

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ТА АПАРАТИ

УДК 621.313; 62Ф83

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.54.037>

ЕЛЕКТРОПРИВОДИ З КОМПЕНСОВАНИМИ РЕАКТИВНИМИ МОМЕНТАМИ

О.Є. Антонов, докт. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: aoc@ied.org.ua

Узагальнено результати досліджень зі створення принципів побудови електроприводних систем з компенсованими реакціями різних типів – реактивним моментом у приводі обертального типу, реактивним знакозмінним моментом у приводі зворотно-обертального типу та гіроскопічною реакцією в швидкообертovому приводі зі значним кінетичним моментом рухомої частини. Всі системи компенсації реакцій побудовано за типом активної протидії виникаючим реактивним моментам на основі електромеханічних перетворювачів магнітоелектричного типу, створених в ІЕД НАН України. Показано також підходи до побудови систем керування пристроями, що створюють компенсуючі моменти. Бібл. 10, рис. 11.

Ключові слова: реактивний момент, гіроскопічна реакція, активна компенсація реакції.

У будь-якому приводному механізмі незалежно від принципу його дії виникають механічні реакції, спрямовані протилежно тим силам і моментам, які створює привод для виконання корисної роботи. Дія реактивних сил і моментів для деяких пристроїв і систем є небажаною через їх негативний вплив на об'єкт, в якому встановлено приводний двигун, і тому необхідно вжити заходів щодо їх нейтралізації.

Суть розроблених методів компенсації реакцій в електроприводі [1] полягає у створенні регульованих зусиль і моментів, які спрямовані протилежно реактивним моментам, що прикладаються до корпусу, в якому встановлено основний приводний двигун пристрою. Таку компенсацію слід вважати активною, оскільки пристроєм для її реалізації є додатковий (компенсуючий) електропривод, що виконує функцію нейтралізатора реакції. Проблема побудови такого компенсуючого привода пов'язана з вирішенням двох пов'язаних між собою завдань – створення виконавчих електромеханічних пристроїв, оптимізованих за масогабаритними показниками і енергоспоживанням, та системи керування, яка ефективно функціонувала б в умовах змінних швидкостей обертання і навантажень основного привода. Водночас на систему керування компенсуючим електроприводом покладаються додаткові функції вимірювання координат основного приводного двигуна та формування із заданою точністю координат компенсуючого ротора.

Керовані швидкообертovі та моментні електроприводи можуть бути побудовані на основі двигунів різних типів. Проте безконтактні магнітоелектричні двигуни (БМД), у яких застосовано сучасні висококоерцитивні магнітотверді композиції типу NdFeB [2], мають найкращі показники з габаритної потужності та ККД у порівнянні з електромеханічними перетворювачами інших типів [3, 4]. Такі двигуни і було застосовано під час проведення досліджень.

У роботі розглянуто реакції, дія яких має найбільш негативні наслідки для деяких важливих областей застосування електропривода.

Гіроскопічна реакція. Суть явища гіроскопічної реакції, яка наочно проявляється в електроприводі ручних різальних інструментів зі швидкооберттовим масивним ротором, полягає в тому, що в разі зміни кутового положення такого пристрою виникає відчутний гіроскопічний момент, вектор якого не співпадає з вектором кутової швидкості бажаного повороту пристрою. Під впливом гіроскопічного моменту інструмент рухається за траєкторією, несподіваною для оператора, який працює з ним, що і призводить іноді до тяжких травм через зіткнення інструмента і тіла людини. Аналіз стану проблеми показав, що підвищення безпеки і зручності роботи з ручним швидкооберттовим технологічним інструментом пов'язане з компенсацією дії виникаючого гіроскопічного моменту.

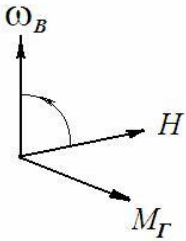


Рис. 1

Гіроскопічний момент є моментом сил Коріоліса, який виникає за зміни просторового положення вектора кінетичного моменту ротора двигуна, що обертається. Розмір гіроскопічного моменту визначається кінетичним моментом ротора H і зовнішньою кутовою швидкістю повороту корпусу ω_B : $M_G = H \cdot \omega_B$, а його вектор орієнтований ортогонально площині, в якій розташовано вектори H і ω_B , причому орієнтований він так, щоб сумістити вектор кінетичного моменту \vec{H} з вектором зовнішньої кутової швидкості $\vec{\omega}_B$ (рис. 1), тобто викликати прецесію ротора [5]. У результаті різкого прикладання моменту до корпусу приладу він несподівано повертається, іноді так енергійно, що буває важко утримати інструмент у руках.

Прецесійний рух ротора приводного двигуна – не єдина особливість швидкооберттового електроінструменту. Інстинктивно, намагаючись зупинити прецесійний рух, оператор прикладає протидіючий момент і тим самим змінює напрям прецесії ротора, який через гіроскопічні властивості починає рухатися в ортогональній площині. У результаті таких дій виникають коливання ротора разом з корпусом інструмента навколо двох екваторіальних (поперечних) осей із затухаючою амплітудою. У нашому випадку розсіювання енергії руху відбувається завдяки мускульній силі рук оператора.

