

УДК 621.314:004.4

doi:10.20998/2413-4295.2023.02.04

ПІДВИЩЕННЯ МАКСИМАЛЬНОГО МОМЕНТУ СПЕЦІАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

Г. В. ЛАЗАРЄВ^{1*}, Я. В. РИБКА¹, М. О. РЕУЦЬКИЙ², О. С. КРЯЧОК^{2**}, А. А. ШИМАНСЬКА²

¹ Державне підприємство «Науково-дослідний інститут «Квант», Київ, УКРАЇНА

*e-mail: kvant@ukroboronprom.com

² Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, УКРАЇНА

**e-mail: alexandrkiachok@gmail.com

АНОТАЦІЯ У роботі запропоновані методи підвищення максимального крутного моменту вбудованих моментних електродвигунів постійного струму шляхом варіювання їх конструкції (діаметра дроту обмотки якоря; розмірів якоря з метою збільшення кількості провідників, розташованих на його зовнішній поверхні; зміною схеми обмотки) при збереженні приєднувальних розмірів, що є актуальною задачею при проектуванні або модернізації електродвигунів для пристроїв автономного транспорту. Проведено низку розрахунків та експериментів, аналіз яких показав, що при збільшенні діаметра обмотувального дроту опір якорної обмотки зменшується і, як наслідок, пусковий момент збільшується, також зменшується споживана потужність та втрати в обмотці якоря. Але при цьому пусковий струм при сталій напрузі збільшується більш ніж у два рази, що вимагає збільшення встановленої потужності джерела живлення. Збільшення діаметра якоря дозволяє збільшити кількість провідників і поперечний переріз міді якоря при одночасному зменшенні ширини магніту і зменшенні магнітного потоку. В результаті відбувається зниження пускового моменту електродвигуна. Показано, що зміна схеми обмотки може призвести до значного ускладнення технологічного процесу виготовлення простої петлевої обмотки і складної багатопрохідної хвильової обмотки з більшою кількістю паралельних гілок та може створити проблеми з комутацією обмотки якоря. У роботі підтверджено, що збільшення діаметра обмотувального дроту є найефективнішим і найменш витратним способом збільшення максимального моменту вбудованих моментних електродвигунів постійного струму із збудженням від постійних магнітів і безпазовою конструкцією якоря, які знайшли своє застосування в пристроях автономних об'єктів (платформ). При цьому зміни вносяться тільки до конструкції якоря – зменшується діаметр якорного заліза і зменшується кількість витків у секції. Магнітна система, вузол щітка-колектор, підшипникові щити (за наявності) залишаються конструктивно без змін.

Ключові слова: моментний електродвигун; безпазовий якор; схема обмотки; магнітна система; магнітний потік.

INCREASING THE MAXIMUM TORQUE OF SPECIAL DC MOTORS WITH PERMANENT MAGNETS

G. LAZAREV¹, Ya. RYBKA¹, M. REUTSKYI², O. KRIACHOK², A. SHYMANSKA²

¹ State Enterprise «Research Institute «Quantum», Kyiv, UKRAINE

² National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT In the article proposes methods of increasing the maximum torque of built-in direct current torque motors by varying their design (the diameter of the armature winding wire; the dimensions of the armature in order to increase the number of conductors located on its outer surface; by changing the winding scheme) while maintaining the connection dimensions, which is an urgent task when designing or modernizing electric motors for autonomous transport devices. A number of calculations and experiments were carried out, the analysis of which showed that when the diameter of the winding wire increases, the resistance of the armature winding decreases and, as a result, the starting torque increases, the power consumption and losses in the armature winding also decrease. But at the same time, the starting current at a constant voltage increases by more than two times, which requires an increase in the installed capacity of the power source. Increasing the diameter of the armature allows you to increase the number of conductors and the cross-section of the armature copper while simultaneously reducing the width of the magnet and reducing the magnetic flux. As a result, the starting torque of the electric motor decreases. It is shown that changing the winding scheme can significantly complicate the technological process of manufacturing a simple loop winding and a complex multi-pass wave winding with a larger number of parallel branches and can create problems with the commutation of the armature winding. The work confirmed that increasing the diameter of the winding wire is the most effective and least expensive way to increase the maximum torque of built-in DC torque motors with excitation from permanent magnets and a slotless armature design, which have found their application in devices of autonomous objects (platforms). At the same time, changes are made only in the design of the anchor - the diameter of the anchor iron is reduced and the number of turns in the section is reduced. The magnetic system, brush-collector unit, bearing shields (if available) remain structurally unchanged.

Keywords: torque electric motor; slotless armature; winding scheme; magnetic system; magnetic flux.

