

А.М. МАСЛЕННИКОВ

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КІЛЬКОСТІ ПОЛЮСІВ НА ЗОВНІШНЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ БЕЗКОЛЕКТОРНОЇ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ В ГЕНЕРАТОРНОМУ РЕЖИМІ

У статті наведено результати дослідження генераторного режиму роботи безколекторної машини постійного струму (БМПС) при роботі на активне навантаження. Для аналізу створено дві моделі з кількістю постійних магнітів на роторі, що відрізняється вдвічі. Актуальність дослідження обумовлена широким спектром застосування БМПС в різних галузях. Однією з ключових переваг БМПС є відсутність щітково-колекторного вузла, який замінений контролером з напівпровідниковими елементами. Це дозволяє підвищити надійність роботи БМПС та розширити можливості режимів роботи. Основною метою цього дослідження є визначення впливу кількості постійних магнітів на зовнішню характеристику БМПС в генераторному режимі. Для досягнення цієї мети було проведено комп'ютерне моделювання з використанням програмного забезпечення *ANSYS Maxwell*. Це програмне забезпечення спрямоване для дослідження та розрахунку картини магнітного поля методом скінчених елементів в електромеханічних пристроях, що дозволяє отримати точні результати для аналізу. Для кожної з моделей БМПС визначено ступінь насичення елементів магнітної системи та отримано графіки залежності напруги, струму та гальмівного моменту на валу генератора від часу. Аналіз результатів розрахунку моделей БМПС з кількістю постійних магнітів 46 шт. та 92 шт. продемонстрував вплив на форму графіків напруги і струму, що призводить до деякого невеликого спотворення їх форми. Отримані результати розрахунків дозволили визначити ККД та побудувати зовнішню характеристику для обох моделей БМПС. Більший ККД було отримано для моделі БМПС з 92 постійними магнітами на роторі. Зовнішня характеристика для генераторного режиму роботи БМПС продемонструвала зміну значення напруги при переході від неробочого ходу до режиму роботи з номінальним струмом в межах 15 % та 21 %, що свідчить про жорсткість характеристики. Висновки роботи вказують на можливість покращення ефективності БМПС за рахунок оптимізації конструкції магнітної системи та умов охолодження, а також можуть бути корисними для інженерів і розробників електромеханічних систем, які прагнуть покращити характеристики своїх продуктів.

Ключові слова: *ANSYS Maxwell*, безколекторна машина постійного струму, постійні магніти, генераторний режим.

А.М. MASLIENNIKOV

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE NUMBER OF POLES ON THE EXTERNAL CHARACTERISTIC OF A BRUSHLESS DC MACHINE IN THE GENERATOR MODE

The article presents the results of a study on the generator mode of operation of a brushless *DC* machine (*BLDC*) when operating under active load. For analysis, two models were created with the number of permanent magnets on the rotor differing by a factor of two. The relevance of the research is due to the wide range of applications of *BLDC* in various fields. One of the key advantages of *BLDC* is the absence of a brush-commutator unit, which is replaced by a controller with semiconductor elements. This increases the reliability of *BLDC* and expands the range of operating modes. The main objective of this study is to determine the impact of the number of permanent magnets on the external characteristic of *BLDC* in generator mode. To achieve this goal, computer modeling was performed using *ANSYS Maxwell* software. This software is designed to study and calculate the magnetic field pattern using the finite element method in electromechanical devices, providing accurate results for analysis. For each *BLDC* model, the degree of saturation of the magnetic system elements was determined, and graphs of voltage, current, and braking torque at the generator shaft over time were obtained. Analysis of the calculation results for *BLDC* models with 46 and 92 permanent magnets demonstrated an impact on the voltage and current waveforms, leading to some slight distortion of their shape. The obtained calculation results allowed determining the efficiency and constructing the external characteristic for both *BLDC* models. Higher efficiency was obtained for the *BLDC* model with 92 permanent magnets on the rotor. The external characteristic for the generator mode of *BLDC* operation demonstrated a change in voltage when transitioning from idle to nominal current operation within the range of 15% and 21%, indicating the stiffness of the characteristic. The conclusions of the study indicate the potential for improving the efficiency of *BLDC* through optimization of the magnetic system design and cooling conditions, and can be useful for engineers and developers of electromechanical systems aiming to improve the performance of their products.