Якщо екваторіальні моменти інерції пристрою прийняти як однакові, то відповідно до теорії гіроскопічних систем [6] амплітуда λ затухаючих нутаційних коливань визначається так:

$$\lambda = \frac{M}{H} e^{-Gt/(J_{\Sigma}^{\partial})} \left(f^2 + \left(G/J_{\Sigma}^{\partial} \right)^2 \right)^{-1/2}, \quad (1)$$

де M – момент обертання, що прикладається; $J_{\Sigma}^{\partial} = J_P^{\partial} + J_K^{\partial}$; G – коефіцієнт демпфірування або питомий момент в'язкого тертя.

З виразу (1) випливає, що амплітуда цих коливань затухає тим ефективніше, чим вище коефіцієнт демпфірування G , визначення якого в цьому випадку є найбільш складним завданням, зважаючи на відсутність довідкових даних і методичних рекомендацій для його розрахунку. Цю величину встановлено дослідним шляхом при прикладанні фіксованого зовнішнього моменту і вимірюванні часу, за який прилад, що утримується в руках, припинить коливальні рухи.

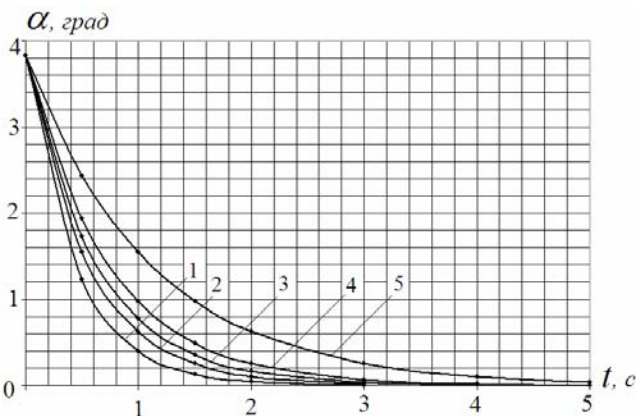


Рис. 2

Для вимірювань було застосовано різальний інструмент з електроприводом, кінетичний момент ротора якого складав $1,814 \text{ кг}\cdot\text{м}^2/\text{с}$ за частоти обертання 2407 1/с (23000 об/хв). У результаті досліджень виявилось, що коефіцієнт в'язкого тертя, який реалізується силою рук дорослої людини залежно від фізичних даних, лежить у діапазоні $0,02 \dots 0,05 \text{ кг}\cdot\text{м}^2/\text{с}$.

Характер загасання коливань такого електромеханічного пристрою за різних значень G показано на рис. 2: крива 1 – $G=0,05$; 2 – $G=0,04$; 3 – $G=0,035$; 4 – $G=0,03$; 5 – $G=0,02$.

Компенсація гіроскопічної реакції. Компенсація була досягнута шляхом установки в тому ж корпусі компенсуючого ротора, кінетичний момент якого такий, як і в основному приводі, але орієнтований протилежно. У результаті сумарна дія гіроскопічних моментів на корпус інструмента стає нульовою.

Потужність компенсуючого ротора має бути достатньою лише для подолання сил опору власному обертанню, тобто менше потужності основного приводу приблизно на два порядки. Тому загальний ККД усієї електромеханічної системи знижується відносно ККД основного силового приводу незначно.

Завдяки тому, що кінетичний момент ротора визначається як полярним моментом інерції ротора, так і частотою його обертання, стає можливим мінімізувати масу і габарити компенсуючого ротора, збільшивши частоту його обертання. Привод компенсуючого ротора має бути регульованим, оскільки в разі зміни навантаження на основний ротор і зміни частоти його обертання виникне потреба у відповідному підстроюванні частоти обертання компенсуючого ротора.

Щоб вибрати оптимальні співвідношення між швидкістю обертання, обсягом і масою ротора-компенсатора було проведено дослідження, для якого як базовий електропривод був прийнятий спеціально створений для ручного електроінструменту магнітоелектричний двигун потужністю 2 кВт, ротор якого за частоти обертання $\omega=2407$ 1/с (23000 об/хв) і зовнішнього діаметру $D=74$ мм має кінетичний момент $1,814$ кг·м²/с.

Варіюючи частотою обертання компенсуючого ротора з одночасною зміною його геометрії так, щоб його кінетичний момент дорівнював кінетичному моменту основного ротора, було визначено параметри компенсуючого електропривода, які є компромісними між допустимою частотою обертання, масою і габаритами: частота обертання – 4453 1/с; габарити – $\emptyset 74 \times \emptyset 25 \times 18$ (мм); маса – 0,56 кг; корисна потужність приводу – 35 Вт.

На підставі проведених досліджень сформульовано загальні рекомендації щодо процедури вибору параметрів компенсуючого ротора для компенсації гіроскопічного моменту у високообертovому електроприводі:

1. За оптимальну частоту обертання ротора-компенсатора слід вважати частоту, передуючу початку переходу ламінарного режиму обтікання ротора в турбулентний, яка в цьому випадку відповідає величині $1,85 \omega$.

2. Розрахунковим шляхом визначається залежність зміни осьової довжини компенсуючого ротора від частоти його обертання в разі виконання умови рівності моментів інерції робочого і компенсуючого роторів та рівності діаметрів основного і компенсуючого роторів. Орієнтовно встановлюється також діаметр внутрішньої порожнини ротора для розміщення в ній елементів приводного двигуна.