Вступ

Широке впровадження різноманітних типів електричних машин у системи різного призначення та базування вимагає розв'язання цілого ряду проектних

задач, що пов'язані з підвищенням вимог до масогабаритних, енергетичних та механічних характеристик електричних машин автономних платформ [1,2]. Це зумовлює необхідність більш

ефективного використання моментних електродвигунів постійного струму, що побудовані з використанням високоерцитивних магнітів.

Доцільність їхнього використання у сучасних роботизованих системах різноманітного призначення та базування вже доведено досвідом застосування, зокрема у пристроях бронетехніки, авіації, електромобілів [3], міського електротранспорту [4-6], водного транспорту [7]. У таких пристроях електродвигун є, по суті, базовим вузлом, який розроблено спеціально для досягнення конкретної мети [8-10], що може полягати як у створенні нових систем із заданими характеристиками/властивостями, так і у модернізації існуючих пристроїв.

Як відомо, індуктори двигунів постійного струму з постійними магнітами зазвичай використовують в електроприводах малої та середньої потужності. Перевагами, зумовленими збудженням від постійних магнітів, є високий момент на низьких обертах, швидкий відклик на зміну напруги, що в більшості випадків є більш вагомим ніж основний недолік – погіршення магнітних властивостей магнітів з часом та під впливом високих температур. Проблема втрати магнітних властивостей залишається актуальною для виробів на магнітах ЮНДК. Магніти цієї марки мають найкращі температурні характеристики, легко намагнічуються після складання, але розмагнічуються внаслідок перевантажень.

Наприклад, під час роботи в азимутальному приводі горизонтального повороту автономної платформи можливі навіть 10-кратні перевантаження тривалістю до 1 с. При цьому обмотка якоря не пошкоджується, а магнітний потік постійних магнітів зменшується, що призводить до втрати моменту. Під час відновлювального ремонту стабілізовані магніти домагнічуються і можуть надалі використовуватися до наступного регламенту.

При використанні постійних магнітів на основі сплавів NdFeB або SmCo необхідний лише контроль робочої температури та температурний захист, тобто, потрібен коректний вибір марки постійного магніту, що враховує високу робочу температуру та відповідність умовам експлуатації і максимальним навантаженням.

Мета роботи

У статті розглянута задача підвищення максимального моменту вбудованих моментних електродвигунів постійного струму із збудженням від постійних магнітів і безпазовою конструкцією якоря, яка виникає перед розробником спеціального пристрою після проведення попередніх/макетних випробувань. Це відбувається, зазвичай, внаслідок заниженої оцінки статичних моментів конструкції, що, наприклад, була вкрита шаром криги або відбулося забруднення ущільнень. Як наслідок, буде потрібен значний момент, щоб зрушити обертову частину приладу з місця. Також можуть виникнути обставини, які

призведуть до перевищення розрахункової маси конструкції та, відповідно, і моменту інерції обертової частини. Це, в свою чергу, потребує додаткового/підвищеного моменту для забезпечення необхідного прискорення в динамічних режимах роботи приводу, наприклад, для стабілізації приладу, встановленому на судні при його гойданні на воді.

На етапі корегування конструкторської документації за результатами попередніх випробувань зміна габаритних розмірів вбудованого електродвигуна може призвести до необхідності переробки конструкції всього пристрою з дороговартісним доопрацюванням дослідного зразка. Зазвичай виникає необхідність збільшити максимальний момент електродвигуна без зміни його зовнішніх габаритів та приєднувальних розмірів.

В оптимально спроектованій машині покращення одного параметру призводить до погіршення інших показників. З точки зору узагальненої теорії проектування електромеханічних пристроїв рішення задачі здається зрозумілим і очевидним. Але на практиці, коли вбудована в прилад електрична машина, маючи 20÷30 % загального об'єму вартості, вимагає доробки, навіть прості рішення потребують коштовного фізичного моделювання. При цьому витрати на таке моделювання складають об'єм, порівнюваний з вартістю всієї розробки.

Отже, метою статті є аналіз способів підвищення максимального моменту вбудованих моментних електродвигунів постійного струму із збудженням від постійних магнітів і безпазовою конструкцією якоря шляхом варіювання його конструкції.

Виклад основного матеріалу

Відомо, що в редукторному електроприводі з високообертвовими електродвигунами постійного струму при збільшенні моменту навантаження обертовий момент електродвигуна зростає автоматично завдяки більш жорсткій механічній характеристиці, ніж у моментного двигуна (рис. 1).

