит ограничивать частоту вращения от приводного механизма, а в другом, режим работы при повышенной частоте вращения может быть необходим для частичного форсирования и отдачи большей мощности при кратковременном использовании.

Ключевые слова: бесщеточный двигатель постоянного тока, постоянные магниты, повышенная частота вращения, генераторный режим.

V.I. KORTUNOV, A.M. MASLIENNIKOV, A.V. YEHOROV, O.O. DUNIEV

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE GENERATOR MODE FOR A BRUSHLESS DC MOTOR AT AN INCREASED ROTATIONAL SPEED

This article deals with a commercially available direct drive brushless DC motor that was investigated in the generator mode at an increased speed above the rated one. During the conducted experiments the increase of the generator rotational speed was carried out due to a three-phase asynchronous motor with 5.5 kW rated power and 2920 rpm rated speed, which was further increased by a two-stage belt gearbox with a reduction ratio from 0.16 to 1.6. However, with an increase in the rotational speed, the magnetic losses also increase, which in turn increase the required value of the input mechanical power and lead to thermal overload of the brushless DC machine. An increase the generator rotational speed leads to an increase of the EMF value and, at the same value, of the stator current, leads to an increase the generated power. Throughout the experiment, the voltage was rectified using a diode bridge and bulk capacitor, after that it was connected to a load resistance. The presented calculations of the magnetic power losses for different electrical steel grades clearly demonstrate the nonlinear dependence between the magnetic field frequency and its magnitude. Experimental studies were carried out at different speeds of rotation of a brushless DC machine in a very wide range from 140 rpm to 5228 rpm, moreover, the values of the output power were obtained depending on the rotational speed. It is concluded, that in the generator mode of the brushless DC machine, it is necessary to take into account the feature of the operation at wind power plants, autonomous power supply such as hybrid power plants. In the first case, it is worth limiting the rotational speed from the driven mechanism, and in the second case, this mode of operation may be necessary for partial boosting of output power for short-term use.

Key words: brushless DC motor, permanent magnets, overspeed, generator mode

Актуальність. Безщіткові електричні машини постійного струму мають досить просту конструкцію та велику надійність, що обумовлює їх широке використання у електротранспорті, а саме: електромобілях,

© В.І. Кортунов, А.М. Масленніков, А.В. Єгоров, О.О. Дунєв, 2021

електромотоциклах, електроскутерах, електровелосипедах, електросамокатах тощо.

На всі ці транспортні засоби встановлюють безщіткові двигуни постійного струму (БДПС) з різною потужністю та контролер керування. Завдяки контролеру керування та режиму рекуперації енергії електричний транспортний засіб має змогу направити електричну потужність до акумуляторної батареї. Принцип зворотності електричних машин дозволяє використовувати їх як у режимі двигуна, так і у режимі генератора, інформація про який – обмежена.

Постановка задачі. Для транспортних засобів відомі максимальні швидкості та відповідні частоти обертання двигуна, потужність в режимі рекуперації та інші данні, але саме завдяки наявності цього типу електродвигуна у вільному обігу його починають використовувати все більше у генераторному режимі для автономних систем живлення, вітроелектроустановок (ВЕУ) з роботою на автономне навантаження при різних частотах обертання, що перевищують номінальні значення. Проведення експериментального дослідження БДПС у генераторному режимі при різних частотах обертання дозволить визначити прийнятний діапазон частот обертання з відповідними зовнішніми характеристиками, а також вплив частоти обертання на вихідну потужність й магнітних втрат потужності.

Аналіз. Відомо, що електричні машини з постійними магнітами мають більший ККД, ніж електричні машини з класичним електромагнітним збудженням. Це пояснюється відсутністю втрат потужності в обмотці збудження, але при цьому ускладнюється можливість регулювання і стабілізації величини вихідної напруги. Не дивлячись на ці недоліки їх активно застосовують для бортових систем електрозабезпечення, виконують та досліджують режими роботи цих генераторів у складі ВЕУ [1]. Конструкція БДПС, що досліджується, приведена на рис. 1.



Рис. 1. БДПС у розібраному стані

Номінальна потужність БДПС, що досліджується, становить 500 Вт, номінальний струм 10 А, номінальна напруга 48-54 В. На його роторі розташовано 46 постійних магнітів з поперечною полярністю і намагніченістю в радіальному напрямку з розмірами по висоті – 3 мм, по ширині – 14 мм, по осевій довжині – 25 мм (рис. 2). Статор виконаний з електротехнічної сталі товщиною 0,5 мм з зосередженими обмотками, кількість яких становить 51 шт., схема з'єднання обмотки статора – "зірка".