3. Будеться залежність аеродинамічних втрат для всіх варіацій довжини ротора, з неї вибирають ту максимальну частоту обертання, для якої характер обтікання ротора повітрям залишається ламінарним.

4. За величиною втрат, відповідних до обраної частоти обертання, визначають потужність приводу і проводять його проектування. Якщо спочатку заданий обсяг внутрішньої порожнини ротора не відповідає обсягу, необхідному для розміщення приводного двигуна, конфігурація ротора уточнюється.

У ході виконання досліджень встановлено також, що під час дії гіроскопічного моменту значно зростає навантаження на підшипники як основного, так і компенсуючого роторів через те, що гіроскопічний момент впливає на корпус пристрою через точки зіткнення кульок і доріжок підшипників. Сила, що затискає кульки між обіймами підшипника, зростає, зростають і втрати енергії на подолання сил опору обертанню. Так, у парі підшипників створеного компенсуючого ротора втрати зросли з 11,4 до 48,54 Вт. Тобто врахування цього явища є обов'язковим.

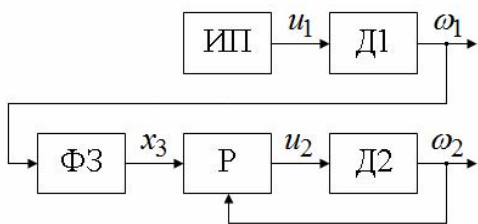


Рис. 3

Керування кінетичним моментом компенсуючого ротора. Загальна структурна схема електромеханічної системи основного і компенсуючого приводів показана на рис. 3, де ИП – некерване джерело живлення основного виконавчого двигуна; ФЗ – формувач задання кутової швидкості системи керування компенсуючим двигуном; x_3 – сигнал задання кутової швидкості компенсатора; Р – регулятор; Д1, Д2 – основний і компенсуючий двигуни; $u_1, u_2, \omega_1, \omega_2$ – напруги живлення та кутові швидкості двигунів.

У процесі розробки математичної моделі системи керування врахуємо деякі особливості й допущення:

- знехтуємо електромагнітними постійними часу обмоток через їх незначний розмір;
- нульове значення кута між ЕРС і струмом статора утримується завжди;
- струм статора основного двигуна обмежимо, щоб уникнути його перевантаження;
- систему регулювання кутової швидкості побудуємо на основі ПІ-регулятора через нежорсткість вимог до точності виконання завдання компенсації;
- механічні частини моделей двигунів є структурно ідентичними.

Рух ротора основного двигуна описується рівнянням

$$J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M_1 - M_{C11} - M_{C12},$$

де M_1 – електромагнітний момент, що розвивається основним двигуном; M_{C11} – момент механічного навантаження холостого ходу; M_{C12} – корисне механічне навантаження на валу основного двигуна.

Момент механічного навантаження холостого ходу запишемо у вигляді

$$M_{C1} = M_{11} + M_{12} \omega_{01}^{1,5} + M_{13} \omega_{01}^2,$$

де $\omega_{01} = \omega_1 / \omega_{H1}$ – відносна кутова швидкість основного двигуна; ω_{n1} – номінальна величина кутової швидкості; M_{11} – постійна складова моменту опору підшипників; M_{12}, M_{13} – значення моментів опору через аеродинамічні втрати і втрати на вихрові струми в міді за номінальної величини кутової швидкості ω_{n1} основного двигуна.

Зміну корисного механічного навантаження на валу основного двигуна змодельовано

так: $M_{C13} = M_H (0,5 + 0,5 \omega_{01})$; $T_{F1} \frac{dM_{C12}}{dt} = M_{C13} - M_{C12}$, де M_H – номінальна величина моменту корисного механічного навантаження на валу основного двигуна; T_{F1} – постійна часу, що визначає інерційність процесу корисного навантаження.

Струм статора і момент двигуна запишемо у вигляді

$$L_1 \frac{di_1}{dt} = u_1 - k_{m1} \omega_1 - R_1 i_1; \quad M_1 = 1,5 k_{m1} i_1,$$

де i_1 – струм обмотки статора основного двигуна; L_1, R_1 – активний опір та індуктивність обмотки; k_{m1} – коефіцієнт крутизни моменту.

Математична модель компенсуючого електропривода така сама, як модель основного, оскільки двигун компенсуючого привода структурно подібний до основного двигуна:

$$J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = M_2 - M_{C2}; \quad M_{C2} = M_{21} + M_{22} \omega_{02}^{1,5} + M_{23} \omega_{02}^2;$$

$$\omega_{02} = \frac{\omega_2}{\omega_{H2}}; \quad i_2 = \frac{u_2 - k_{m2} \omega_2}{R_2}; \quad M_2 = 1,5 k_{m2} i_2,$$

де індексом «2» позначено параметри, що належать до компенсуючого двигуна.