У номінальному режимі частота обертання n_H високообертвового двигуна знаходиться поблизу частоти обертання ідеального неробочого ходу n_0 . При цьому номінальний момент M_H в рази менший від пускового моменту M_{II} . При збільшенні моменту навантаження до M_{MAX} частота обертання зменшується по механічній характеристиці до значення n_1 і двигун обертається з цією частотою, долаючи момент, що зростає.

Для моментного двигуна, що обертається в номінальному режимі з невисокою частотою обертання при обертовому моменті на валу близькому до пускового моменту (рис. 1), збільшення моменту навантаження вище, ніж величина пускового моменту, призведе до його зупинки. Щоб подолати збільшений момент навантаження M_{MAX} , необхідно підвищити напругу живлення і перейти на таку механічну характеристику, при якій значення

пускового моменту $M_{п1}$ буде більшим, ніж збільшений момент навантаження (характеристика при $U_1 = \text{const}$, рис. 1). Для електродвигунів пристроїв автономних об'єктів підвищити напругу живлення до

необхідного рівня навантаження часто буває складно з причини обмежених можливостей бортової мережі. Тому для підвищення моменту необхідно вносити зміни у конструкцію машини.

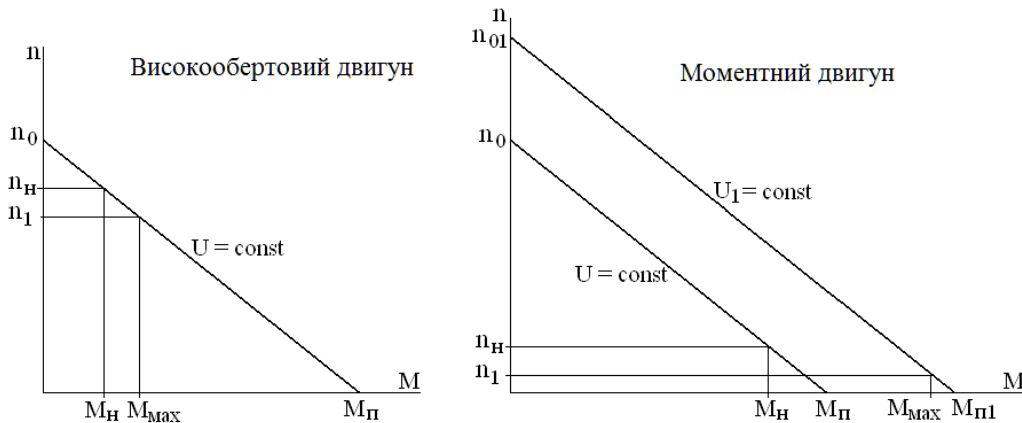


Рис. 1 – Порівняння механічних характеристик високообертового та моментного електродвигунів

Метод розв'язання

Рівняння для розрахунку електромагнітного моменту електричної машини [3] має вигляд:

$$M = C_m \Phi_\delta I_a, \tag{1}$$

де $C_m = \frac{pN}{2\pi a}$ – коефіцієнт, який залежить від особливостей конструкції машини; $I_a = i_a 2a$ – струм в обмотці якоря; i_a – струм в паралельній гілці обмотки якоря.

Тоді маємо:

$$M = \frac{pN\Phi_\delta I_a}{2\pi a} = \frac{1}{\pi} N i_a p \Phi_\delta, \tag{2}$$

де $(N q_m j)$ – повний струм обмотки якоря; $(p \Phi_\delta)$ – повний магнітний потік; N – число провідників обмотки якоря; q_m – площа перетину міді одного провідника; j – густина струму в провіднику; p – число пар полюсів магнітної системи.

Зрозуміло, що збільшити повний магнітний потік у вже спроектованій машині із збудженням від постійних магнітів без зміни габаритів самої машини достатньо складно. Тому застосування постійних магнітів з більш високою питомою магнітною енергією (BH_{max}) дозволяє підвищити момент на 10÷15 %, але цього може бути недостатньо для вирішення проблеми.

Проведені дослідження показали, що при обмеженні напруги живлення повний струм якоря є функцією повного перетину міді якоря $f(N, q_m)$. Таким чином, можна вибрати наступні шляхи підвищення максимального моменту:

- збільшення діаметру обмоткового дроту;
- збільшення діаметру якоря з метою збільшення кількості провідників, розташованих на його зовнішньому колі;

- комбінація перших двох способів;
- зміна схеми обмотки.

Збільшення діаметру обмоткового дроту.

При незмінному діаметрі ротора і збільшенні діаметру обмоткового дроту зменшується кількість провідників розташованих на зовнішньому колі якоря та збільшується переріз провідника. В результаті опір якорної обмотки знижується ($R_{Om} = \frac{\rho l}{\pi r^2}$) зі збільшенням діаметру дроту і, відповідно, збільшується пусковий струм якоря.

