

УДК 621.316

О. Ю. ЮР'ЄВА

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ КОАКСІАЛЬНИХ ЛІНІЙНИХ ДВИГУНІВ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

Подано принципи проектування коаксіальних лінійних двигунів з постійними магнітами. Наведено принципи обирання електромагнітних навантажень та розмірів постійних магнітів. Представлено формулу машинної постійної для коаксіальних лінійних двигунів. Визначено математичний зв'язок між розмірами постійного магніту, його характеристиками та електромагнітними навантаженнями. Наведені співвідношення між елементами активної частини двигуна. На прикладі двигуна потужністю 500 Вт апробовано запропоновану методику проектування коаксіальних лінійних двигунів з постійними магнітами.

Ключові слова: коаксіальний лінійний двигун, постійний магніт, проектування, статор, бігун, тягове зусилля.

Представлены принципы проектирования коаксиальных линейных двигателей с постоянными магнитами. Приведены принципы выбора электромагнитных нагрузок и размеров постоянных магнитов. Представлена формула машинной постоянной для коаксиальных линейных двигателей. Определена математическая связь между размерами постоянного магнита, его характеристиками и электромагнитными нагрузками. Приведены соотношения между элементами активной части двигателя. На примере двигателя мощностью 500 Вт апробирована методика проектирования коаксиальных линейных двигателей с постоянными магнитами.

Ключевые слова: коаксиальный линейный двигатель, постоянный магнит, проектирование, статора, бегун, тяговое усилие.

Purpose. Presentation of the principles and the results of design of coaxial linear motor with permanent magnets. **Methodology.** Suggested design principles are based on the use of Arnold machinery constant. Electric and magnetic loading is determined motor apparent power of motor. Characteristics and dimensions of permanent magnet is determined motor apparent power of motor also. The correctness of the obtained size of the active part of the motor checked draft force. **Results.** The test calculations are conducted on a 500 W coaxial linear motor for submersible pump plunger. Proposed design principles obtained mathematical relationship between nominal data, electromagnetic characteristics, geometrical dimensions allow creating new and improve existing coaxial linear motors. **Originality.** Proposed design principles obtained mathematical relationship between nominal data, electromagnetic characteristics, geometrical dimensions allow creating new and improve existing coaxial linear motors. **Practical value.** These design features proposed for use in research and engineering practice.

Keywords: coaxial linear motor, permanent magnet, design, stator, runner, draft force.

Вступ. Отримання висококоерцитивних постійних магнітів на базі рідкісноземельних елементів, наприклад, NdFeB, призвело до більш широкого використання у побутовій і промисловій техніці різноманітних конструкцій електромеханічних перетворювачів енергії зі збудженням від постійних магнітів. Їх застосування сприяє переходу до більш дешевих двигунів загального та спеціалізованого призначення, дозволяє значно поліпшити корисну потужність.

Доцільність розробки та застосування електроприводів на основі лінійних двигунів визначається не тільки спрощенням та здешевленням механізмів зворотно-поступового руху, але й підвищенням надійності, зниженням механічних втрат потужності, зменшенням експлуатаційних втрат.

Умови експлуатації лінійних електроприводів обмежують габаритні розміри обладнання та, як слідство, вибір конструкції лінійних двигунів. Наприклад, для коаксіальних лінійних двигунів, що працюють в насосних установках, обмежувальним фактором є діаметр насосно-компресорної труби, де встановлюється двигун; для вібраційних установок – маса двигуна; для офісної техніки, сканерів та принтерів – маса та габаритні розміри, а також точність позиціонування робочого органу. При таких умовах обертові електродвигуни мають відносно низькі техніко-енергетичні показники. Також на вибір конструкції лінійного двигуна впливає питома механічна потужність та тягове зусилля, яке створюється електромагнітними силами в повітряному проміжку лінійного двигуна та

передається на робочий орган.

Постановка задачі. Натепер не існує загальноприйнятої методики проектування коаксіальних лінійних двигунів з постійними магнітами. Конструкції коаксіальних лінійних двигунів, що досліджуються в теперішній час в нашій країні, були отримані або інтуїтивно, або готовими для прикладних досліджень. Тому з'явилась потреба у створенні методики проектування, яка дозволила би створювати нові двигуни або удосконалювати існуючі.

Об'єкт дослідження. Створення методики проектування коаксіальних лінійних двигунів з урахуванням їхнього призначення, техніко-економічних та енергетичних характеристик. Визначення принципів прийняття рішення щодо обрання конструкції коаксіальних лінійних двигунів з постійними магнітами.