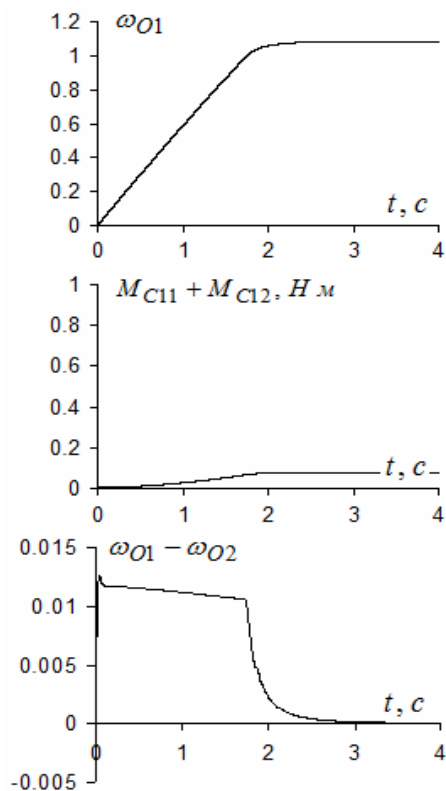


Рис. 4

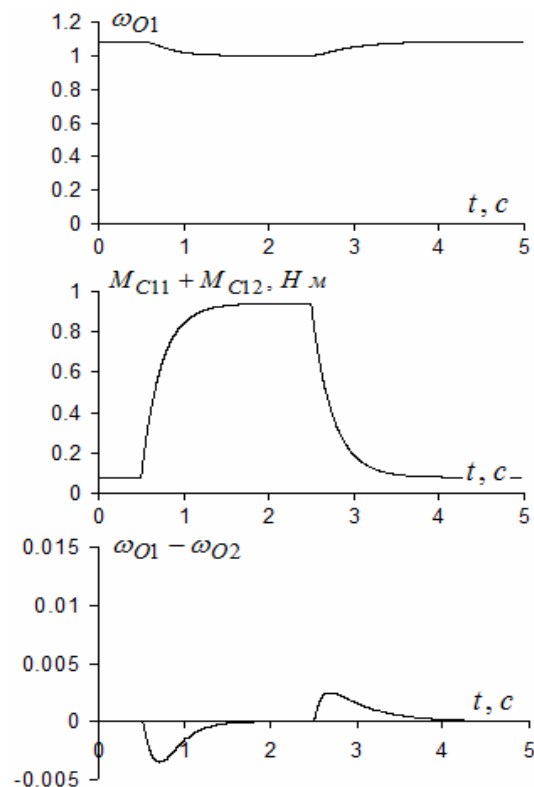


Рис. 5

Величина задання x_3 на вході слідкувальної системи компенсатора формується на основі значення кутової швидкості основного двигуна відповідно до пропорції моментів інерції

$$x_3 = \frac{J_1}{\omega_{H2} J_2}.$$

На рис. 4, 5 показано графіки перехідних процесів відносної кутової швидкості ω_{O1} , моменту опору $M_{C11} + M_{C12}$ основного двигуна і різниці $\omega_{O1} - \omega_{O2}$ відносних кутових швидкостей основного і компенсуючого двигунів у режимі їх пуску, а також стрибкоподібної зміни механічного навантаження на валу основного двигуна.

На рис. 6 показано графік перехідного процесу кутової швидкості ω_3 руху корпусу інструмента, розрахований за одиничної величини зовнішнього моменту $M_{Bн}$.

Отже, одноконтурна система регулювання кутової швидкості із застосуванням ПІ-регулятора обрана вірно, оскільки вона забезпечує задовільну компенсацію гіроскопічної реакції. Зазначимо, що в разі раціонального вибору параметрів компенсуючого двигуна зростання енергоспоживання системи складає всього 4–5%.

Реактивний момент односпрямованого обертання. У цьому випадку реактивний момент має постійний напрям. Він прикладається до опори, на якій встановлено приводний двигун, і прагне розвернути її в напрямі, протилежному обертанню ротора. Якщо приводний двигун встановлено на об'єкті з кінцевим розміром маси, реактивний момент викликає несанкціоноване обертання такого об'єкта. Зокрема, у разі розташування привода на космічному апараті реактивний момент спричинює його небажане обертання, яке в більшості випадків є неприпустимим.

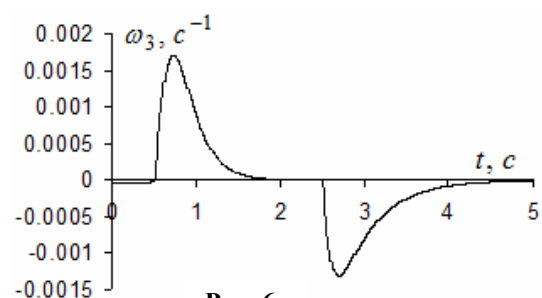


Рис. 6

Хоча на супутнику є система орієнтації, яка підтримує його задане положення [7], проте можливості таких систем, особливо на супутниках мікро- і мінікласів, надто обмежені, тому потрібна компенсація реактивного моменту приводного двигуна.

Компенсуючий момент може здійснити додатковий двигун, розташований співвісно з приводним двигуном, який створює момент обертання протилежного знака. У разі рівності динамічних моментів цих двигунів сумарна дія на об'єкт розташування привода буде відсутня. Хоча очевидно, що треба керувати двигуном компенсації за величиною швидкості обертання супутника. Насправді такий підхід до компенсації є помилковим, оскільки причини, що викликають обертання супутника, можуть бути не пов'язані з реактивним моментом привода обертання. Тому підхід до формування компенсуючого моменту має бути іншим.