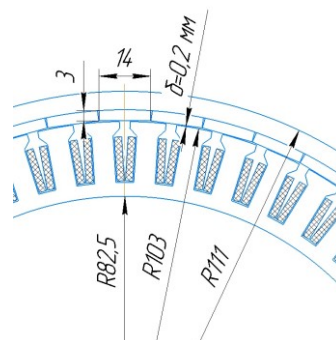


Рис. 2. Розміри магнітної системи БДПС

Завдяки зміні полярності постійних магнітів і розподілу котушкових груп фази в просторі, отримують синусоїдальну форму ЕРС. При цьому її частота прямо пропорційна частоті обертання (табл.1) і визначається за відомою формулою:

$$f_1 = \frac{n \cdot p}{60},$$

де n – частота обертання ротора, об/хв;

f_1 – частота напруги, Гц;

p – число пар полюсів.

Таблиця 1 – Залежність між частотою напруги і частотою обертання ротора у БДПС

f_1 , Гц	192	383	575	767	958	1917
n , об/хв	500	1000	1500	2000	2500	5000

При збільшенні частоти обертання також буде зростати і ЕРС генератора, індуктивний опір обмотки статора та величина магнітних втрат. Магнітні втрати потужності будуть призводити до перевантаження привідного механізму та суттєво підвищуватимуть температуру генератора. Магнітні втрати потужності можна розрахувати знаючи марку сталі та деякі її паспортні данні.

Електротехнічну сталь поділяють за вмістом кремнію: низьколеговану (0,5-1,8% Si), середньолеговану (1,8-2,8% Si), леговану (2,8-3,8% Si) і високолеговану (3,8-4,8% Si). Кремній підвищує електричний опір сталі, зменшує питомі втрати енергії (на гістерезис і вихрові струми), знижує індукцію насичення і пластичність. Магнітні властивості електротехнічної сталі покращують створенням кубічної текстури і рафінуванням від супутніх домішок. Низько- і середньолегована сталь товщиною 0,5-1,0 мм застосовують для виготовлення роторів і статорів електричних машин. До легованих і високолегованих належить трансформаторна сталь. Розрізняють гарячекатану (переважно листову) і холоднокатану сталь (довгі стрічки, переважно змотані в рулони) [2].

Виходячи з того, що досліджується конструкція БДПС, що виготовляється серійно, тому невідомо яка марка сталі була використана для виготовлення осердя статора. Для отримання кількісних показників проведемо розрахунок магнітних втрат для найбільш ймовірних марок сталей: 2411, 2013, 2312 товщиною 0,5 мм і для порівняння – 3425 товщиною 0,05 мм.

Магнітні втрати в окремих елементах (P_{magn}) осер-

дя статора (зубця і спинці) визначаються на основі загального виразу, Вт [3]:

$$P_{mage} = K_{mag} p_{1/50} \left(\frac{f_s}{50} \right)^{\beta_f} B_e^2 m_{Fee},$$

де K_{mag} – поправочний коефіцієнт, що враховує збільшення магнітних втрат через різні технологічні пошкодження сталевих листів в процесі виготовлення осердя, для машин змінного струму приймається $K_{mag} = 1,7$;

$p_{1/50}$ – питомі магнітні втрати, які визначені експериментально при частоті 50 Гц і магнітній індукції 1 Тл;

β_f – емпіричний показник ступеню;

B_e , m_{Fee} – магнітна індукція і маса сталі конкретного елемента осердя.

Для сталі 2411 $p_{1/50} = 1,6$ Вт/кг і $\beta_f = 1,3$;

для сталі 2013 $p_{1/50} = 2,6$ Вт/кг і $\beta_f = 1,5$;

для сталі 2312 $p_{1/50} = 1,75$ Вт/кг і $\beta_f = 1,4$.

Данні для сталі 3425 (ГОСТ 21427.4-78) товщиною 0,05 мм взяті по результатам роботи [4]:

$p_{1/50} = 2,5$ Вт/кг;

$p_{1/200} = 8$ Вт/кг;

$p_{1/400} = 18$ Вт/кг і $\beta_f = 1,4$.

Маса зубців та спинки була визначена за відомими розмірами БДПС і становить 1,04 кг та 0,373 кг, відповідно. Результати розрахунку зведено до табл. 2.