Водночас, збільшення діаметру дроту призведе до збільшення немагнітного (робочого) проміжку і, відповідно, деякому зниженню магнітного потоку. Схематично це відображено на діаграмі магнітного стану двигуна, що наведена на рис. 2.

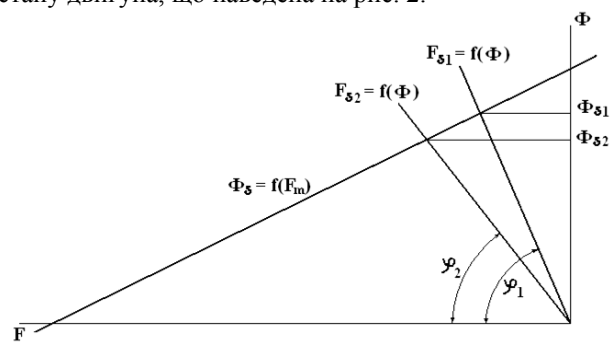


Рис. 2 – Діаграма магнітного стану двигуна

На діаграмі лінія $\Phi_\delta = f(F_m)$ – це залежність магнітного потоку, що перегинає робочий проміжок, від магніторушійної сили (МРС), розвинутої магнітом. Вона отримана шляхом графічного віднімання потоку розсіювання від потоку в нейтральному перетині магніту. У даному разі (розглядаємо магнітний сплав типу NdFeB) лінія розмагнічування якого у другому квадранті практично лінійна, але подальші висновки

справедливі й для матеріалів типу AlNiCo з опуклою кривою розмагнічування.

Оскільки потік розсіювання лінійно залежить від MPC, то залежність $\Phi_{\delta} = f(F_m)$ також є лінійною. Робоча точка магніту має місце на перетині лінії $\Phi_{\delta} = f(F_m)$ з магнітною характеристикою зовнішнього кола. Зовнішнє коло [11-13] містить робочий (немагнітний) проміжок, паразитні немагнітні проміжки, утворені клейовими швами, ярма якоря, полюсного наконечника та (для магнітних систем з радіальним розміщенням магнітів) ярма індуктора.

Магнітопровідні деталі виготовляють з магнітом'якого заліза або електротехнічної сталі. В оптимально спроектованій машині їхня доля у магнітному опорі зовнішнього кола складає не більше 5÷10 %.

Товщина клейових швів при відлагодженій технології виробництва зазвичай не перевищує 0,02 мм.

У такому разі можна вважати, що зовнішнє коло представлено немагнітним робочим проміжком.

Магнітна характеристика немагнітного робочого проміжку $F_{\delta 1} = f(\Phi)$ є лінійною. Тангенс кута її нахилу ($tg\varphi_1$) до осі F відповідає магнітній провідності проміжку, а точка її перетину з лінією $\Phi_{\delta} = f(F_m)$ визначає значення магнітного потоку через немагнітний робочий проміжок $\Phi_{\delta 1}$.

Якщо припустити, що в результаті використання дроту більшого перетину немагнітний проміжок збільшився у два рази, тоді провідність проміжку зменшиться у два рази, оскільки ($tg\varphi_2 = tg\varphi_1/2$), але при цьому кут нахилу характеристики робочого проміжку (φ_2) і, відповідно, магнітний потік ($\Phi_{\delta 2}$) зменшаться менше, ніж у два рази, оскільки, якщо $tg\varphi_1 / tg\varphi_2 = \kappa$, то $\varphi_1 / \varphi_2 < \kappa$.

Викладене вище підтверджено експериментальними даними, що наведені у таблиці та демонструють збільшення максимального моменту електродвигунів серії МІУ-1 [1].