Рух частин обох приводів, що обертаються, в загальному вигляді описується рівняннями

$$\begin{aligned} J_1 \frac{d\omega_1}{dt} &= M_{Д1} = M_1 - M_{C1}; \\ J_2 \frac{d\omega_2}{dt} &= M_{Д2} = M_2 - M_{C2}, \end{aligned} \quad (2)$$

де ω_1, ω_2 – кутові швидкості роторів основного і компенсуючих двигунів; J_1, J_2 – осьові моменти інерції основного і компенсуючого роторів з інерційним навантаженням; $M_{Д1}, M_{Д2}$ – динамічні моменти основного і компенсуючого двигунів; M_1, M_2 – електромагнітні моменти, що розвиваються основним і компенсуючим приводами; M_{C1}, M_{C2} – моменти тертя підшипників основного і компенсуючого приводів. Індекс «1» стосується основного, а індекс «2» – компенсуючого двигунів.

Вважаємо, що розгін і гальмування двигунів здійснюються рівноприскорено, і для виконання цієї умови формують постійний за величиною динамічний момент. Тоді кутове прискорення матиме постійну величину, а зростання швидкості ротора відбуватиметься за лінійним законом.

З виразу (2) випливає, що компенсація реактивного моменту основного двигуна забезпечується за умови рівності динамічних моментів двигунів. При цьому кутові прискорення частин, що обертаються, мають бути обернено пропорційними відношенню їх моментів інерції

$$J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = J_2 \frac{d\omega_2}{dt}; \quad \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{J_1}{J_2}.$$

Якщо за умови роботи основного привода після досягнення необхідної частоти обертання він переходить у режим стабілізації швидкості, то його кутове прискорення обертається в нуль. Одночасно в режим стабілізації швидкості має перейти і компенсуючий привод. У цьому разі між кутовими швидкостями роторів має підтримуватися співвідношення, коефіцієнтом пропорційності в якому є відношення їх моментів інерції:

$$\omega_2 = \omega_1 \frac{J_1}{J_2}. \quad (3)$$

У виразі (3) моменти інерції частин, які обертаються, є величинами постійними, що визначаються тільки їх геометрією, і вони піддаються розрахунку або безпосередньому вимірюванню з високою точністю [8, 9]. Вимірювання кутової швидкості обертання ротора також є достатньо відомою технічною задачею.

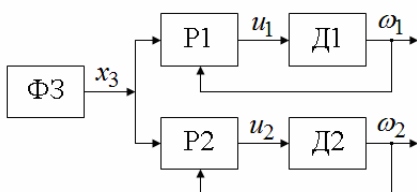


Рис. 7

Загальна структурна схема цього електромеханічного комплексу приводів показана на рис. 7, де ФЗ – формувач задання кутової швидкості за умови лінійної залежності її зміни в процесі пуску і гальмування; x_3 – сигнал задання; P1, P2 – перший і другий регулятори; Д1, Д2 – основний і компенсуючий двигуни.

Оскільки жорсткі вимоги до тривалості пуску і гальмування двигунів за умови відносних невеликих значень

механічного навантаження не висуваються, системи регулювання кутової швидкості можуть бути реалізовані на основі ПП-регуляторів.

На рис. 8 показано графіки перехідних процесів відносної кутової швидкості ω_1^* і динамічного моменту $M_{Д1}$ основного двигуна, а також різниці динамічних моментів $M_{Д1} - M_{Д2}$ і кутового відхилення α_3 супутника, у разі заданої тривалості пуску і гальмування двигунів $T_{II} = 10$ с.

Наведені графіки демонструють ефект стабілізації кутового відхилення α_3 супутника з високою точністю. Кидок кутового відхилення на початку пуску двигунів відбувається через різницю у величинах моментів опору підшипників і вплив моменту сухого тертя, що показано на рис. 9, де цифрами 1, 2 і 3 позначено графіки перехідних процесів відповідно до моменту M_1 і динамічного моменту $M_{Д1}$ основного двигуна, а також різницю між динамічними моментами ($M_{Д1} - M_{Д2}$).

Таким чином, підтримка вказаної різниці моментів на практично нульовому рівні протягом усієї роботи двигунів є умовою стабілізації кутового відхилення α_3 супутника.

Реактивний момент зворотно-обертального руху. Компенсація знакозмінного реактивного моменту.

У приводах зворотно-обертального руху реакція проявляється у вигляді вібраційної дії на нерухомому опорі. Якщо такий привод працює у складі ручних технологічних оброблювальних інструментів, вібрація діє безпосередньо на руки фахівця, який працює з інструментом, що є дуже шкідливим у разі тривалої роботи з ним. Аналіз технічних рішень, пропонованих розробниками і виробниками ручного інструмента, вказує на недостатню ефективність існуючих методів зниження ступеня дії вібрації [10] і необхідність створення більш досконалих засобів захисту.