Таблиця 2 – Залежність магнітних втрат від частоти для різних марок сталі

f_1 , Гц	192	383	575	767	958	1917	
Магнітні втрати потужності для сталі марки 2411, Вт							
K_{mag}	1,7	71	174	295	429	573	1413
	2	83	205	347	505	675	1663
	3	125	307	521	758	1012	2494
Магнітні втрати потужності для сталі марки 2013, Вт							
K_{mag}	1,7	161	454	836	1288	1798	5090
	2	189	534	983	1515	2115	5989
	3	284	802	1475	2273	3173	8983
Магнітні втрати потужності для сталі марки 2312, Вт							
K_{mag}	1,7	79	208	368	551	752	1986
	2	93	245	433	648	885	2336
	3	140	367	649	972	1327	3505
Магнітні втрати потужності для сталі марки 3425, Вт							
K_{mag}	1,7	59	133	221	331	451	1192
	2	69	156	260	389	531	1402
	3	104	234	390	586	797	2104

Розрахунок магнітних втрат потужностей для кожної марки сталі проводився після чисельного розрахунку магнітного поля, з аналізу якого визначені середні значення магнітної індукції у зубці та спинці осердя статора. Таким чином було враховано різну ступінь насичення магнітної системи БДПС.

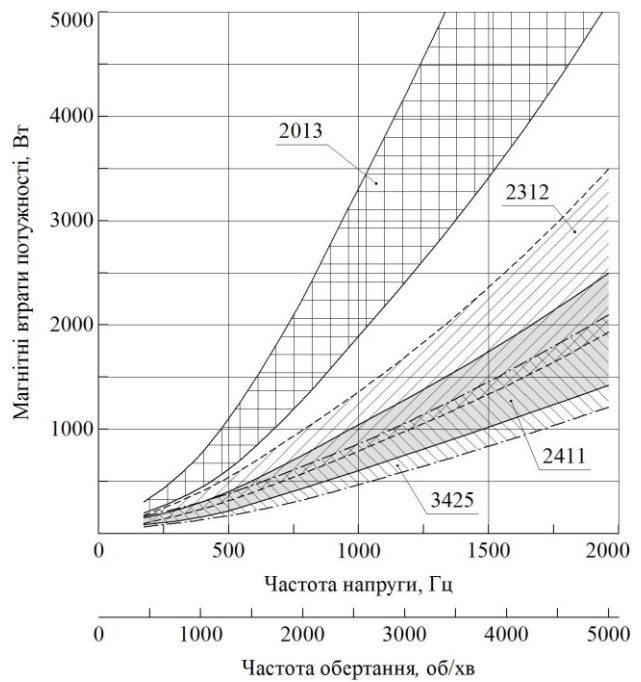


Рис. 3. Магнітні втрати потужності в осерді статора БДПС для різних марок сталі

За результатами розрахунку видно, що при виготовленні осердя статора БДПС з електротехнічної сталі марки 2411 найбільші значення магнітних втрат будуть знаходитися в діапазоні 1,4-2,5 кВт, для 2013 – 5,1-8,9 кВт, для 2312 – 1,9-3,5 кВт, для 3425 – 1,2-2,1 кВт. Тобто при виборі приводного двигуна треба мати це на увазі та обирати його з запасом потужності, яка буде витрачена на цей вид втрат окрім власних.

Випробувальний стенд наведено на рис. 4 і до його складу входять: 1) вимірювальний комплект К540; 2) асинхронний двигун потужністю 5,5 кВт з номінальною частотою обертання 2920 об/хв; 3) зразок БДПС, що досліджується; 4) пасовий двоступеневий редуктор з регулюванням коефіцієнту редукції від 0,16-1,6; 5) випрямляч з діодами ДЧ1115-80 $U = 900$ В; $I = 80$ А, 6) реостати з опором від 0,6 Ом до 180 Ом; 7) осцилограф RIGOL SDS 1022DL.

Схема випробувальної установки наведена на рис. 5.

Експериментальні дослідження проводились при різних частотах обертання БДПС у досить широкому діапазоні: від 140 об/хв до 5228 об/хв. При цьому були отримані значення напруги в обмотці статора від 13,7 В до 630 В, а її частота збільшувалася з 50 Гц до 1,98 кГц. Максимальне значення струму обмежувалося його номінальним значенням 10 А, що дозволило зберегти електричні втрати потужності на одному рівні під час проведення всіх експериментів.