Key words: *ANSYS Maxwell*, brushless *DC* machine, permanent magnets, generator mode.

Актуальність. Безколекторна машина постійного струму (БМПС) досліджується багатьма авторами, має певний ряд потужностей та частот обертання, а також використовується в різних напрямках життєдіяльності людини. Серед таких напрямків можна зазначити транспорт, верстати та обладнання, ручний електроінструмент, автономні системи електроживлення. Цей досить широкий спектр застосування пояснюється наявністю гарних регульованих властивостей БМПС та відсутністю щітково-колекторного вузла, який замінено контролером з напівпровідниковими елементами – транзисторами. В англомовній літературі такий тип електричної машини має абревіатуру *BLDC* (*Brushless Direct Current*). Дослідження цього типу електричних машин супроводжується поєднанням з дослідженням її системи керування [1, 2], бо саме вона відповідає за належну роботу електричної машини. Визначення сфери застосування БМПС призводить до появи певних рішень при проектуванні магнітної системи, системи охолодження, загальної конструкції.

БМПС найчастіше використовуються як двигун, але з огляду на умови роботи в транспортних засобах він працює і в генераторному режимі.

Постановка задачі. Розглядаючи конструкцію БМПС, слід зауважити, що виробники цього типу електричних машин найчастіше використовують неодимові постійні магніти (ПМ) на роторі. Вибір розмірів ПМ, їх кількості та розташування завжди має певний вплив на експлуатаційні характеристики БМПС. Розташування ПМ по колу осердя ротора найчастіше виконується таким чином, що всі ПМ щільно розташовані один до одного, але також можливо розташовувати їх з певним проміжком між ними. Це дозволяє зменшити їх вагу та отримати додаткові вентиляційні канали для руху повітря. Кількість ПМ і топологія їх розташування мають вплив на форму напруги, струму, обертового моменту. З огляду на це зробимо розрахунки та проведемо аналіз результатів для двох моделей БМПС, що будуть відрізнятися кількістю ПМ та розміром проміжку між ними.

© А.М. Масленніков 2024

Аналіз. Проектування БМПС виконується відповідно до умов роботи і номінальних даних. Таким чином, ця електрична машина має різні конструктивні виконання і питомі потужності. При використанні БМПС для електропривода велосипеда в якості мотор-колес у поєднанні з редуктором або при прямому приводі питома потужність знаходиться в межах 0,11-0,3 кВт/кг. Типові конструкції мотор-колес з редуктором та з прямим приводом наведені на рис. 1 та рис. 2. Більший показник питомої потужності відноситься до більшої потужності мотор-колеса. Цей показник питомої потужності є досить пристойним, бо для асинхронних двигунів загальнопромислового призначення він знаходиться в межах від 0,05-0,15 кВт/кг при частоті обертання магнітного поля статора 3000 об/хв та 0,03-0,1 кВт/кг при 1000 об/хв.

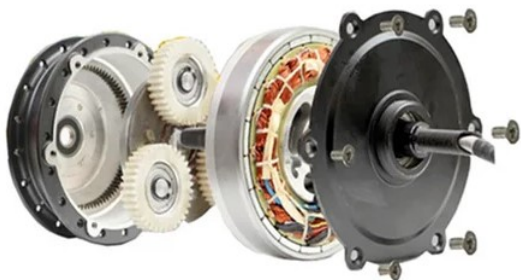


Рис. 1. Конструкція мотор-колеса з редуктором



Рис. 2. Конструкція мотор-колеса з прямим приводом

Така ж тенденція збільшення питомої потужності спостерігається і при використанні БМПС для електроприводу мультикоптерів, але її діапазон становить вже 0,5-1,2 кВт/кг. Ці високі значення питомої потужності досягаються конструкцією БМПС (рис. 3), підвищеною частотою обертання та наявністю самоохолодження від гвинтів. Цих показників неможливо досягнути для мотор-колеса через умови використання та вимог до конструктивного виконання.