Для створення системи, що компенсує реактивний момент у такому приводі, створено структуру (рис. 10), в якій: 1, 2 – намагнічені ротори; 3, 4 – магніти, що створюють пружні зв'язки між роторами і статором; 5, 6 – вали, на яких встановлені магніти роторів; 7, 8 – обмотки управління; 9, 10 – концентричні одна одній насадки; 11 – магнітопровід статора. Орієнтація осей намагнічування магнітів 3 і 4 взаємно протилежна, завдяки чому магніти роторів, обертаючись в підшипниках під дією сил взаємного магнітного тяжіння, автоматично встановлюються так, що загальний напрям потоку магнітної індукції всіх магнітів є односпрямованим. Компенсація реакції здійснюється завдяки тому, що моменти, які діють на маг-

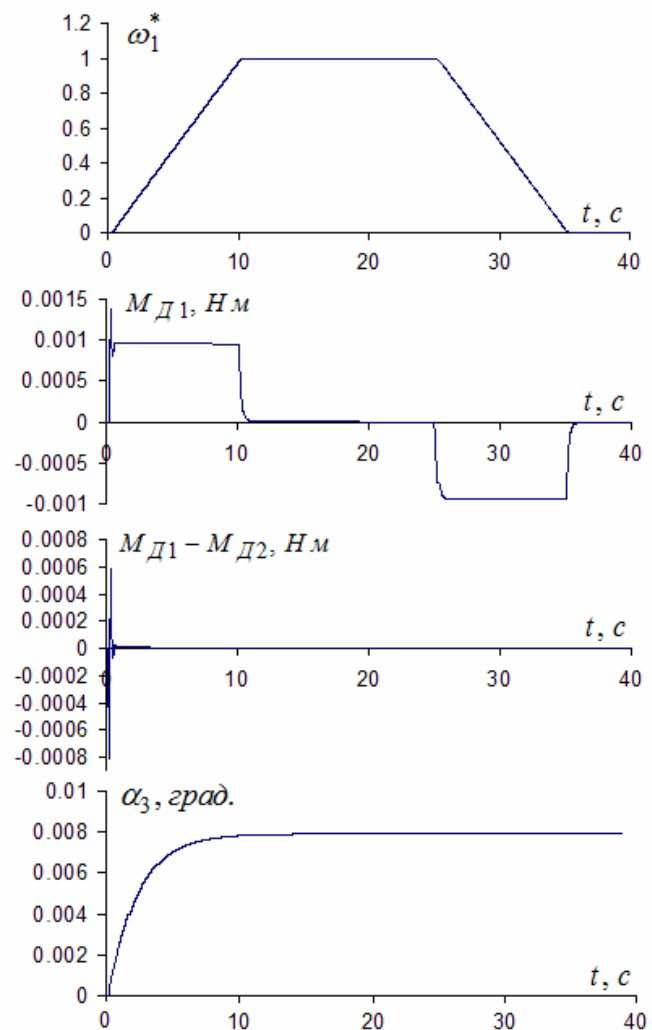


Рис. 8

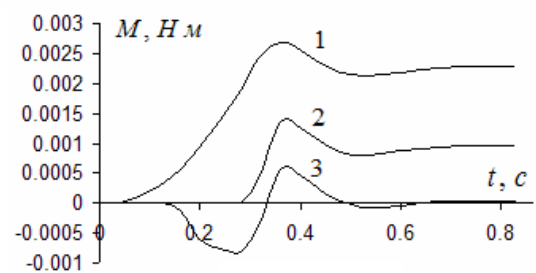


Рис. 9

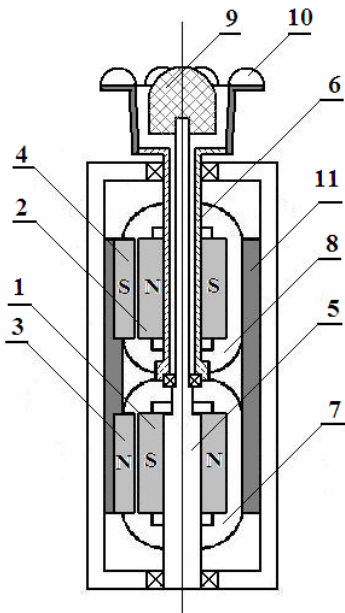


Рис. 10

ніти 1 і 2, є протилежними. Але компенсація здійснюється автоматично тільки за повної ідентичності постійних магнітів роторів, що практично неможливо. Взаємні положення роторів і обмотки в загальному випадку також можуть бути неоднаковими через технологічні допуски на форми та розташування обмотки і магнітів. Тому необхідне регулювання руху обох роторів, критерієм ефективності якого буде невідчутність коливань корпусу приладу.

Рух корпусу пристрою під впливом реактивних моментів описується системою рівнянь

$$J_K \frac{d\omega_K}{dt} = M_1 - M_2 - m_{зov}; \quad \frac{d\alpha_K}{dt} = \omega_K,$$

де J_K, ω_K, α_K – осьовий момент інерції, кутова швидкість і кут повороту корпусу навколо осі обертання роторів; M_1, M_2 – знакозмінні динамічні моменти основного і компенсуючого приводів; $m_{зov} = \nu \cdot \omega_K + C_K \cdot \alpha_K$ – зовнішні моменти в'язкого тертя і пружності, що прикладаються до корпусу рукою людини.

Умовою компенсації є не тільки рівність електромагнітних моментів, що створюються, а й рівність жорсткостей магнітних пружин, тобто:

$$-\Psi_{X1} \cdot i_{X1} \cos \gamma_1 + G_{Z1} \cdot F_{P1} \cdot F_{C1} \sin \gamma_1 + \Psi_{X2} \cdot i_{X2} \cos \gamma_2 - G_{Z2} \cdot F_{P2} \cdot F_{C2} \sin \gamma_2 = 0,$$

де Ψ_{X1}, Ψ_{X2} – потокозчеплення магнітів ротора з відповідними обмотками; G_{Z1}, G_{Z2} – взаємні провідності магнітів роторів і статора; F_P, F_C – МРС магнітів ротора і статора відповідно; індекси 1 і 2 стосуються основного та компенсуючого приводів відповідно.

