

УДК 621.313.8

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.69.095>

ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕЗКОНТАКТНОГО ДВИГУНА З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ ПРИ ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНОМУ ЖИВЛЕННІ

К.П. Акинін*, докт. техн. наук, **В.Г. Кіресв****, канд. техн. наук, **І.С.Петухов*****, докт. техн. наук, **А.А. Філоменко******, канд. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: kvg2016@ukr.net

Статтю присвячено дослідженню характеристик та режимів роботи безконтактного двигуна з постійними магнітами у структурі електроприводу із двопровідним зовнішнім живленням від джерела напруги із широтно-імпульсним регулюванням. Наведено залежності частоти обертання, діючого значення статорного струму та середнього значення струму у ланці постійного струму інвертора напруги, а також залежності коефіцієнта моменту від середньої величини моменту двигуна. Проведено дослідження впливу частоти напруги живлення на режими роботи двигуна. Досліджено режими обмеження струму та моменту двигуна в системі з однопозиційним релейним регулятором та формувачем фіксованого інтервалу відключення транзисторів. Бібл. 12, рис. 16.

Ключові слова: безконтактний двигун з постійними магнітами, мостовий інвертор напруги, широтно-імпульсне регулювання, електромеханічна характеристика.

Через об'єктивні причини протягом тривалого часу при побудові автоматизованих електромеханічних приладів і систем як виконавчі ланки й до теперішнього часу використовуються колекторні двигуни постійного струму [1, 2]. Такі двигуни є найбільш простими при їх застосуванні, оскільки при цьому не потрібне використання складних напівпровідникових перетворювачів, а управління здійснюється шляхом регулювання постійної напруги живлення та зміни її полярності для реалізації реверсу двигуна. Недоліки колекторних двигунів очевидні та обумовлені наявністю механічних контактів на роторі, що обертається.

У той же час протягом останніх десятиліть завдяки своїм перевагам в електромеханічних системах широко використовуються безконтактні двигуни (БДПМ) з постійними магнітами на роторі [3-5].

Однією із задач при побудові електромеханічних систем є необхідність побудови безконтактного конструктивного та функціонального аналога колекторного двигуна постійного струму на основі електроприводу з БДПМ для реверсивного управління кутовою швидкістю обертання ротора за допомогою двох вхідних провідників живлення. Використання такої структури електроприводу дозволяє зробити заміну вже діючого колекторного двигуна на безконтактний без зміни загальної структури схеми живлення та управління автоматизованої електромеханічної системи.

Структури електроприводів на основі БДПМ з двопровідним живленням та управлінням були запропоновані у [6-8]. Вони подібні до структур електроприводів змінного струму, побудованих на основі дволанкових перетворювачів частоти з вхідним випрямлячем мережевої змінної напруги та вихідним інвертором напруги [9]. У цій задачі побудови електроприводу використовується живлення його схеми від джерела постійної напруги за допомогою двох вхідних провідників, де випрямляч здійснює випрямлення вхідної напруги, яка подається на вхід інвертора.

Метою статті є дослідження статичних електромеханічних характеристик і режимів роботи БДПМ у структурі електроприводу з двопровідним управлінням при широтно-імпульсному живленні від зовнішнього джерела. Такий електропривод призначений для використання його як виконавчого елемента в автоматизованих електромеханічних системах.



Основні матеріали та результати досліджень. Структура електроприводу на основі БДПМ [6] представлена на рис. 1, де ДЖ – зовнішнє джерело живлення постійного струму з вихідною імпульсною напругою, при цьому імпульси напруги мають прямокутну форму, а регулювання середньої величини напруги здійснюється шляхом зміни шпаруватості послідовності імпульсів; МВ – мостовий випрямляч; Д – датчик струму; ІН – трифазний мостовий інвертор напруги; СК – система керування електроприводом; ДПР – датчик положення ротора; U_1 – сигнал для визначення полярності вхідної напруги та завдання напрямку обертання двигуна, що вимірюється відносно точки ланки постійного струму з меншим потенціалом; U_2 – сигнал напруги у ланці постійного струму; U_s – напруга на виході зовнішнього джерела живлення з широтно-імпульсним регулюванням. При цьому всі елементи електроприводу – випрямляч, інвертор напруги, система керування, датчик положення ротора та виконавчий безконтактний двигун – конструктивно об'єднуються в єдиному корпусі. І в такому випадку реверсивне регулювання кутової швидкості двигуна здійснюється за двома провідниками, що з'єднують джерело живлення зі схемою електроприводу. А в результаті маємо безконтактний конструктивний та функціональний аналог колекторного двигуна постійного струму.

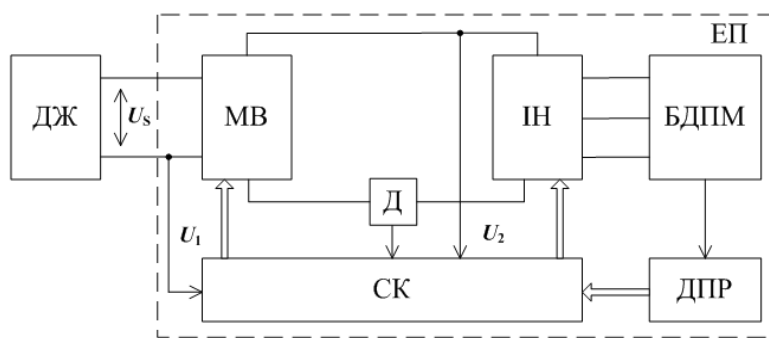


Рис. 1. Загальна структура електроприводу на основі БДПМ

У структурі (рис. 1) мостовий випрямляч може бути виконаний на основі чотирьох діодів Шотки або MOSFETs. В останньому випадку залежно від полярності напруги, що подається з виходу зовнішнього джерела живлення, відповідно до відкритої пари діодів в діагоналі моста випрямляча включається пара транзисторів. Можливість використання MOSFETs як силових ключів випрямляча для комутації напруги в даній

схемі базується на відомому явищі протікання струму через канал включеного напівпровідникового приладу у двох напрямках – від стоку до витoku та навпаки [10]. Падіння напруги на вентилях некерованого випрямляча, навіть якщо вони виконані на базі діодів Шотки, відносно великі. Тому для систем з низьким рівнем напруги живлення, наприклад до 30 В, доцільною є реалізація активного однофазного мостового випрямляча на базі MOSFETs. Така можливість розглянута в [11] для зменшення втрат у силових ключах випрямляча змінної напруги.