Опис конструкції коаксіального лінійного двигуна. В коаксіальному лінійному двигуні рухома та нерухома частини виконуються як коаксіальні циліндри, з'єднані через ковзний вузол. Специфічність конструкції лінійного двигуна визначила появу і деяких спеціальних термінів, застосовуваних для позначення окремих його частин.

Натепер ще не прийнята єдина система термінології, тому в технічній літературі однаковий зміст вкладається в поняття: нерухома частина – статор – первинний елемент – індуктор, рухома частина – ротор – вторинний елемент – бігун – якір – реактивна смуга. Частина двигуна, яка отримує енергію з мережі, може називатися статором (хоча вона не завжди є нерухомою частиною), а частина двигуна, яка отримує енергію зі статора, – вторинним елементом.

Одна з типових конструкцій коаксіального

©О.Ю.Юр'єва, 2017

лінійного двигуна наведена на рис. 1. Статор двигуна має вигляд труби і складається з осердя 1 та обмотки 2. Усередині статора розташовується бігун, який набирається з постійних магнітів 3 та шайб 4 на загальний шток 5. До штоку приєднується робочий орган залежно від призначення двигуна.

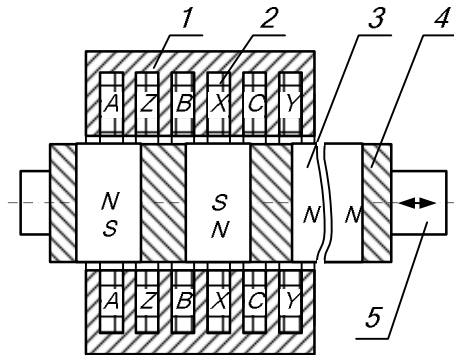


Рис. 1 – Коаксіальний лінійний двигун

Осердя статора та бігуна виконуються масивними. Тому вони можуть складатися з окремих шайб (на рисунку не показано), що значно покращує технологічність конструкції. Шайби статора та бігуна є частинами магнітопроводу. Але в цьому разі на шляху основного магнітного потоку в місцях дотику шайб з'являються маленькі повітряні проміжки, що підвищують магнітний опір магнітопроводу.

Обмотка статора складається з окремих котушок, які з'єднуються групами і утворюють обмотки окремих фаз. При підключенні до мережі обмоток статора уздовж його внутрішньої поверхні утворюється біжуче магнітне поле. Взаємодія магнітного поля обмотки статора з магнітним полем постійних магнітів створює електромагнітну силу, що діє уздовж бігуна, яка і викликає (при закріпленому статорі) рух вторинного елемента в осьовому напрямку. Полюси бігуна розташовуються по середині між постійними магнітами, намагніченими в осьовому напрямку. Різноміненні полюси магнітних полів обмотки статора та постійних магнітів притягуються один до одного та пересуваються синхронно. Тобто, за принципом дії коаксіальний лінійний двигун з постійними магнітами є синхронною машиною.

На обмотку статора подається живлення від джерела змінного струму через перетворювач частоти. Необхідність встановлення перетворювача частоти обумовлена необхідністю регулювання швидкості лінійного переміщення ротора – саме частота струму в обмотці статора визначає лінійну швидкість бігуна. У міру переміщення максимуму струму по фазах обмотки статора будуть пересуватися полюси обмотки статора, синхронно з якими буде рухатися бігун.

Довжина лінійного переміщення ротора визначає кількість полюсів ротора, тобто кількість полюсних кроків ротора та кількість постійних магнітів. Для вібраційних лінійних двигунів [1], що здійснюють зворотно-поступовий рух бігуна

амплітудою до 1 мм, достатньо подвійного полюсного кроку. Для лінійних двигунів плунжерних насосів хід поршня може сягати 1 м, тоді кількість полюсних кроків треба збільшувати, а, отже, зростатиме кількість полюсів. Величина лінійного переміщення бігуна визначає кількість постійних магнітів, які потрібні для створення лінійного двигуна в цілому.

Трубчаста конструкція лінійних двигунів характеризується аксіальним напрямком магнітного потоку у бігуні (вторинному елементі) на відміну від плоского лінійного двигуна, в якому магнітний потік має радіальний напрямок.

Формула машинної постійної для коаксіального лінійного двигуна.