Для реалізації керованої компенсації реакції побудована система векторного керування компенсуючим ротором, яка реалізує регулювання амплітуди і фазового зсуву вхідного струму статора компенсуючої системи.

На рис. 11 наведено для прикладу графіки перехідних процесів у системі з компенсованою реак-

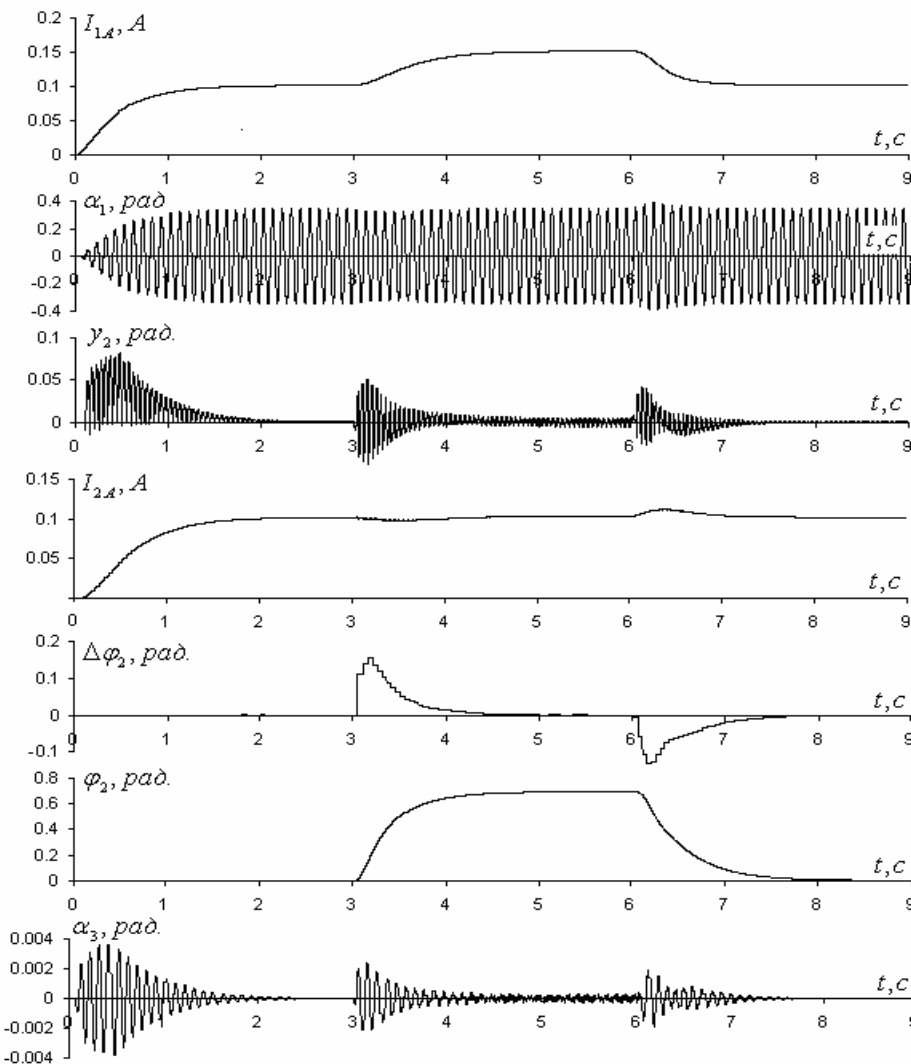


Рис. 11

цією за частоти коливань 10 Гц. На ньому зображено зверху вниз:

- амплітуду I_{1A} струму основної обмотки статора;
- кут повороту α_1 основного ротора;
- сигнал розузгодження u_2 за амплітудою струму компенсуючої обмотки;
- амплітуду I_{2A} струму обмотки статора компенсатора;
- сигнал розузгодження за фазовим зрушенням $\Delta\varphi_2$;
- фазовий зсув φ_2 струму статора i_2 компенсуючої системи;
- кут повороту α_3 корпусу.

З рис. 11 видно, що застосування активної компенсації реактивних знакозмінних моментів ефективно вирішує проблему захисту фахівця, який працює з відповідним устаткуванням, від шкідливої дії вібрації. У разі змінної амплітуди і частоти основного привода систему керування компенсацією доцільно будувати на основі векторного керування амплітудою і фазовим зрушенням струму компенсуючої системи.

Висновки. 1. Розроблено принципи активної компенсації реакцій різного походження в електроприводах, суть яких полягає у створенні регульованих зусиль і моментів, які спрямовані протилежно реактивним моментам, що створює основний приводний двигун пристрою.

2. Розроблено принципи побудови систем керування активними компенсаторами розглянутих типів, у тому числі принципи керування напругою живлення датчиків Холла, що дало змогу на порядок і більше знизити енергоспоживання датчиків положення ротора і тим самим підвищити ККД електроприводних систем малої потужності.

3. На основі розроблених принципів компенсації реактивних моментів в електроприводі створено діючі зразки приладів, в яких реалізовано компенсації таких типів: гіроскопічна реакція, реакція моменту обертання та реакції знакозмінного моменту в широкому діапазоні частот. У разі побудови та аналізу роботи цих систем застосовано розроблені принципи побудови систем керування та метод часових гармонік для визначення інтегральних активних втрат потужності.