Таблиця – Максимальний момент електродвигунів серій МІУ-1, ДМ-15, МІУ-7

Найменування параметрів	Од. вимір.	МІУ-1			ДМ-15				МІУ-7	
		МІУ-1	МІУ-1М	МІУ-1М1	ДМ-15	ДМ-15М	ДМ-15М1	ДМ-15М2	МІУ-7	МІУ-7М
Номинальний момент (M_n)	Нм	1			15				7	
Напруга живлення	В	12,4	7,9	12,2	17	12,5	11,4	17,0	16,0	13,0
Номинальний струм навантаження	А	2,0	2,7	1,93	11,0	14,4	17,5	19,7	4,9	8,7
Номинальна щільність струму	А/мм ²	13,2	10,8	12,9	12,5	11,0	14,0	19,6	9,9	9,84
Опір обмотки якоря при +20°C	Ом	4,7	2,13	5,22	1,1	0,60	0,46	0,465	2,38	0,9
Коефіцієнт моменту	Нм/А	0,53	0,39	0,58	1,4	1,1	0,93	0,86	1,53	0,835
Споживана потужність	Вт	24,8	21,3	23,8	187	180	200	333	80	113
Втрати в міді якоря	Вт	18,8	15,5	19,4	133,1	123	140,9	178	57,1	68,1
Момент при напрузі 27 В	Нм	3,1	5,0	3,0	30	50	54,7	50	16,6	24,2
									При напрузі 24 В	
Струм при напрузі 27 В	А	5,7	12,7	5,17	24,7	45,4	58,7	58,0	11,8	26,6
									При напрузі 24 В	
Кількість полюсів	-	16		20	42				30	
Кількість провідників якоря	-	1442	1124	1572	1896	1580	2256	929	1792	1344
Кількість пар паралельних гілок	-	1					2	1		
Діаметр якоря	мм	87,5		97,5	265				185	
Активна довжина якоря	мм	30			30				42	
Довжина магніту	мм	32			32				42	
Ширина магніту	мм	13		8	13				13	
Висота магніту по осі намагнічування	мм	12			12				12	
Повний магнітний потік	Вб×10 ⁻³	2,32	2,19	2,52	4,83	4,37	5,18	5,85	3,55	2,60
Діаметр обмоткового дроту	мм	0,315	0,4	0,315	0,75	0,90	0,63	0,80	0,56	0,75
Повний переріз міді якоря	мм ²	108,7	141,2	116,5	838	1005	703,8	463	440,8	594,8

З таблиці видно, що у модернізованому варіанті МІУ-1М збільшення діаметра обмоткового дроту на 29 % проти базової конструкції МІУ-1 призвело до зниження опору якоря на 53 %. При цьому повний магнітний потік зменшився всього на 6%. У результаті пусковий момент зріс на 61 %, знизилась споживана потужність і втрати в якорі. Але пусковий струм при напрузі у 27 В зріс більше, ніж у два рази, що вказує на необхідність збільшення встановленої потужності джерела живлення.

Аналогічна модернізація електродвигуна ДМ-15 дозволила збільшити максимальний момент з 30 Нм до 50 Нм. Деякі параметри модернізованого варіанту також наведені в таблиці.

Збільшення діаметру якоря. Збільшення діаметру якоря для розміщення більшого числа провідників при обмеженому зовнішньому діаметрі індуктора не призвело до збільшення максимального моменту (див. таблицю). На прикладі електродвигуна МІУ-1М1 видно, що при збільшенні діаметру якоря з 87,5 мм до 97,5 мм (на 11 %) на ті ж 11 % збільшиться і число провідників якоря. При цьому ширину магніту довелося зменшити на 5 мм (39 %). Магнітний потік одного полюса знизився приблизно на 10 %. Проте з'явилась можливість збільшити число полюсів з 16 до 20 (на 25 %). В результаті, з урахуванням зростання потоків розсіювання магнітної системи, повний магнітний потік збільшився на 8 %. Внаслідок збільшення опору обмотки якоря максимальний струм зменшився на 11 %. В підсумку, відбулося не збільшення, а зниження максимального моменту на 3 %.

Зміна схеми обмотки. Наведені вище методи збільшення максимального моменту при обмежених можливостях збільшення напруги живлення електродвигуна засновані на збільшенні перетину міді в проміжку при мінімізації пов'язаного з цим зниженням магнітного потоку.

Вирішити поставлену задачу зі збільшення максимального моменту можливо також без зміни перетину міді та величини магнітного потоку шляхом зміни схеми обмотки.

Відомо, що в багатополюсних моментних електродвигунах зазвичай застосовують просту хвильову обмотку, яка має одну пару паралельних гілок $a = 1$. При збільшенні числа пар паралельних гілок у простій петльовій обмотці або складній багатохвильовій обмотці із більшим числом паралельних гілок, число секцій обмотки в кожній гілці зменшиться в a разів, опір обмотки зменшиться в a^2 разів, а пусковий струм в a^2 разів збільшиться і, відповідно, в a разів збільшиться максимальний момент.

Просту петльову обмотку, в якій $a = p$, в багатополюсних моментних двигунах не використовують, оскільки опір обмотки якоря стає значно меншим за опір щіткового контакту і керувати таким двигуном, особливо на повзучих швидкостях, надзвичайно складно. Окрім того, число щіток при використанні петльової обмотки має бути рівним числу полюсів електродвигуна, що збільшує

трудомісткість виготовлення, сервісного обслуговування та собівартість машини.

Складні багатогодові хвильові обмотки дозволяють отримати дві чи три пари паралельних гілок (більшу кількість використовувати неефективно з тих же причин, що і для петльової обмотки). Але без зміни конструкції магнітної системи отримати в два чи три рази більший максимальний момент є проблематичним.