Залежно від полярності вихідної напруги джерела живлення та величини сигналу U_1 змінюється послідовність сигналів комутації транзисторів інвертора напруги та таким чином здійснюється реверс безконтактного двигуна. Сигнали з виходу датчика струму та сигнал напруги u_2 використовуються для контролю стану електроприводу та двигуна.

Оскільки одна задана полярність імпульсів напруги джерела живлення зберігається протягом відносно тривалого часу (що багаторазово перевищує величину періоду змінної напруги статорних обмоток двигуна), для даного дослідження ми представляємо розрахункову схему електроприводу (рис. 2), на якій мостовий випрямляч замінено резистором R_2 . Розмір його опору дорівнює сумі опорів двох відкритих MOSFETs. Крім того, на рис. 2 показаний трифазний мостовий інвертор напруги на основі шести MOSFETs n-типу провідності, симетрична трифазна R - L - e ланка статорних обмоток двигуна, а датчик струму представлений резистором R_s . Подання статорних обмоток БДПМ трифазною R - L - e ланкою справедливо та припустимо для безпазової конструкції статора при поверхневому встановленні постійних магнітів на роторі [9].

Напруга на виході зовнішнього джерела живлення є послідовністю прямокутних імпульсів напруги з амплітудою U_s , постійною частотою f_s та регульованою шпаруватістю γ .

Припускаючи, що статор двигуна є симетричним, три ЕРС статорної обмотки описуються виразами

$$e_A = k_m \omega \sin \theta; \quad (1)$$

$$e_B = k_m \omega \sin(\theta - 2\pi/3); \quad (2)$$

$$e_C = k_m \omega \sin(\theta - 4\pi/3); \quad (3)$$

де k_m , ω – постійний коефіцієнт і кутова швидкість обертання ротора двигуна; θ – електричний кут повороту валу ротора, що визначається як $\theta = p\omega t$, де p – число пар полюсів ротора; t – час.

У цій статті розглядається безпазовий БДПМ, який розробляється в даний час і призначений для використання як виконавчого елемента в автоматизованих електромеханічних системах. Двигун має такі основні параметри:

- номінальна потужність – 180 Вт;
- максимальна швидкість обертання на холостому ході – 4000 об/хв;
- номінальна швидкість обертання – 3000 об/хв;
- номінальний момент – 0,57 Нм;
- число пар полюсів – 1;
- номінальна напруга живлення електроприводу – 27 В.

Крім того, двигун і схема, зображені на рис. 2, характеризуються такими параметрами: $k_m = 0,06446$ Вс, $L_{11} = L_{12} = L_{13} = 2,27 \cdot 10^{-5}$ Гн, $R_{11} = R_{12} = R_{13} = 0,05$ Ом, $R_2 = 0,0034$ Ом. Частота комутації в даному дослідженні варіюється в діапазоні від 4 до 20 кГц.

Для оцінки режимів роботи БДПМ використовуватимемо такі показники:

M_{av} – середня величина моменту двигуна, при цьому миттєва величина моменту двигуна визначається за формулою

$$M = (i_A e_A + i_B e_B + i_C e_C) / \omega; \quad (4)$$

i_A, i_B, i_C – струми в обмотках статора; I_{av} – середня величина струму у ланці постійного струму електроприводу; I_{ef} – діюче значення струму у фазі статорної обмотки двигуна; k_{m2} – коефіцієнт моменту двигуна, що визначається за формулою як відношення середніх значень моменту та струму

$$k_{m2} = M_{av} / I_{av}. \quad (5)$$

Комутація мостового інвертора напруги здійснюється відповідно до алгоритму перемикання шести транзисторів при кутовій протяжності станів їхньої провід-