Всього за темою досліджень опубліковано 18 статей у фахових виданнях, отримано п'ять патентів на винаходи, взято участь у чотирьох конференціях, захищено дві докторські дисертації.

Фінансується за держбюджетною темою «Створити методи активної компенсації реактивних зусиль, моментів та просторових переміщень в електромеханічних системах магнітоелектричного типу та розробити принципи побудови пристроїв на їх основі» (шифр «ІНДЕМ»), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ 15.10.2013 р., протокол № 14. Державний реєстраційний номер роботи 0113U006532.

1. Антонов А.Е., Филоменко А.А. Активная компенсация реактивных моментов в электрических машинах магнитоэлектрического типа. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2014. Вип. 39. С. 20–24.
2. Robert C. O'Handley. *Modern Magnetic Materials: Principles and Applications*. New York: *John Wiley & Sons*, 2000. 768 p.
3. Ледовский А.Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами. Москва: Энергоатомиздат. 1985. С. 76–77.
4. Путников В.В., Путников А.В., Уваров В.Б. Бесконтактные электродвигатели постоянного тока с повышенной наработкой для космических аппаратов. *Электротехника*. 2007. № 2. С. 18–23.
5. Сифф Э., Эмерич К. Введение в гироскопию. Москва: Машиностроение, 1965. 124 с.
6. Климов Д.М., Харламов С.Л. Динамика гироскопа в кардановом подвесе. Москва: *Наука*. 1978. 208 с.
7. О работах в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН по анализу динамики, разработке и реализации систем ориентации малогабаритных спутников. URL: http://keldysh.ru/papers/2006/source/prep2006_05.doc. (дата звернення: 12.12.2018).
8. Гироскопы. Производство и исследование. Москва: *Машиностроение*, 1969. 188 с.
9. Павлов В.А. Основы проектирования и расчета гироскопических приборов. Ленинград: Судостроение, 1967. С. 146–150.
10. Vibration solutions. Practical ways to reduce the risk of hand-arm vibration injury. Published by HSE 01/10.

УДК 621.313.5/8; 62Ф83:621.313.3

ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ СО СКОМПЕНСИРОВАННЫМИ РЕАКТИВНЫМИ МОМЕНТАМИ

А.Е. Антонов, докт. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина

Обобщены результаты исследований по созданию принципов построения электроприводных систем со скомпенсированными реакциями разных типов - реактивным моментом в приводе вращательного типа, реактивным знакопеременным моментом в приводе возвратно-вращательного типа и гироскопической реакцией в высокооборотном приводе с большим кинетическим моментом подвижной части. Все системы компенсации реакций построены по типу активного противодействия возникающим реактивным моментам на основе электромеханических преобразователей магнитоэлектрического типа, созданных в ИЭД НАН Украины. Показаны также подходы к построению систем управления устройствами, которые создают компенсирующие моменты. Библ. 10, рис. 11.

Ключевые слова: реактивный момент, гироскопическая реакция, активная компенсация реакции.

ELECTRIC DRIVES WITH COMPENSATED REACTIVE MOMENT

O. Antonov

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

The article summarizes the results of research on the creation of principles for the electric drive systems with compensated reactions of various types - reactive torque in a rotational drive, reactive alternating torque in a oscillatory drive and gyroscopic reaction in a high-speed drive with a large kinetic moment of the moving part.

All reactions compensation system constructed according to the type of active resistance arising reactive torque based on the magnetolectric type motors which created in IED NAS of Ukraine. Shown are approaches to building control systems for devices that create compensatory moments. References 10, figures 11.

Key words: the reaction torque, the gyroscopic reaction, the active compensation of reaction.

1. Antonov A., Filomenko A. Active compensation of reactive moments in electrical machines of magnetolectric type. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2014. No 39. Pp. 20–24. (Rus)
2. Robert C. O'Handley Modern Magnetic Materials: Principles and Applications. New York: *John Wiley & Sons*, 2000. 768 p.
3. Ledovsky A. Electrical machines with high-coercivity permanent magnets. Moskva: *Energoatomisdat*, 1985. 169 p. (Rus)
4. Putnikov V., Putnikov A., Uvarov V. Brushless DC motors with high operating time for space vehicles. *Electrotekhnika*. 2007. No 2. Pp. 18–23. (Rus)
5. Siff E., Emerich K. Introduction to gyroscopy. Moskva: *Mashinostroenie*, 1965. 124 p. (Rus)
6. Klimov D., Kharlamov C. Dynamics of a gyroscope in a cardan suspension. Moskva: *Nauka*. 1978. 208 p. (Rus.)
7. About works in the Keldysh IPM of RAS for the analysis of dynamics, design and implementation of small satellite attitude control systems. URL: http://keldysh.ru/papers/2006/source/prep2006_05.doc. (accessed: 12.12.2018).
8. Gyroscopes. Production and research. Edited by G.Slomyansky M. *Mechanical Engineering*, 1969. 188 p. (Rus)
9. Pavlov V.A. The Basics of design and calculation of gyroscopic devices. Leningrad: *Sudostroenie*, 1967. Pp. 146–150. (Rus)
10. Vibration solutions. Practical ways to reduce the risk of hand-arm vibration injury. Published by HSE 01/10.

Надійшла 25.02.2019

Received 25.02.2019