Рис. 3. Загальний вид БМПС для мультикоптера

При використанні БМПС в якості генератора у автономних системах електропостачання її конструкція

залишається такою самою як і для систем, де БМПС працює в режимі двигуна.

Виробники БМПС зазначають в паспортних даних номінальну та максимальну потужності, які відрізняються в 2-4 рази. Слід зауважити, що максимальна потужність обмежена у часі (5-60 сек.) та обов'язково зазначена у паспортних даних і обмежена досягненням допустимої робочої температури обмотки статора та ПМ. Подальше підвищення температури призводить до руйнації ізоляції обмотки статора, розмагнічення ПМ та виходу з ладу електричної машини.

Для попередження перевищення допустимої температури електричної машини використовують температурний захист за ДСТУ EN 60034-11 [3], що складається з кола терморезисторів типу СТ14 в обмотці статора. Їх використання вимагає додаткових витрат та додаткового місця в пазу осердя статора, тому для електроприводів з системою керування найчастіше обмежуються значенням струму та його тривалістю.

Для покращення умов охолодження електричної машини в її конструкцію вносять аксіальні та радіальні вентиляційні канали, використовують рідинне охолодження для обмотки і зовнішньої поверхні. Способи охолодження електричних машин регламентуються ДСТУ EN 60034-6 [4]. Конструкція більшості електричних машин проектується за умови самовентиляції, але також існують і електричні машини з примусовою системою охолодження. Використання примусової системи охолодження дозволяє збільшити електромагнітне навантаження електричної машини і отримати більші значення питомої потужності електричної машини, але слід пам'ятати, що примусова система охолодження також має свою вагу. Звісно, що примусова система охолодження є більш ефективною, але і більш коштовною. Такі системи розповсюджені, наприклад, в автономних системах електроживлення літаків та гелікоптерів, що дозволяє отримати значення питомої потужності електричного генератора на рівні 1,5-2,4 кВт/кг [5]. Такий підхід в авіації дозволяє компактно розташувати всі елементи системи.

Типова конструкція ротора БМПС з призматичними постійними магнітами показана на рис. 4. Постійні магніти щільно розташовані один до одного та без проміжку між ними.



Рис. 4. Розташування постійних магнітів на роторі БМПС

За допомогою програмного забезпечення, що відноситься до CAD-систем, можливо створити модель конструкції БМПС, яку потім зручно імпортувати до програмного середовища *ANSYS Maxwell* [6]. Опрацювання моделі в *ANSYS Maxwell* відбувається через призначення граничних умов та властивостей матеріалів певним елементам конструкції. Після чого за допомогою мето-

ду скінчених елементів накладається розрахункова сітка автоматично або задається дослідником вручну та проводиться розрахунок магнітного поля.

Програма *ANSYS Maxwell* є досить потужною та має різноманітні інструменти для розрахунку та аналізу магнітних систем електромеханічних пристроїв, що дозволяє отримувати результати в статистиці та проводити дослідження в динаміці. Таким чином, можливо отримати одразу форму напруги, струму, сили, обертового моменту та ін. при внесенні певних змін до елементів конструкції магнітного кола. Дослідження БМПС проводимо для генераторного режиму роботи створюючи 3D моделі магнітної системи.

Зазвичай, вхідними даними для проектування є номінальна потужність та частота обертання, режим роботи, ступінь захисту, тип охолодження, але для створення моделі БМПС надано також і обмеження в габаритних розмірах, за вагою та у використанні ПМ стандартних розмірів. Зовнішній діаметр ротора не повинен перевищувати 340 мм, а вага магнітної системи з обмоткою – 10 кг. Виходячи з цих обмежень створено дві 3D моделі БМПС (рис. 5) з використанням ПМ з розмірами 30x20x10 мм та 50x8x5 мм (ДхШхВ). Використовуючи такі ПМ отримаємо їх кількість по внутрішньому колу ротора 46 шт. та 92 шт. Таким чином, маємо дві моделі, що досліджуються з різною кількістю пар полюсів: $2p = 46$, $2p = 92$. Різниця між кількістю та розмірами ПМ дає і різницю у внутрішньому діаметрі осердя ротора: для $2p = 46$ треба мати розмір 313,2 мм, а для $2p = 92$ – 303,2 мм. Вага магнітної системи моделі БМПС $2p = 46$ становить 8,1 кг, а для $2p = 92$ – 7,7 кг.