Під час модернізації електродвигуна ДМ-15 досліджувався варіант складної хвильової двократнозамкненої обмотки якоря ДМ-15М1 (табл.). Оскільки збільшити максимальний момент необхідно було менше ніж удвічі, то діаметр обмоткового дроту був зменшений порівняно з базовим варіантом. З таблиці видно, що параметри цього варіанту дещо поступаються параметрам двигуна ДМ-15М. Окрім того, двократнозамкнена обмотка являє собою, по суті, дві незалежних обмотки з'єднані через щітки. Це може потенційно призвести до проблем з комутацією, що погіршується вирівнювальними струмами в паралельних гілках, особливо при віброударних впливах. Як наслідок, перевагу отримав двигун ДМ-15М.

Було також досліджено метод збільшення максимального моменту для даного конструктивного типу електродвигунів, а саме, – застосування одношарової обмотки. У цьому типі обмотки другі сторони секцій вкладають у проміжки, залишені між першими сторонами. Таким чином, проти базового варіанту, число провідників і опір якоря зменшуються вдвічі, а пусковий струм вдвічі збільшується. Немагнітний проміжок зменшується менше, ніж удвічі, тому магнітний потік збільшується також менше, ніж у два рази і, в результаті, коефіцієнт пропорційності зменшується. У таблиці наведені дані розрахунку для двигуна ДМ-15М2 з одношаровою обмоткою. Максимальний момент 50 Нм вдалось отримати при збільшенні діаметру провідника обмотки якоря до 0,8 мм. Технічні характеристики цього варіанту найгірші у порівнянні зі всіма попередніми. Крім того, одношарова обмотка в безпазовому якорі застосовується дуже рідко внаслідок технологічних обмежень та складностей у її виготовленні. Зазначимо, що зі збільшенням числа полюсів технологічні складності також зростають.

Необхідність збільшення максимального моменту виникла при випробуваннях приладу, для якого був розроблений двигун МІУ-7. Збільшення діаметру обмоткового дроту з 0,56 мм до 0,75 мм дозволило збільшити максимальний момент з 16,6 Нм до 24,2 Нм (див. табл.).

Висновки

У роботі здійснено порівняльний аналіз кількох методів підвищення максимального моменту вбудованих моментних електродвигунів постійного струму при збереженні приєднувальних розмірів. А саме, шляхом збільшення діаметру дроту обмотки якоря; шляхом збільшення діаметру якоря для

збільшення числа провідників, розташованих на його зовнішній поверхні; шляхом одночасного збільшення діаметру обмоткового дроту та кількості провідників та шляхом зміни схеми обмотки.

Показано що, при застосуванні способу підвищення максимального моменту шляхом збільшення діаметра обмоткового дроту на 29 % відбулося зниження опору якоря на 53 %, магнітного потоку на 6 %, і, як наслідок, пусковий момент зріс на 61 %, а споживана потужність та втрати в обмотці якоря зменшилися. Але пусковий струм при напрузі 27 В у цьому випадку зріс більше, ніж у два рази, що потребує збільшення встановленої потужності джерела живлення.

Для варіанту, коли діаметр якоря зріс на 10 мм, отримано збільшення числа провідників та перетину міді якоря на 11 % при одночасному зменшенні ширини магніту та зниженні магнітного потоку на 39 %. В результаті чого відбулося зниження пускового моменту електричної машини.

Зміна схеми обмотки призводить до труднощів, що зумовлені значним ускладненням технологічного процесу виготовлення простої петльової обмотки та складної багатоходової хвильової обмотки із більшим числом паралельних гілок. При цьому також виникає небезпека появи проблем з комутацією складної хвильової двократнозамкненої обмотки якоря.

Таким чином, збільшення діаметру обмоткового дроту є найбільш ефективним і найменш затратним способом підвищення максимального моменту вбудованих моментних електродвигунів постійного струму зі збудженням від постійних магнітів та безпазовою конструкцією якоря при збереженні приєднувальних розмірів двигуна, що є актуальною задачею при проектуванні або модернізації електродвигунів для пристроїв автономного транспорту (платформ). Зміни вносяться тільки в конструкцію якоря – зменшується діаметр заліза якоря та зменшується число витків у секції. У деяких випадках для збереження колектора використовуються секції з різним числом витків. Магнітна система, щітково-колекторний вузол, підшипникові щити (при їх наявності) залишаються конструктивно незмінними.

До недоліків зазначеного способу слід віднести необхідність підвищення потужності джерела живлення, а також зменшення діапазону регулювання, що може створити труднощі при керуванні моментним двигуном на повзучих швидкостях.