Обґрунтування конструктивних особливостей лінійного двигуна виконується за допомогою формули машинної постійної для машин змінного струму [2]. Як відомо, виведення формули машинної постійної базується на формулі повної потужності:

$$S = m_s \cdot E \cdot I,$$

де m_s – кількість фаз обмотки статора, E – діюче значення ЕРС фазної обмотки статора; I – діюче значення струму фазної обмотки статора.

Величина ЕРС E залежить від форми сигналу перетворювача частоти. Для спрощення аналізу приймається синусоїдний розподіл в часі на полюсному кроці. Тоді

$$E = \pi \cdot \sqrt{2} \cdot N \cdot f \cdot \Phi_m \cdot K_w,$$

де N – кількість витків фазної обмотки статора; f – частота мережі; Φ_m – максимальне значення магнітного потоку; K_w – обмотковий коефіцієнт обмотки статора.

Обмотку статора рекомендується виконувати зосередженою, щоби розподілення обмотки не знижувало величини ЕРС. В такому випадку коефіцієнт $K_w = 1$. Тобто одна котушка повинна мати N витків, які необхідно розташувати в одному пазу. У разі неможливості розташування усіх витків у одному пазу необхідно перейти до розподіленої обмотки.

Максимальне значення магнітного потоку

$$\Phi_m = B_\delta \cdot S_m,$$

де B_δ – середнє значення магнітної індукції, яку створює постійний магніт в повітряному проміжку; S_m – площа поверхні, яку перетинає магнітний потік постійного магніту.

Для прийнятої коаксіальної форми двигуна величина S_p буде визначатися площею бокової поверхні постійного магніту, виконаного у формі кільця,

$$S_m = \frac{\pi(d_m^2 - d_0^2)}{4},$$

де d_m та d_0 – зовнішній та внутрішній діаметри постійного магніту відповідно (рис. 2).

Лінійне навантаження лінійного двигуна може бути представлено, за визначенням, як кількість струму на одиницю довжини лінії, уздовж якої розташовано обмотку статора:

$$A = \frac{m_s \cdot I \cdot N}{l_s},$$

де l_s – активна довжина статора.

Підставляючи отримані формули до формули

повної потужності, отримується математичний зв'язок між номінальними даними, електромагнітними навантаженнями та головними розмірами коаксіального лінійного двигуна з постійними магнітами при синусоїдному змінюванні струму обмотки статора у часі. Це є формулою машинної постійної для коаксіального лінійного двигуна:

$$S = \frac{\pi^2}{2\sqrt{2}} \cdot f \cdot A \cdot B_\delta \cdot (d_m^2 - d_0^2) \cdot l_s \cdot K_W \quad (1)$$

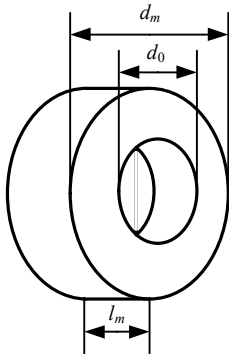


Рис. 2 – Розміри кільцевого постійного магніту

З отриманої залежності можна зробити висновок, що для збільшення потужності коаксіального лінійного двигуна електромагнітні навантаження та головні розміри повинні збільшуватися. Цей висновок не суперечить теорії класичних обертових електричних машин. Але обмеження, що накладаються на коаксіальні лінійні двигуни, створюють особливості їх конструювання.

З огляду на конструктивні особливості лінійного коаксіального двигуна можна визначити принципи визначення розмірних співвідношень активних частин.

Вибір об'єму постійного магніту. Наразі найпоширенішим матеріалом постійних магнітів є сплав на основі рідкісноземельних металів неодиму, заліза та бору, Nd-Fe-B. Для сучасних постійних магнітів Nd-Fe-B робоча температура може сягати 120°C при остаточній магнітній індукції B_r 1,35 Тл та коерцитивній силі H_c 1359 кА/м [3].

Активний об'єм постійного магніту V_m визначає номінальну вихідну потужність двигуна [4]:

$$P_N = \frac{\pi\sqrt{3} \cdot f_N \cdot B_r \cdot H_c \cdot V_m}{1 + \frac{1}{k_e}},$$

де k_e – коефіцієнт відношення ЕРС у фазі обмотки статора до номінальної фазної напруги, знаходиться в діапазоні 1,01–1,06, як і для синхронних двигунів; f_N – номінальна частота.