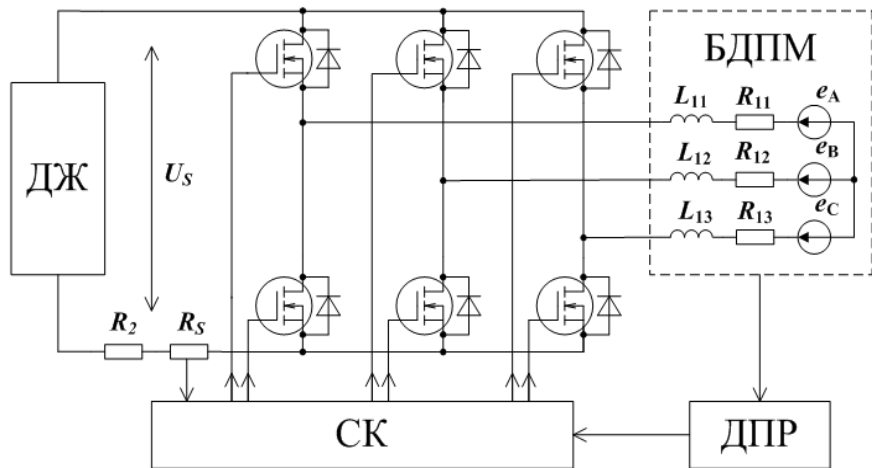


Рис. 2. Розрахункова схема електроприводу на основі БДПМ

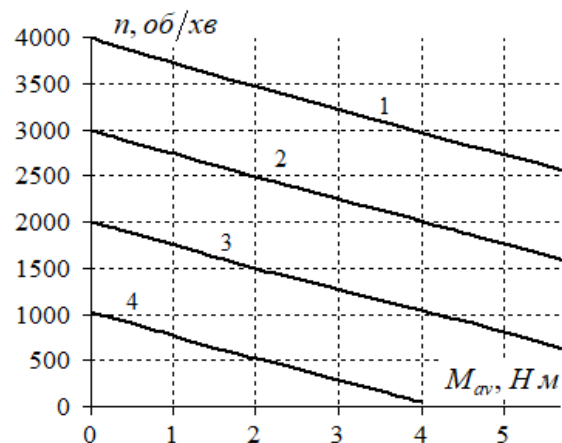


Рис. 3. Механічні характеристики $n(M_{av})$ БДПМ при $f_s=10$ кГц та шпаруватості γ – 1; 0,75; 0,5 та 0,25

ності на інтервалах 120 електричних градусів [4, 5, 8].

Для моделювання схеми (рис. 2) використано програмне середовище Micro-Cap 12. Далі при розрахунках статичних характеристик задаються швидкість двигуна та шпаруватість джерела живлення.

На рис. 3 показано графіки механічних характеристик двигуна як залежності швидкості обертання n валу двигуна від середньої величини його моменту M_{av} при чотирьох значеннях шпаруватості послідовності прямокутних імпульсів напруги живлення γ – 1; 0,75; 0,5 та 0,25, які позначені на рисунку цифрами від 1 до 4 відповідно.

На рис. 4 показано графіки електромеханічних характеристик двигуна як залежності діючого значення струму I_{ef} у фазі статорної обмотки двигуна та середньої величини струму I_{av} у ланці постійного струму від середньої величини моменту M_{av} . Тут можна зауважити, що криві графіків струмів I_{ef} і I_{av} при різних значеннях шпаруватості γ на малюнках практично не розрізняються.

І, нарешті, на рис. 5 показано графіки залежностей розрахункової величини коефіцієнта моменту двигуна k_{m2} . Аналіз цих залежностей показав середнє, максимальне та мінімальне значення цього коефіцієнта – 0,06514; 0,06719 та 0,06285 Нм/А. У такому випадку можна розрахувати відносні значення відхилень значень цього коефіцієнта від його середнього значення – +3,147% і -3,515%. На рис. 5 і далі є такі ж позначки «1, 2, 3, 4», як і на рис. 3.

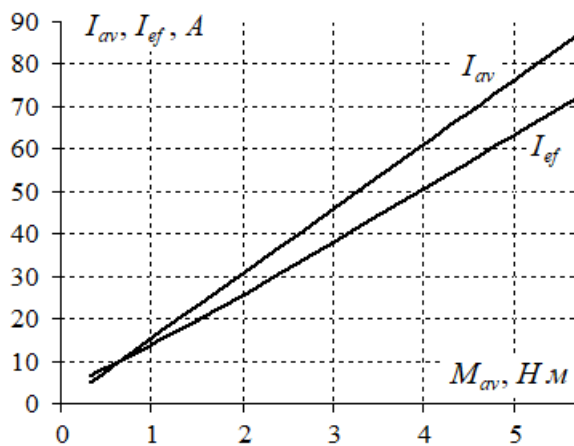


Рис. 4. Залежності діючого значення струму I_{ef} та середньої величини струму I_{av} у ланці постійного струму від середньої величини моменту M_{av} при $f_s=10$ кГц

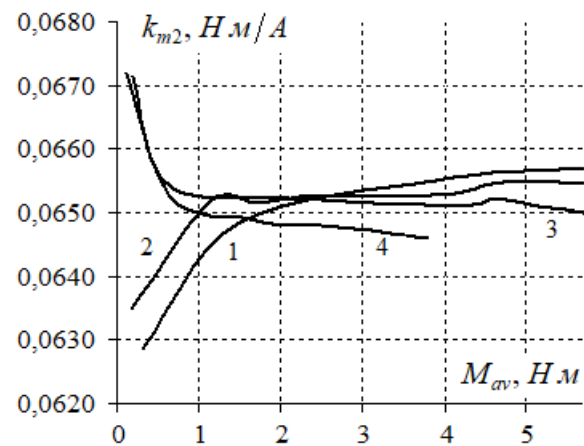


Рис. 5. Залежності величини коефіцієнта k_{m2} від середньої величини моменту M_{av} при $f_s=10$ кГц

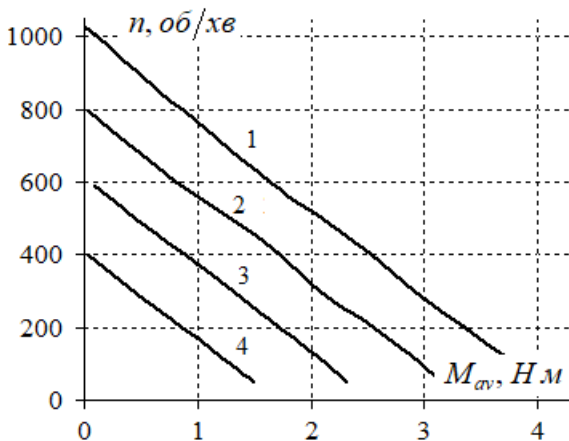


Рис. 6. Механічні характеристики $n(M_{av})$ при $f_s=10$ кГц та шпаруватості γ – 0,25; 0,2; 0,15 та 0,1