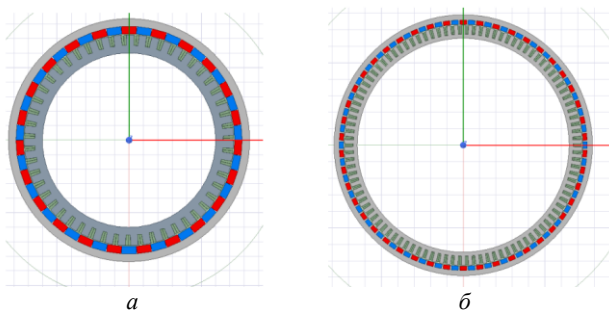


Рис. 5. Вид 3D моделей БМПС у програмному середовищі *ANSYS Maxwell* з різною кількістю ПМ: а – 46 шт.; б – 92 шт.

Зазвичай в таких БМПС використовують неодимові ПМ, серед яких досить багато марок сплавів. Вони відрізняються значенням залишкової магнітної індукції B_r , коерцитивної сили H_c , значенням робочої температури. Чим більші ці значення, тим більш коштовним є ПМ. Для розрахунку моделі БМПС обираємо розповсюджену марку сплаву неодимового ПМ N42 з $B_r = 1,3$ Тл, $H_c = 955$ кА/м та робочою температурою до 80 °С [7].

Для аналізу впливу різної кількості ПМ на форму та амплітуду напруги й струму в створених моделях БМПС виконуємо обмотку статора трифазною із з'єднанням за схемою зірка «Y». Також в моделі БМПС вказуємо, що статор виконано шихтованим з електротехнічної сталі марки 2411 товщиною 0,25 мм.

Кількість пазів статора для моделі БМПС з $2p = 46$ становить 51 шт., а для $2p = 92$ – 102 шт. Модель БМПС з розрахованою картиною магнітного поля показана на рис. 6.

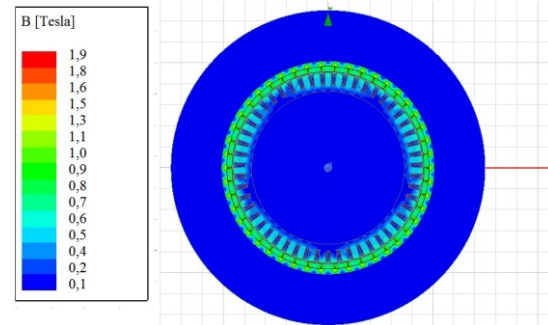
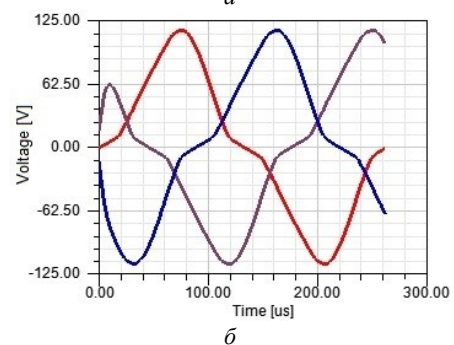
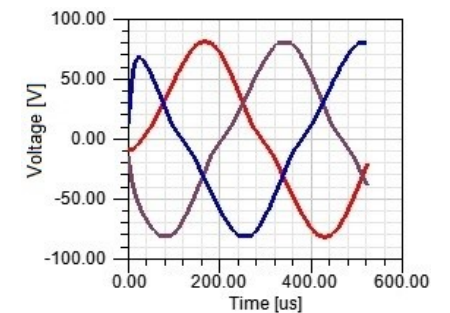


Рис. 6. Загальний вигляд моделі БМПС в *ANSYS Maxwell* після розрахунку картини магнітного поля

Для зручності розрахунку проводимо його з обмеженням часу, який відповідає одному періоду напруги. Це дозволяє суттєво зменшити час роботи комп'ютера та отримати необхідні результати.