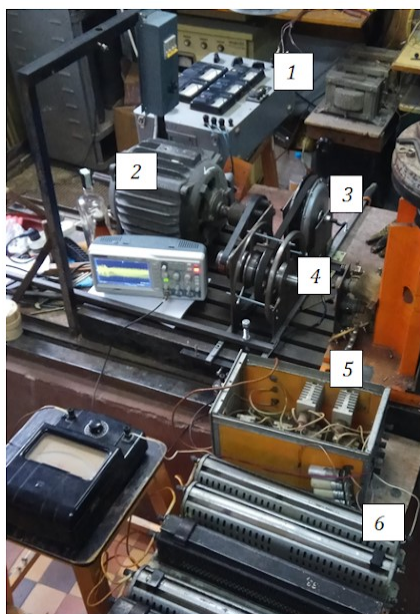


Рис. 4. Випробувальний стенд

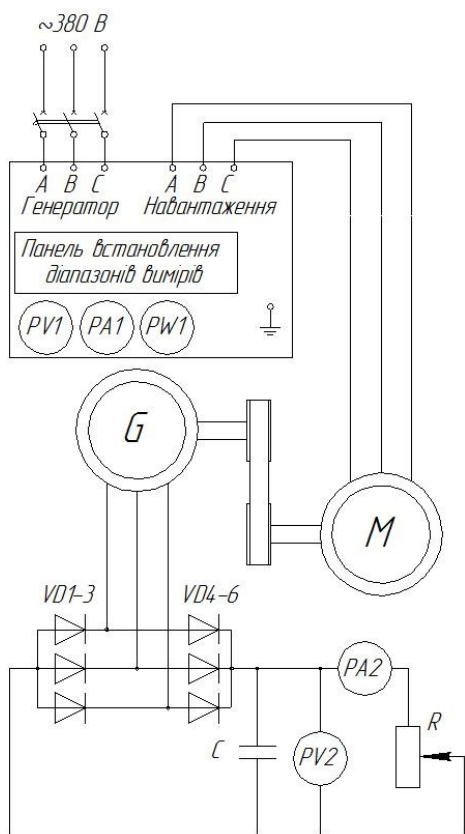


Рис. 5. Схема випробувальної установки

Форма кривої напруги БДПС знятої за допомогою осцилографа RIGOL SDS 1022DL для частоти обертання 5000 об/хв показана на рис. 6.

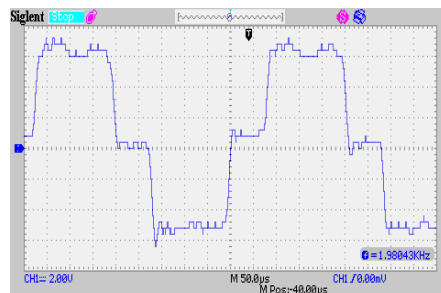
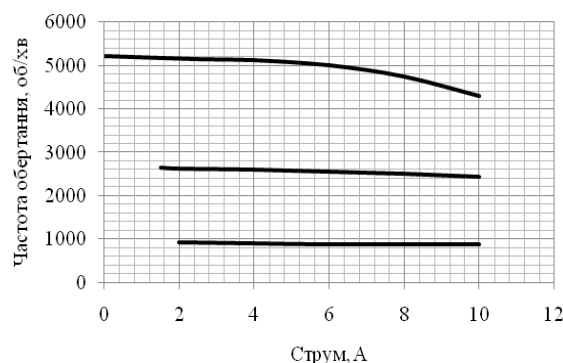
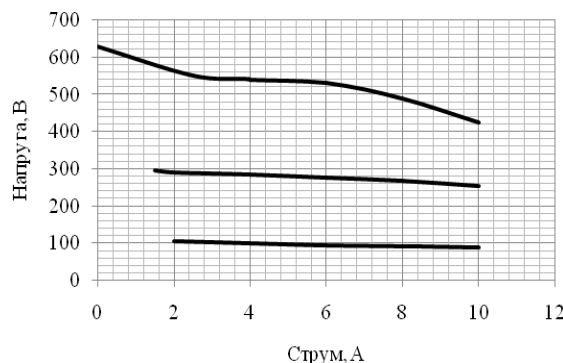


Рис. 6. Осцилограма фазної напруги БДПС у генераторному режимі

Дослідження показали, що при збільшенні частоти обертання збільшується потужність, що віддає БДПС до навантаження з 13,7 Вт до 4,25 кВт, але при цьому різко зростають магнітні втрати потужності, що залежать від магнітної індукції та її частоти в ступені, що призводить до перегріву БДПС та підвищеного споживання енергії приводного асинхронного двигуна. При роботі БДПС на частоті обертання 5000 об/хв корисна потужність, що віддається до навантаження, складала 4,2 кВт, магнітні та механічні втрати потужності – 4,6 кВт. Експериментальні характеристики БДПС у генераторному режимі наведено на рис. 7, а у таблиці 3 – максимальні значення потужності для відповідних частот обертання при номінальному струмі.



а



б

Рис. 7. Характеристики БДПС у генераторному режимі: а – електромеханічні; б – зовнішні.