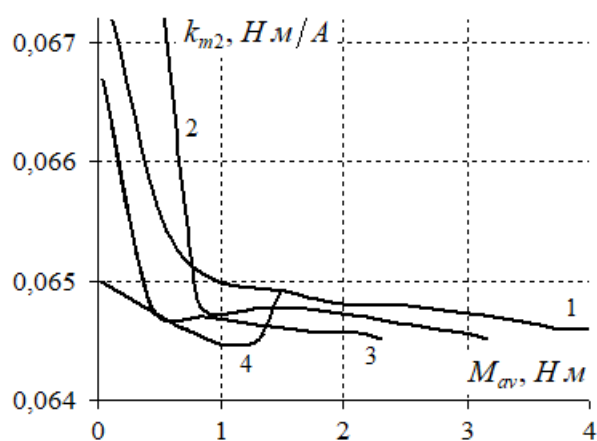


Рис. 7. Залежності величини коефіцієнта k_{m2} від середньої величини моменту M_{av} при $f_s=10$ кГц

Розрахунки (рис. 3-5) були виконані при частоті послідовності імпульсів напруги джерела живлення $f_s = 10 \text{ кГц}$.

На рис. 6 показано графіки механічних характеристик двигуна $n(M_{av})$ при чотирьох значеннях шпаруватості $\gamma - 0,25; 0,2; 0,15$ та $0,1$, які позначені на рисунку цифрами від 1 до 4 відповідно. На рис. 7 показано графіки залежностей розрахункової величини коефіцієнта моменту $k_{m2}(M_{av})$ при тих самих значеннях шпаруватості.

На рис. 8 і 10 показано графіки електромеханічних характеристик двигуна $I_{ef}(M_{av})$ та $I_{av}(M_{av})$, які були отримані при значеннях частоти f_s послідовності імпульсів напруги живлення 20 та 4 кГц відповідно. На рис. 9 і 11 показано графіки залежностей розрахункової величини коефіцієнта моменту двигуна $k_{m2}(M_{av})$ відповідно за тих же двох значень частоти.

Залежності, зображені на рис. 9–11, були отримані при одному значенні шпаруватості $\gamma = 0,5$. Аналіз залежності (рис. 9) показав середнє, максимальне та мінімальне значення цього коефіцієнта – 0,065038; 0,065175 та 0,0647 Нм/А . При цьому відносні значення відхилень значень коефіцієнта від його середнього значення – +0,2106% і -0,0338%. Очевидно, що крива на рис. 11 значно відхиляється від свого середнього значення в області малих значень моменту, а режим роботи БДПМ водночас характеризується гіршими показниками (рис. 10).

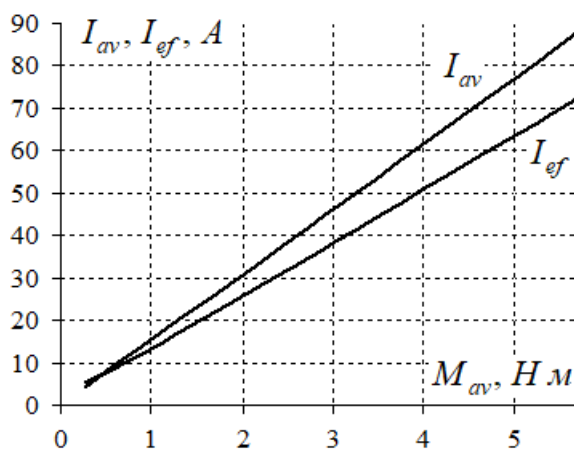


Рис. 8. Залежності діючого значення струму I_{ef} та середньої величини струму I_{av} у ланці постійного струму від середньої величини моменту M_{av} при $f_s = 20 \text{ кГц}$

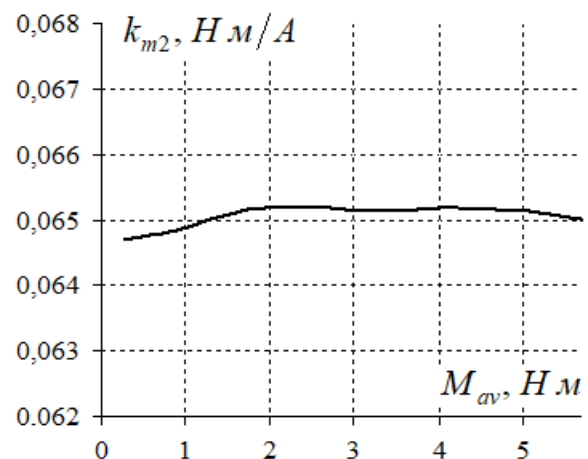


Рис. 9. Залежність величини коефіцієнта k_{m2} від середньої величини моменту M_{av} при $f_s = 20 \text{ кГц}$

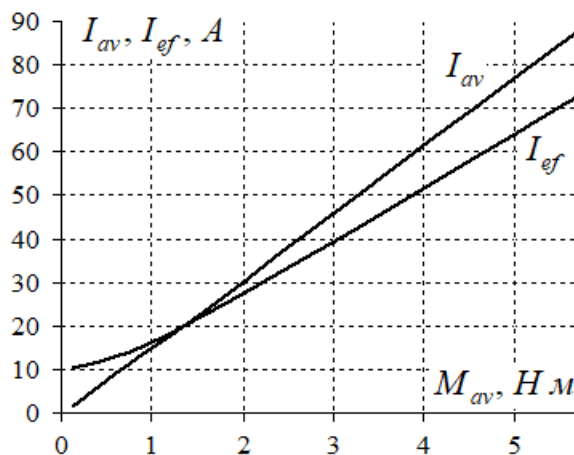


Рис. 10. Залежності діючого значення струму I_{ef} та середньої величини струму I_{av} у ланці постійного струму від середньої величини моменту M_{av} при $f_s = 4 \text{ кГц}$