Розраховуючи модель БМПС з $2p = 46$ для генераторного режиму роботи використовуємо в якості навантаження активний опір, значення якого змінюються від 0,2 Ом до 0,8 Ом з кроком 0,2 Ом, а для моделі БМПС з $2p = 92$ – від 0,5 Ом до 2 Ом з кроком 0,5 Ом. За результатами розрахунку наведемо залежність струму, напруги, гальмівного моменту на валу генератора від часу (рис. 7, 8, 9, 10). Для оцінки правильності у призначенні полярності ПМ та створенні обмотки статора необхідно подивитись на значення напруги в усіх трьох фазах обмотки статора. Як бачимо з рис.7, ці значення є майже однаковими і симетричними, а отже моделі БМПС задані правильно.



а – 46 шт.; б – 92 шт.

Рис. 7. Трифазна напруга моделі БМПС в режимі генератора з різною кількістю ПМ

Отримані результати розрахунку трифазної напруги для обох моделей БМПС демонструють різні амплітудні значення. При однаковій частоті обертання для конструкції $2p = 46$ та при підключенні симетричного активного навантаження $0,8 \text{ Ом}$ амплітудне значення напруги становить 80 В , а для конструкції $2p = 92$ – 114 В при 2 Ом . Також помітна і зміна форми залежності напруги від часу. При роботі БМПС в генераторному режимі з використанням пасивного випрямляча ці амплітудні значення будуть значеннями постійної напруги з деякою пульсацією, що нівелюється за допомогою фільтрів.

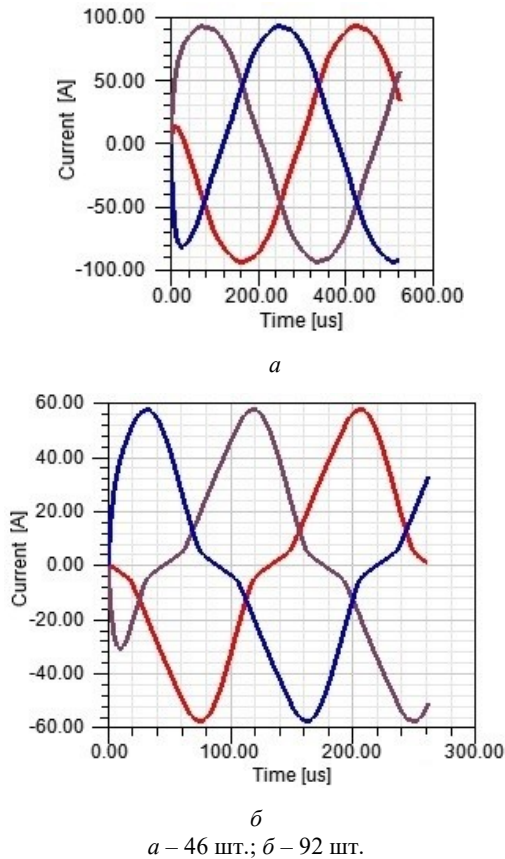
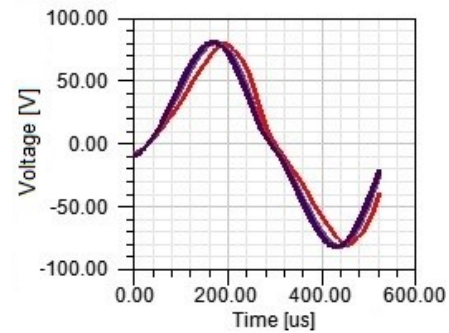


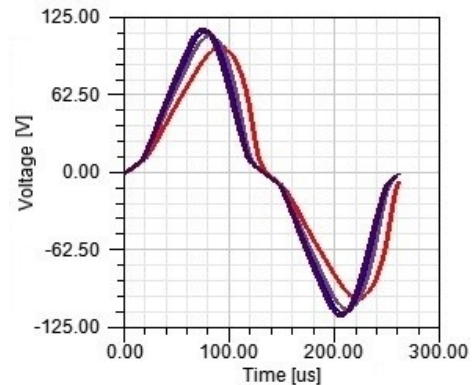
Рис. 8. Трифазні струми моделі БМПС в режимі генератора з різною кількістю ПМ

Амплітудні значення струмів склали 92 А і 57 А при під'єднанні до трифазної обмотки статора симетричного активного навантаження, включеного за схемою «Y» з опором у фазі $0,8 \text{ Ом}$ і 2 Ом для кожної відповідної моделі БМПС (рис. 8). Як бачимо з наведених залежностей струмів від часу їх форма подібна формі фазних напруг.