Список літератури

1. Лазарев Г. В. [и др.] Электрические машины постоянного тока для электроприводов специального назначения. *Електротехніка і електромеханіка*. 2002. №1. С. 104-108.
2. Чорний О. П., Зачепа Ю. В., Мазуренко Л. І., Буряковський С. Г., Ченчевой В. В., Зачепа Н. В. Локальні автономні джерела енергопостачання для умов надзвичайних ситуацій. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 5. С. 45-48. doi: 10.15407/techned2020.05.045
3. Гребеніков В. В., Приймак М. В. Проектування електродвигуна з постійними магнітами для

електромобілів з урахуванням їздового циклу. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 5. С. 65-68. doi: 10.15407/techned2018.05.065

4. Гребеніков В. В., Гамалія Р. В., Дадичін С. А. Порівняльний аналіз магнітних систем електродвигунів з постійними магнітами для трамвая. *Технічна електродинаміка*. 2021. № 5. С. 27-37. doi: 10.15407/techned2021.05.027
5. Huynh T. A., Hsieh M-F. Performance Analysis of Permanent Magnet Motors for Electric Vehicles (EV) Traction Considering Driving Cycles. *Energies*. 2018. Vol. 11 (6). P. 13-85. doi: 10.3390/en110613859
6. Zhang S., Xiong R., Zhou X. Comparison of the topologies for a hybrid energy-storage system of electric vehicles via a novel optimization method. *Sci. China Technological Sci.* 2015. Vol. 58. № 7. P. 1173-1185. doi: 10.1007/s11431-015-5843-y
7. Wu J., Yang Z., Wu D. Impedance control of secondary regulated hydraulic crane in the water entry phase. *Ocean Engineering*. 2018. № 169. P. 134-143. doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.09.025
8. Sayed E., Yang R., Liang J., Bakr M. H., Bilgin B., Emadi A. Design of unscrewed interior permanent magnet traction motor with asymmetric flux barriers and shifted magnets for electric vehicles. *Electric Power Components and Systems*. 2020. Vol. 48. № 6-7. P. 652-657. doi: 10.1080/15325008.2020.1797938
9. Akar F., Tavlasoglu Y., Vural B. An energy management strategy for a concept battery/ultracapacitor electric vehicle with improved battery life. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2017. Vol. 3. № 1. P. 191-200. doi: 10.1109/TTE.2016.2638640
10. Johansen T. A., Fossen T. I., Sagatun S. I., Nielsen F. G. Wave synchronizing crane control during water entry in offshore moonpool operations-experimental results. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2003. Vol. 28 (4). P. 720-728. doi: 10.1109/JOE.2003.819155
11. Крячок О. С., Реуцький М. О., Сушко Д. А. До питання розрахунку характеристик спеціальних пристроїв з магнітною системою на основі постійних магнітів. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2021. № 2 (8). С. 77-82. doi: 10.20998/2413-4295.2021.02.11
12. Крячок О., Сушко Д. Комп'ютерна програма «Electro-Magnetic Laboratory»: Свідчення про реєстрацію авторського права на твір № 111491. Україна. Дата реєстрації 01.02.2022. 1 с.
13. Крячок О., Сушко Д. Моделювання електромагнітних процесів у робочій зоні спеціальних пристроїв з урахуванням впливу магнітного екрану. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2022. № 3 (13). С. 18-23. doi: 10.20998/2413-4295.2022.03.03.

References (transliterated)

1. Lazarev G., Reutsky N. Electric DC machines for special purpose electric drives. *Electrical Engineering and Electromechanics*, 2002, no. 1, pp. 104-108.
2. Chorny O., Zachepa Yu., Mazurenko L., Buryakovskiy, S., Chencheva V., Zachepa N. Local autonomous energy sources for emergencies. *Technical electrodynamic*, 2020, no. 5, pp. 45-48, doi: 10.15407/techned2020.05.045
3. Grebenikov V., Gamalia R., Dadichin S. Comparative analysis of magnetic systems of electric motors with permanent magnets for the tram. *Technical Electrodynamic*, 2021, no. 5, pp. 27-37, doi: 10.15407/techned2018.05.065