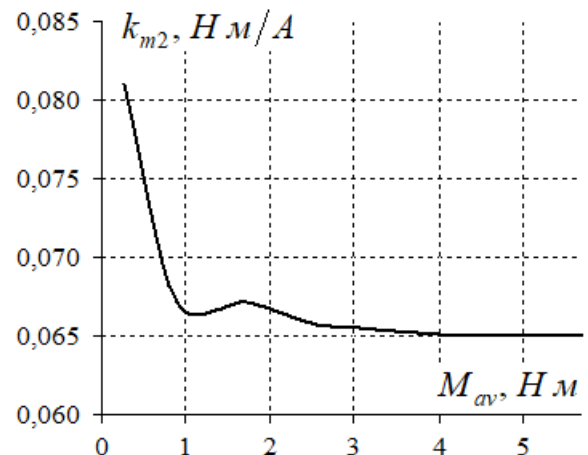


Рис. 11. Залежність величини коефіцієнта k_{m2} від середньої величини моменту M_{av} при $f_s = 4 \text{ кГц}$

Для ілюстрації електромагнітних процесів на рис. 12 представлено розраховані криві трьох фазних ЕРС статора e_A , e_B та e_C , струму i_A статорної обмотки фази А та миттєвої величини моменту двигуна M , розрахованого за формулою (4). Ці криві одержано за умов $n = 2000 \text{ об/хв}$ і $M_{av} = 1 \text{ Н.м}$, при цьому $I_{ef} = 13,83 \text{ А}$ та $\gamma = 0,565$.

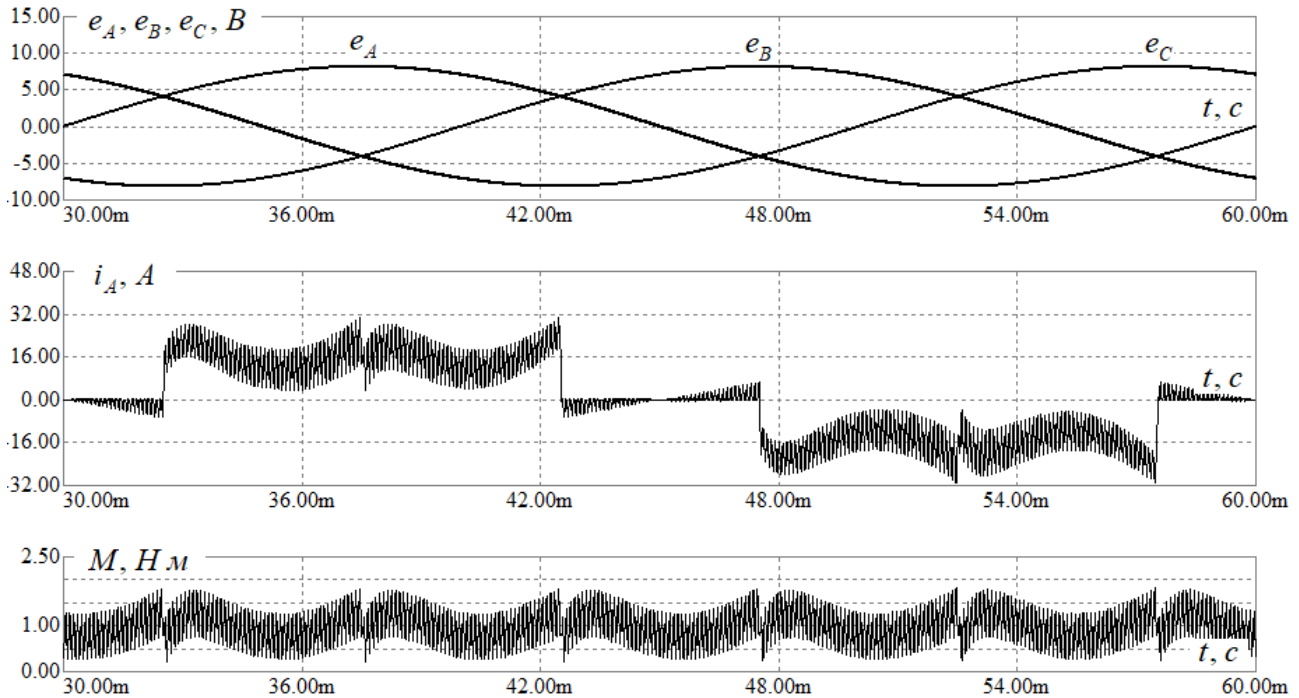


Рис. 12. Фазні ЕРС статора e_A , e_B та e_C , струм i_A статорної обмотки та миттєва величина моменту двигуна M при $f_s = 10 \text{ кГц}$

Для оцінки збільшення діючої величини фазного струму статора внаслідок впливу пульсацій сигналу ЕРС у ланці постійного струму інвертора напруги та дискретного алгоритму комутації інвертора напруги (рис.12), а також імпульсного характеру вихідної напруги джерела живлення на рис. 13 показана крива залежності діючого значення струму статора I_{ef} від частоти f_s за умов $\gamma = 0,5$ і $M_{av} = 0$. Очевидно, що в ідеальному випадку синусоїдального живлення діюче значення струму статора двигуна практично дорівнювало б нулю. Однак у нашому випадку (рис. 13), в області частот, близьких до 20 кГц , ми спостерігаємо вплив дискретної комутації транзисторів інвертора напруги та пульсацій ЕРС статора. А в міру зменшення значення частоти f_s джерела живлення величина діючого значення струму

збільшується внаслідок зростання розмаху пульсацій струму у ланці постійного струму.