Після отриманих значень фазних напруг та струмів, а також оцінки правильності створення моделі БМПС можемо переходити до варіювання значенням активного опору для навантаження БМПС в генераторному режимі роботи і отриманню зовнішніх характеристик та ККД. Для зручності відображення результатів їх наведено лише для однієї фази обмотки статора генератора.

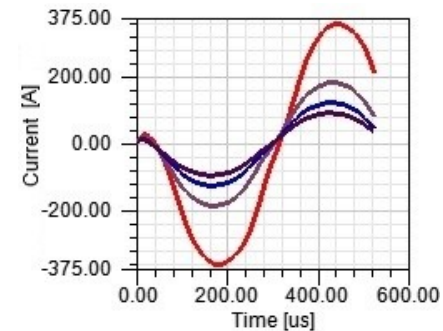


а

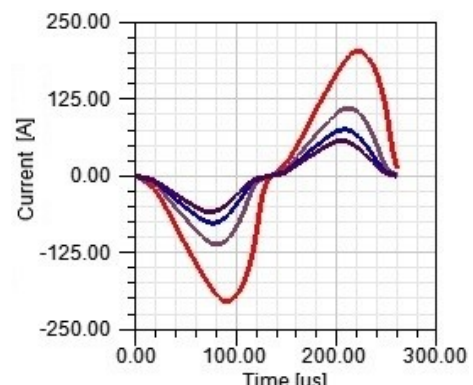


б

Рис. 9. Фазна напруга при різних значеннях опору навантаження для моделі БМПС в режимі генератора з різною кількістю ПМ: а – 46 шт.; б – 92 шт.



а



б

Рис. 10. Фазний струм при різних значеннях опору навантаження для моделі БМПС в режимі генератора з різною кількістю ПМ: а – 46 шт.; б – 92 шт.

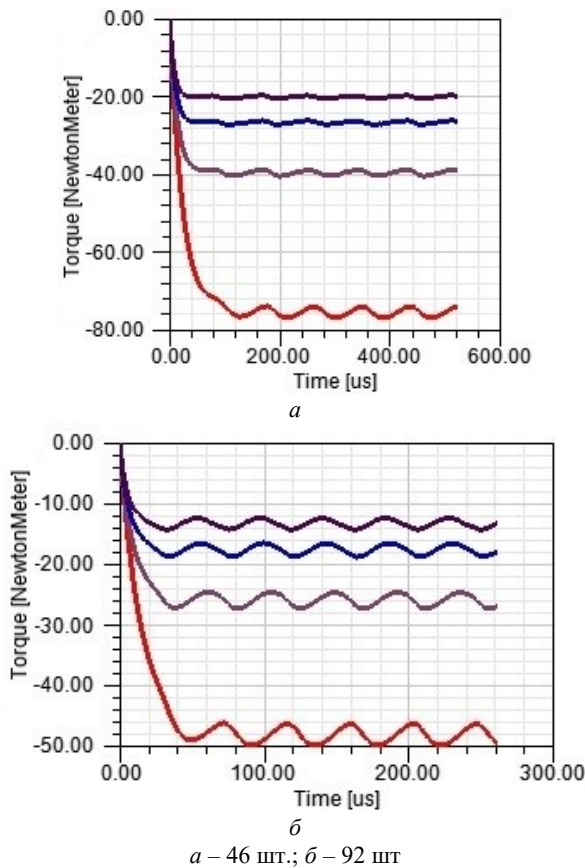


Рис. 11. Гальмівний момент на валу генератора при різних значеннях опору навантаження для моделі БМПС в режимі генератора з різною кількістю ПМ

Середнє значення гальмівного моменту для моделей БМПС з $2p = 46$ та $2p = 92$ наведено у таблиці 1 та 2. При цьому пульсація моменту становить 2 та 4 Н·м для відповідної моделі БМПС для середнього значення 25 Н·м – 8 та 16 %.