Таблиця 3 – Залежність потужності від частоти обертання

n , об/хв	882	2432	4300
P_{load} , Вт	880	2530	4250

Висновки. Отримані результати експериментів показують, що потенційно в конструкції БДПС можна отримати корисну потужність 4,2 кВт при вазі 6 кг. Їхнє співвідношення дає питому потужність на рівні 0,7 кВт/кг при цьому генератори класичної конструкції з електромагнітним збудженням мають цей показник на рівні 0,25-0,3 кВт/кг. Однак при цій потужності частота напруги складає 1,9 кГц, що призводить до високого зростання магнітних втрат та до перегріву БДПС, а також змушує споживати більше потужності приводним двигуном (близько 8,8 кВт), що призводить до невисокого ККД всієї установки на рівні 50%. З метою зменшення магнітних втрат і підвищення ККД генератора в цілому, необхідно використовувати сталі з меншою товщиною листа і вмістом кобальту, наприклад, енергоефективні, окисовані Fe-Co сталі, товщиною листа 0,2 мм. Вони мають менші магнітні втрати та масогабаритні показники, найбільші індукцію насичення та магнітну проникність [5].

Список літератури

- 1 Andreea Laczko, Stephane Brisset, Mircea Radulescu. Design of a brushless DC permanent-magnet generator for use in micro-wind turbine applications. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, IOS Press, 2018, 56, pp. 3-15.

- 2 АЗОВПРОМСТАЛЬ. Электротехническая сталь: веб-сайт. URL: <https://www.azovpromstal.com/article/one/id/4600> (дата звернення: 08.11.2021 р.).
- 3 Мілих В. І. *Проектування трифазних асинхронних двигунів з короткозамкнутою обмоткою ротора*: навч. посіб. Харків: 2009. 42 с.
- 4 Насыпаная Е. П. *Моделирование и проектный синтез энергоэффективных трансформаторов с целендрическими слоевыми обмотками*: дис. канд. тех. наук: 05.09.01. Одесса, 2015.
- 5 Шевченко В.В., Шайда В.П., Зубань Е.С. Особенности выбора материалов магнитных систем электродвигателей для авиации. *Научно-технический журнал «Наука и техника Повітряних Сил Збройних Сил України»*, 2017, № 2 (27), С. 59-64.

References (transliterated)

- 1 Andreea Laczko, Stephane Brisset, Mircea Radulescu. Design of a brushless DC permanent-magnet generator for use in micro-wind turbine applications. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2018, 56, pp. 3-15.
- 2 AZOVPROMSTAL. Elektrotehnicheskaia stal: veb-sait. URL: <https://www.azovpromstal.com/article/one/id/4600>
- 3 Milykh V. I. *Proektuvannia tryfaznykh asynkhronnykh dvyhuniv z korotkozamknoiu obmotkoiu rotora* [Design of three-phase asynchronous motors with short-circuited rotor winding]. Kharkiv. 2009. 42 p.
- 4 Nasipanaia E. P. *Modelirovaniye y proektniiy sintez enerhoefektivnykh transformatorov s tselendricheskymy sloevyymi obmotkami*: dis. kand. tekhn. nauk.: 05.09.01 [Modeling and design synthesis of energy efficient transformers with celendric layer windings. Candidate eng. sci. diss. (Ph.D.)]. Odessa, 2015.
- 5 Shevchenko V.V., Shayda V.P., Zuban E.S. Osobennosti vyibora materialov magnitnykh sistem elektrodvigateley dlya aviatsii. *Naukovo-tehnichnyi zhurnal «Nauka i tehnika Povitryanykh Sil Zbroynykh Sil Ukraini»*, 2017, no 2 (27), pp. 59-64.

Поступила (received) 08.11.21

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кортунов Вячеслав Іванович (Кортунов Вячеслав Иванович, Kortunov Vyacheslav Ivanovich) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", професор кафедри комп'ютерного моделювання процесів і систем; м. Харків; тел.: (050) 935-23-95.

Масленников Андрій Михайлович (Масленников Андрей Михайлович, Masliennikov Andrii Mykhailovych) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", доцент кафедри електричних машин; м. Харків; тел.: (066) 780-97-83.

Єгоров Андрій Володимирович (Егоров Андрей Владимирович, Yehorov Andrii Volodymyrovych) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", доцент кафедри електричних машин; м. Харків; тел.: (098) 851-84-94.

Дунев Олексій Олександрович (Дунев Алексей Александрович, Duniev Oleksii Oleksandrovych) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних машин, тел.: (096) 909-11-04.