У цій статті розглядається також режим обмеження моменту двигуна в замкненій системі з однопозиційним релейним регулятором струму в ланці постійного струму інвертора напруги подібно до того, як це описано в [8], але тільки з формувачем фіксованої безструмової паузи [12]. У такому разі після досягнення струмом максимального заданого значення релейний регулятор змінює свій стан, а на виході формуваача імпульсів з'являється логічний сигнал фіксованої тривалості, який вимикає нижню групу транзисторів мостового інвертора. У результаті протягом цього часу струм в обмотці двигуна

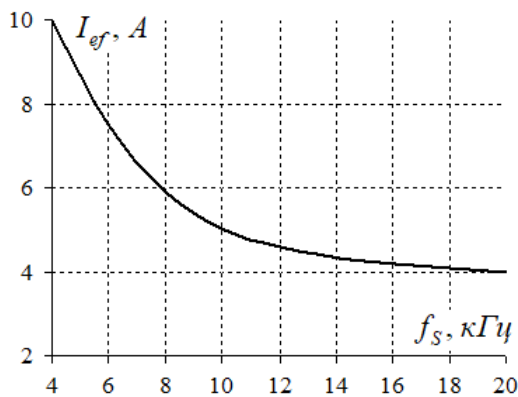


Рис. 13. Залежність діючого значення струму статора I_{ef} від частоти імпульсів f_s напруги живлення за умов $\gamma = 0,5$ і $M_{av} = 0$

зменшується та потім знову починає збільшуватися. І такий процес обмеження струму продовжується періодично. Таким чином, контролюється тільки максимальний заданий рівень струму у ланці постійного струму, після досягнення якого струм починає спадати протягом заданого часу T_{off} . Така структура системи обмеження струму двигуна проста та підходить для тих випадків, коли не потрібна висока точність обмеження моменту та використовується не для реалізації основного режиму роботи, а лише для захисту двигуна від перевантаження.

На рис. 14 показано графіки механічних характеристик двигуна $n(M_{av})$ при шпаруватості $\gamma = 1$ та трьох заданих значеннях максимального струму обмеження – 20, 40 та 80 Ампер. Безперервними та пунктирними лініями зображені відповідно механічні характеристики при тривалості часу відключення транзисторів $T_{off} = 4 \cdot 10^{-5}$ і $2 \cdot 10^{-5}$ секунд.

Для оцінки зміни величини діючого значення струму статора на рис. 15 показано залежності відносного показника k_{m3} від середньої величини моменту двигуна, при цьому запропонований показник визначається за формулою $k_{m3} = I_{ef} / M_{av}$. На рисунку видно, що усі криві цих залежностей практично зливаються, а на ділянках обмеження моменту ця величина відносно стабільна.

При порівнянні основного режиму живлення електроприводу імпульсною напругою та режиму обмеження моменту та струму можна відзначити, що в першому випадку струм у ланці постійного струму інвертора напруги протікає безперервно, а при вимиканні нижньої групи транзисторів при обмеженні моменту струм замикається в колі, що утворюється зі статорних обмоток та транзисторів інвертора напруги, проте в ланку постійного струму він не потрапляє. Останньою обставиною пояснюється вибір однопозиційного релейного регулятора для контролю тільки максимального рівня струму в ланці постійного струму. При цьому нахил моментних ділянок механічних характеристик (рис. 14) може бути відкоригований шляхом відповідного впливу на максимальний рівень струму обмеження.

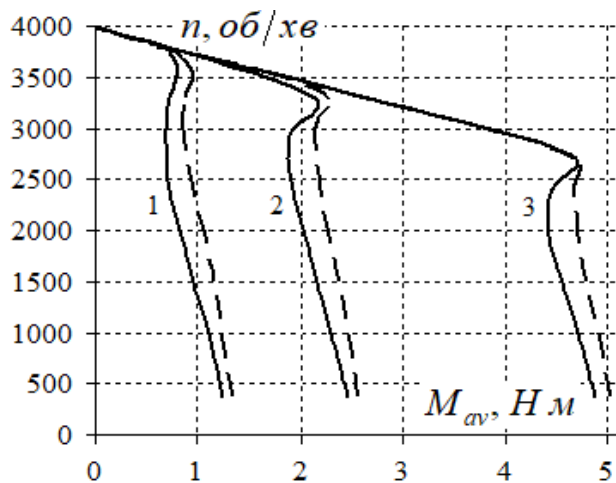


Рис. 14. Механічні характеристики $n(M_{av})$ при трьох заданих значеннях максимального струму обмеження – 20 (1), 40 (2) та 80 (3) А

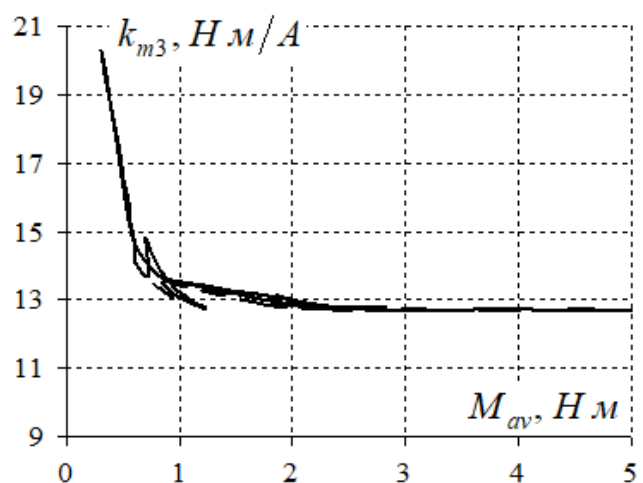


Рис. 15. Залежність відносного показника $k_{m3} = I_{ef} / M_{av}$ від середньої величини моменту M_{av}

На рис. 16 а і б представлено залежності частоти f_R перемикання релейного регулятора від швидкості обертання n валу двигуна відповідно до шести характеристик (рис. 14), причому рис. 16 а відповідає характеристикам, розрахованим при $T_{off} = 4 \cdot 10^{-5}$ с, а рис. 16 б – при $T_{off} = 2 \cdot 10^{-5}$ с. Природно, що чим більше струм обмеження, тим менше частота f_R . Характеристики на малюнках, які розташовані вище, відповідають моментним механічним характеристикам з меншими значеннями струму обмеження. А те, що ці характеристики в зоні

великих значень швидкості обертання n перериваються, означає, що режим обмеження струму припиняється.