Маючи значення напруги, струму, гальмівного моменту та частоти обертання можна визначити вхідну та вихідну потужність, а отже і ККД. Звісно, що такий розрахунок не є точним та не враховує додаткові, магнітні, механічні втрати потужності, але дозволяє в одних умовах дати певну оцінку. Результати розрахунку наведені у таблиці 1 та 2.

Таблиця 1 – Результати розрахунку моделі БМПС в генераторному режимі роботи при $2p = 46$

R	U_m	I_m	$P_{els\ max}$	M	P_{in}	P_{out}	ККД
Ом	В	А	кВт	Н·м	кВт	кВт	%
0,2	78	358	4,3	71,7	35,9	27,9	69,4
0,4	80	183	1,1	38,4	19,2	14,6	71,9
0,6	80	123	0,5	26,0	13	9,8	72,6
0,8	80	92	0,3	19,7	9,9	7,4	72,5
∞	97	0	0	0	0	0	0

Таблиця 2 – Результати розрахунку моделі БМПС в генераторному режимі роботи при $2p = 92$

R	U_m	I_m	$P_{els\ max}$	M	P_{in}	P_{out}	ККД
Ом	В	А	кВт	Н·м	кВт	кВт	%
0,5	101	202	1,4	45	22,5	20,4	85,4
1,0	110	110	0,4	25	12,5	12,1	93,8
1,5	113	75	0,2	17	8,5	8,2	94,3
2,0	114	57	0,1	13	6,5	6,4	97,0
∞	117	0	0	0	0	0	0

Отримані результати моделювання режиму навантаження БМПС в генераторному режимі демонструють, що модель БМПС з $2p = 92$ є більш ефективною. Звісно, що електричні і магнітні втрати потужності будуть мати своє місце та істотно вплинуть на ККД, але при значенні активного опору однієї фази обмотки статора 0,00756 Ом та 0,01 Ом для моделі БМПС з $2p = 46$ та $2p = 92$ відповідно маємо межі електричних втрат потужності 0,3-4,3 кВт та 0,1-1,4 кВт. Площа поперечного перерізу паза, що зайнята одним витком обмотки, становить 20,2 мм² та 16,5 мм² для моделі БМПС з $2p = 46$ та $2p = 92$ відповідно. Тож можна визначити і межі зміни густини струму і вони становлять від 3 до 10 А/мм² та лише для струму 358 А – 17,7 А/мм².

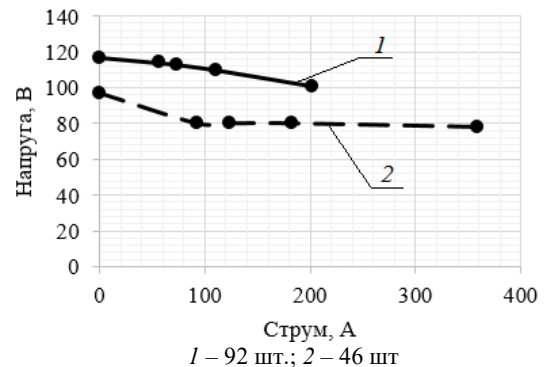


Рис. 12. Зовнішні характеристики для моделі БМПС в режимі генератора з різною кількістю ПМ

Висновки. Отримані результати дослідження моделей БМПС у середовищі *ANSYS Maxwell* наочно демонструють вплив кількості ПМ та топології ротора на форму графіків напруги, струму, гальмівного моменту на валу генератора в залежності від часу. Ці дані дозволяють оцінити приблизний рівень ККД моделей та побудувати зовнішні характеристики для генераторного режиму роботи БМПС. Модель БМПС з $2p = 92$ має кращі показники, але має більшу пульсацію гальмівного моменту на валу, що може спричинити додаткове підвищення рівня вібрації. Значення корисної потужності, що віддається навантаженню генератора дорівнюють 14,6 кВт та 20,4 кВт при густині струму 10 А/мм². Це дозволяє отримати питому потужність на рівні 1,8 та 2,6 кВт/кг відповідно для моделі БМПС $2p = 46$ та $2p = 92$, але конструкція електричної машини складається не лише з магнітної системи. Конструкційні елементи та їх матеріали збільшать

вагу, що призведе до деякого зменшення питомої потужності.