4. Grebenikov V., Priymak M. Design of electric motor with permanent magnets for electric cars, taking into account the driving cycle. *Technical Electrodynamics*, 2018, no. 5, pp. 65-68, doi: 10.15407/techned2021.05.027
5. Huynh T. A., Hsieh M-F. Performance Analysis of Permanent Magnet Motors for Electric Vehicles (EV) Traction Considering Driving Cycles. *Energies*, 2018, vol. 11(6), pp. 13-85, doi: 10.3390/en110613859
6. Zhang S., Xiong R., Zhou X. Comparison of the topologies for a hybrid energy-storage system of electric vehicles via a novel optimization method. *Sci. China Technological Sci.*, 2015, vol. 58, no. 7, pp. 1173-1185, doi: 10.1007/s11431-015-5843-y
7. Wu J., Yang Z., Wu D. Impedance control of secondary regulated hydraulic crane in the water entry phase. *Ocean Engineering*, 2018, no. 169, pp. 134-143, doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.09.025
8. Sayed E., Yang R., Liang J., Bakr M. H., Bilgin B., Emadi A. Design of unscrewed interior permanent magnet traction motor with asymmetric flux barriers and shifted magnets for electric vehicles. *Electric Power Components and Systems*, 2020, vol. 48, no. 6-7, pp. 652-657, doi: 10.1080/15325008.2020.1797938
9. Akar F., Tavlasoglu Y., Vural B. An energy management strategy for a concept battery/ultracapacitor electric vehicle with improved battery life. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2017, vol. 3, no 1, pp. 191-200, doi: 10.1109/TTE.2016.2638640
10. Johansen T. A., Fossen T. I., Sagatun S. I., Nielsen F. G. Wave synchronizing crane control during water entry in offshore moonpool operations-experimental results. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2003, vol. 28 (4), pp. 720-728, doi: 10.1109/JOE.2003.819155
11. Kryachok O., Reutsky M., Sushko D. On the question of calculating the characteristics of special devices with a magnetic system based on permanent magnets. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*, 2021, no. 2 (8). pp. 77-82, doi: 10.20998/2413-4295.2021.02.11
12. Kriachok O. S., Sushko D. A. Kompiuterna prohrama «Electro-Magnetic Laboratory»: Svidotstvo pro reiestratsiiu avtorskoho prava na tvir № 111491 [Computer program "Electro-Magnetic Laboratory": Certificate of copyright registration for the work no. 111491]. Ukraine, 01.02.2022, 1 p.
13. Kriachok O., Sushko D. Simulation of electromagnetic processes in the working area of special devices considering the influence of the magnetic screen. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*, 2022, no. 3 (13), pp. 18-23, doi: 10.20998/2413-4295.2022.03.03.

Відомості про авторів (About authors)

Лазарев Георгій Венедиктович – начальник відділу електричних машин, Державне підприємство «Науково-дослідний інститут «Квант», вул. Івана Федорова, 4, Київ, Україна, kvant@ukroboronprom.com.

George Lazarev – Head of department, State Enterprise Research Institute "Kvant", Kyiv, Ukraine, kvant@ukroboronprom.com

Рибка Яків Володимирович – начальник сектору відділу електричних машин, Державне підприємство «Науково-дослідний інститут «Квант», вул. Івана Федорова, 4, Київ, Україна, kvant@ukroboronprom.com.

Yakov Rybka – Sector supervisor, State Enterprise Research Institute "Kvant", Kyiv, Ukraine, kvant@ukroboronprom.com

Реуцький Микола Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», доцент кафедри електромеханіки; м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0003-1870-2222; e-mail: rmo318@i.ua.

Mykola Reutskyi – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), associate professor, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Associate Professor of Department of Electromechanics, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-1870-2222; e-mail: rmo318@i.ua.

Крячок Олександр Степанович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», доцент кафедри автоматизації проектування енергетичних процесів та систем; м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0003-4829-635X; e-mail: alexandrcriachok@gmail.com.

Oleksandr Kriachok – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), associate professor, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Associate Professor of Department of Computer Aided Design Energy Processes and Systems, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-4829-635X; e-mail: alexandrcriachok@gmail.com.

Шиманська Анна Анатоліївна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», доцент кафедри електромеханіки; м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0003-2481-0908; e-mail: shyman.anna@gmail.com.

Anna Shymanska – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), associate professor, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Associate Professor of Department of Electromechanics, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-2481-0908; e-mail: shyman.anna@gmail.com.

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Лазарев Г. В., Рибка Я. В., Реуцький М. О., Крячок О. С., Шиманська А. А. Підвищення максимального моменту спеціальних електродвигунів постійного струму з постійними магнітами. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2023. № 2 (16). С. 26-32. doi: 10.20998/2413-4295.2023.02.04.

Please cite this article as:

Lazarev G., Rybka Ya., Reutskyi M., Kriachok O., Shymanska A. Increasing the maximum torque of special DC motors with permanent magnets. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2023, no. 2(16), pp. 26–32, doi:10.20998/2413-4295.2023.02.04.

Надійшла (received) 01.04.2023

Прийнята (accepted) 02.05.2023