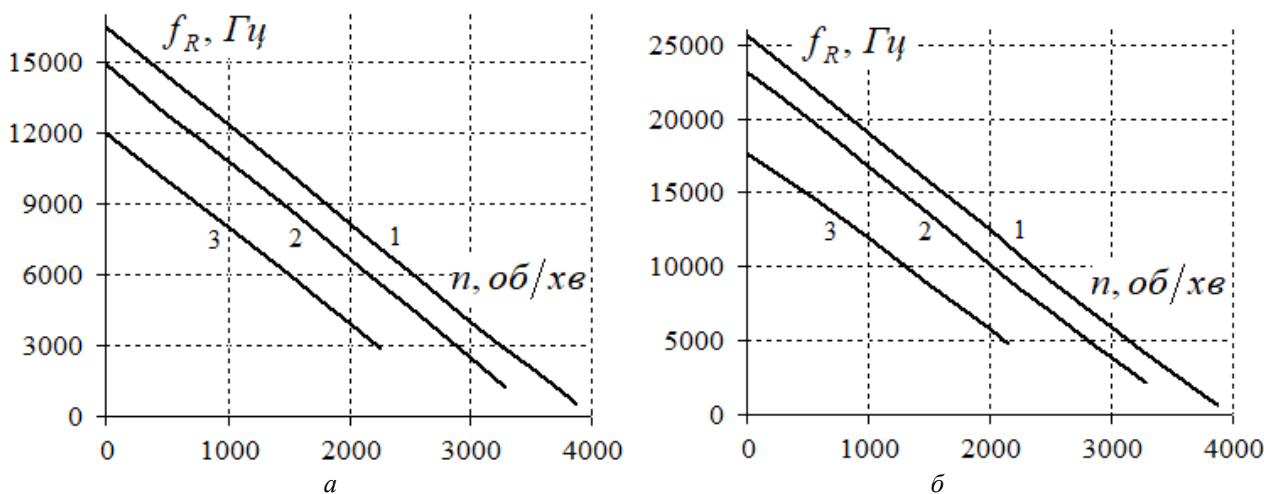


Рис. 16. Залежності частоти f_R перемикання релейного регулятора від частоти обертання n валу двигуна відповідно до характеристик (рис. 14, 20 (1), 40 (2) та 80 (3) А) при тривалості часу відключення транзисторів T_{off} : $4 \cdot 10^{-5}$ (а) і $2 \cdot 10^{-5}$ (б) с

Висновки. У статті досліджено характеристики електроприводу на основі БДПМ як безконтактного функціонального та конструктивного аналога колекторного двигуна постійного струму, призначеного для його заміни та використання як виконавчого елемента в автоматизованих електромеханічних системах без зміни загальної структури їх схеми живлення та управління. У такому випадку на вхід безконтактного електроприводу по двох вхідних провідниках подається імпульсна напруга джерела живлення з регульованою шпаруватістю, яке після випрямлення надходить на вхід трифазного мостового інвертора напруги з БДПМ на виході. При цьому реверс двигуна відбувається за зміни полярності імпульсів напруги живлення. Оскільки на вхід схеми електроприводу подаються прямокутні імпульси напруги, в пропонуваній схемі відсутні будь-які накопичувачі електричної енергії у вигляді конденсаторів, а згладжування статорних струмів відбувається тільки за рахунок індуктивного характеру статорних обмоток безконтактного двигуна.

Характеристики аналізованого електроприводу подібні до характеристик БДПМ в традиційній схемі при його живленні від інвертора напруги зі згладжуючим конденсатором у ланці постійного струму, проте в нашому випадку ми не можемо впливати на форму струму двигуна шляхом вибору будь-якого алгоритму комутації транзисторів. У порівнянні з випадком керування колекторним двигуном постійного струму ми маємо значно менше значення електромагнітної сталої часу статорної обмотки. Тому в розглянутому варіанті живлення та управління ПМБД спостерігаються відносно великі значення пульсацій струму, які можуть бути зменшені тільки шляхом збільшення частоти слідування імпульсів напруги джерела живлення або введення в трифазне коло статора додаткових згладжуючих дроселів, що призвело б, природно, до збільшення масо-габаритних показників електроприводу.

Захист БДПМ від перевантаження та перевищення струму статора вище допустимої величини в аналізованому електроприводі може бути здійснений шляхом реалізації системи обмеження струму з релейним однопозиційним регулятором і формувачем сигналу, який протягом заданого інтервалу часу відключає нижню групу транзисторів інвертора напруги.

У цілому проведені дослідження підтвердили можливість реалізації безконтактного функціонального та конструктивного аналога колекторного двигуна постійного струму на основі електроприводу з БДПМ при його зовнішньому живленні імпульсною напругою з регульованою шпаруватістю.

Фінансується за держбюджетною темою «Розробити наукові засади та принципи побудови керованих н-степеневих магнітоелектричних систем з екстремальними характеристиками» (шифр «МЕХАТРОН»), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ 11.07.2023 р. (Протокол №8). Державний реєстраційний номер роботи 0124U000396. КПКВК 6541030.