Список літератури

- 1 Крупенко О.Ф., Толочко О.І. Дослідження системи керування безколекторним двигуном постійного струму для приводу колес електровелосипеду. *Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів та студентів «Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики»*, 2018. С. 460-463.
- 2 Семененко Р. Ю., Ісип М. О., Юрчишин О. Я. Синтез системи електроприводу вантажного велосипеда. *Зб. пр. Міжнар. науково-техн. конф. молодих вчен. та студентів*, Київ, 19–30 трав. 2020. № 2. С. 92–95.
- 3 *ДСТУ EN 60034-11:2016. Машина електричні обертові. Частина 11. Тепловий захист (EN 60034-11:2004, IDT)*. Чинний від 2017-11-01. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017.
- 4 *ДСТУ EN 60034-6:2019. Машина електричні обертові. Частина 6. Методи охолодження (IS-код) (EN 60034-6:1993, IDT)* ; чинний від 2021-01-01. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2021.
- 5 Генератор авіаційний. <https://vertol.com.ua/>. URL: <https://vertol.com.ua/catalog/katalog-ati/ati-dlya-otechestvennyh-vs/sistemy-bortovogo-oborudovaniya/sistema-bortovogo-9> (дата звернення: 22.05.2024).
- 6 ANSYS Inc. Access Knowledge Materials. <https://ansyskm.ansys.com/>
- 7 Неодімовий магніт – Магніти в Україні. URL: <https://neodim.net.ua/uk/> (дата звернення: 09.05.2024).

References (transliterated)

- 1 Krupenko O.F., Tolochko O.I. Doslidzhennia systemy keruvannia bezkolektornym dvyhunom postoinoho strumu dlia pryvodu koles elektrovelosypedu. *Mizhnarodnyi naukovo-tekhnichnyi zhurnal molodykh uchenykh, aspirantiv ta studentiv «Suchasni problemy elektroenerhotekhniki ta avtomatyky»*, 2018. Pp. 460-463.
- 2 Semenenko R. Yu., Isyp M. O., Yurchyshyn O. Ya. Syntez systemy elektropryvodu vantazhnogo velosypeda. *Zb. pr. Mizhnar. naukovo-tekhn. konf. molodykh vchen. ta studentiv*, Kyiv, 19–30 trav. 2020. № 2 Pp. 92–95.
- 3 *DSTU EN 60034-11:2016. Mashyny elektrychni obertovi. Chastyna 11. Teplovyi zakhyst (EN 60034-11:2004, IDT)*. Na zaminu DSTU EN 60034-11:2014 ; chynnyi vid 2017-11-01. Vyd. ofits. Kyiv : DP «UkrNDNTs», 2017.
- 4 *DSTU EN 60034-6:2019. Mashyny elektrychni obertovi. Chastyna 6. Metody okholodzhennia (IS-kod). (EN 60034-6:1993, IDT)* Na zaminu DSTU EN 60034-6: 2015 ; chynnyi vid 2021-01-01. Vyd. ofits. Kyiv : DP «UkrNDNTs», 2021.
- 5 Henerator aviatsiyni. <https://vertol.com.ua/>. URL: <https://vertol.com.ua/catalog/katalog-ati/ati-dlya-otechestvennyh-vs/sistemy-bortovogo-oborudovaniya/sistema-bortovogo-9> (data zvernennia: 22.05.2024).
- 6 ANSYS Inc. Access Knowledge Materials. <https://ansyskm.ansys.com/>
- 7 Neodimovii mahnit – Mahnity v Ukraini. URL: <https://neodim.net.ua/uk/> (data zvernennia: 09.05.2024).

Поступила (received) 31.05.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Масленников Андрій 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, e-mail: Andrii.Masliennikov@khpri.edu.ua