1. Справочник по электрическим машинам: в 2 т. Т.2 / под общ. ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. Москва: Энерготомиздат, 1989. 688 с.
2. Лазарев Г.В., Лановой Г.В., Санченко А.В. и др. Электрические машины постоянного тока для электропривода специального назначения. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2002. № 1. С. 40–42.
3. Антонов А.Е. Электрические машины магнитоэлектрического типа. Киев: Институт электродинамики НАН Украины, 2011. 216 с.
4. Башинский В.Г., Шаповалов О.Л., Денисов А.И., Бурсала Е.А., Бурсала А.Л. Влияние пульсаций бесколлекторного двигателя постоянного тока на процесс управления запуском газотурбинного двигателя вертолета. *Технічна електродинаміка*. 2020. С. 56–66. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.02.056>
5. C. S. Raju, S. Samanta Modelling and design of average current filtered BLDC motor drive. 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Jaipur, India, 2020, Pp. 1–6, DOI: <https://doi.org/10.1109/PEDES49360.2020.9379592>
6. Акинін К.П., Баранніков О.В. Спосіб керування безконтактним двигуном: Пат. на винахід 98265 Україна. МПК H02P 6/00; 21.04.2011.
7. Акинін К.П., Баранніков О.В. Пристрій керування безконтактним двигуном: Пат. на винахід 104079 Україна. МПК H02P 6/00; 30.08.2012.
8. Акинин К.П. Структурная минимизация электроприводов малой мощности на основе бесконтактных двигателей с постоянными магнитами. Киев: «Про Формат», 2020. 392 с.
9. Bose B.K. Modern Power Electronics and AC Drives. New York: Prentice Hall, 2002, 710 p.
10. Силовые полупроводниковые приборы / пер. с англ., под. ред. В.В. Токарева. Воронеж: Элист, 1995. 662 с.
11. Tomofumi Hirose Rectifier Circuit Using FET Bridge Circuit, and method of Controlling the Same: Patent JP 2012085369 A; 26.04.2012.
12. Акинин К.П., Исаков В.Н., Бондарь Е.С. Особенности построения преобразователя частоты для управления асинхронным двигателем компрессора авторефрижератора. Регулируемые асинхронные двигатели: Сб. науч. тр. Киев. Изд-во Ин-та электродинамики НАН Украины, 1997. С. 171–175.

ELECTROMECHANICAL CHARACTERISTICS OF A BRUSHLESS PERMANENT MAGNETS MOTOR WHEN PULSE-WIDTH SUPPLY

K.P. Akinin, V.G. Kireyev, I.S. Petukhov, A.A. Filomenko

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Beresteyskyi Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine

The paper is devoted to the study of the characteristics and operating modes of a brushless permanent magnet motor in the structure of an electric drive with a two-wire external power supply from a voltage source with pulse-width regulation. The dependences of the motor rotation frequency, the stator current effective value and the average value of the current in the DC link of the voltage inverter, as well as the dependences of the torque coefficient on the average value of the motor torque are given. The influence of the frequency of the pulse supply voltage on the operating modes of the motor is studied. The current and torque limitation modes of the motor in a system with a single-position relay controller and a fixed transistor shutdown interval former are studied. Ref. 12, fig. 16.

Key words: brushless motor with permanent magnets, bridge voltage inverter, pulse-width regulation, electromechanical characteristics.

1. Handbook of electrical machines: in 2 volumes. Vol. 2. Moscow: Energatomizdat, 1989. 688 p.
2. Lazarev G.V., Lanovoy G.V., Sanchenko A.V. DC electric machines for special-purpose electric drives. Electrical Engineering and Electromechanics. 2002. No. 1. Pp. 40–42.
3. Antonov A.E. Magnetolectric electric machines. Kyiv: Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2011. 216 p.
4. Bashinsky V.G., Shapovalov O.L., Denisov A.I., Bursala E.A., Bursala A.L. The influence of pulsations of a brushless DC motor on the process of controlling the launch of a helicopter gas turbine engine. *Технічна електродинаміка*. 2020. Pp. 56–66. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.02.056>

5. C. S. Raju, S. Samanta Modelling and design of average current filtered BLDC motor drive. 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Jaipur, India, 2020, pp. 1-6, DOI: <https://doi.org/10.1109/PEDES49360.2020.9379592>
6. Akinin K.P., Barannikov O.V. Method for controlling a brushless motor: Patent Ukraine 98265. MPK N02R 6/00; 04.21.2011.
7. Akinin K.P., Barannikov O.V. Device with brushless motor: Patent Ukraine 104079. MPK N02R 6/00; 08.30.2012.
8. Akinin K.P. Structural minimization of low-power electric drives based on brushless permanent magnet motors. Kyiv: "Pro Format", 2020. 392 p.
9. Bose B.K. Modern Power Electronics and AC Drives. New York: Prentice Hall, 2002, 710 p.
10. Power Semiconductor Devices. Voronezh: Elista, 1995. 662 p.
11. Tomofumi Hirose Rectifier Circuit Using FET Bridge Circuit, and method of Controlling the Same: Patent JP 2012085369 A; 26.04.2012.
12. Akinin K.P., Isakov V.N., Bondar E.S. Features of Designing a Frequency Converter for Controlling an Asynchronous Motor of a Refrigerator Compressor. Adjustable Asynchronous Motors: Coll. of Scientific Works. Kyiv. Publishing House of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 1997. Pp. 171–175.

Надійшла: 14.11.2024

Прийнята: 25.11.2024

Submitted: 14.11.2024

Accepted: 25.11.2024