Об'єм кільцевого постійного магніту

$$V_m = \frac{\pi(d_m^2 - d_0^2)}{4} \cdot l_m,$$

де l_m – товщина постійного магніту (див. рис. 2).

Розміри постійного магніту отримуються із наявного ряду, що визначить реальний об'єм

постійного магніту. Реальний об'єм постійного магніту повинен перебільшувати розрахунковий.

Вихідна потужність P_N визначається повною потужністю S_N з урахуванням коефіцієнта потужності $\cos\varphi_N$ та ККД η_N у номінальному режимі:

$$P_N = S_N \cdot \cos\varphi_N \cdot \eta_N.$$

Виконуючи перетворення формул, що пов'язують активний об'єм постійного магніту, отримується вираз номінальної повної потужності через характеристики постійного магніту:

$$S_N = \frac{\pi^2\sqrt{3} \cdot f_N \cdot B_r \cdot H_c \cdot (d_m^2 - d_0^2) \cdot l_m}{4 \cdot \left(1 + \frac{1}{k_e}\right)} \cdot \cos\varphi_N \cdot \eta_N \quad (2)$$

Прирівнюючи формули повних потужностей (1) і (2) для номінального режиму, отримується математичний зв'язок між електромагнітними навантаженнями статора, характеристиками постійного магніту та енергетичними величинами:

$$\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot A \cdot B_\delta \cdot l_s \cdot K_W = \frac{B_r \cdot H_c \cdot l_m}{\left(1 + \frac{1}{k_e}\right) \cdot \cos\varphi_N \cdot \eta_N} \quad (3)$$

На етапі створення технічного завдання формули (1), (2), (3) допомагають у прийнятті рішення про можливість використання коаксіального лінійного двигуна для заданих потреб, визначитись з розмірами та матеріалом постійних магнітів.

Завдання на проектування лінійного коаксіального двигуна. При отриманні замовлення на проектування двигуна необхідно визначитись з такими величинами: номінальна потужність двигуна P_N , номінальна напруга U_N мережі (визначає номінальну лінійну напругу двигуна), кількість фаз живильної мережі m_s (визначає кількість фаз обмотки статора), номінальна частота живильної мережі f_N (визначається перетворювачем частоти), номінальний коефіцієнт потужності мережі $\cos\varphi_N$, обмеження за масою або габаритними розмірами двигуна, довжина лінійного пересування бігуна.

При з'ясуванні завдання на проектування необхідно мати на увазі, що номінальна потужність лінійного двигуна визначається добутком тягового зусилля F_N та лінійної швидкості пересування бігуна v_N в номінальному режимі:

$$P_N = F_N \cdot v_N.$$

Лінійна швидкість пересування магнітного поля обмотки статора та бігуна уздовж осі для номінального режиму

$$v_N = 2\tau_p \cdot f_N,$$

де τ_p – полюсний крок.

Тому для лінійних двигунів в завданні на проектування можуть зазначатись тягове зусилля F_N або (та) лінійна швидкість пересування v_N .

Живлення електричної частини установки доцільно виконувати від трифазної мережі змінного струму за допомогою станції керування на основі перетворювача частоти. Це дозволить керувати швидкістю пересування робочого органу.

Розрахунок магнітного потоку, що створюється

постійним магнітом, виконується за загальними правилами: визначаються координати точки перетину залежностей магнітного потоку в повітряному проміжку від МРС зовнішнього кола $\Phi_{\delta}(F_{in})$ та магнітного потоку розсіяння від МРС зовнішнього кола $\Phi_{id}(F_{in})$ [5].

Залежність магнітного потоку в повітряному проміжку від МРС зовнішнього кола $\Phi_{\delta}(F_{in})$ є прямою лінією, яка проходить через початок координат та точку з координатами $(\Lambda_{\delta} \cdot H_c \cdot l_m; H_c \cdot l_m)$, де Λ_{δ} – магнітна провідність повітряного проміжку для ротора з аксіальним намагнічуванням постійних магнітів.

Залежність магнітного потоку розсіяння від МРС зовнішнього кола $\Phi_{id}(F_{in})$ є прямою лінією та проходить через точки з координатами $(0; B_r \cdot S_m)$ та $(H_c \cdot l_m; 0)$.

Координати робочої точки магніту (точки перетину залежностей $\Phi_{\delta}(F_{in})$ та $\Phi_{id}(F_{in})$) визначають номінальну МРС магніту F_{nom} та номінальний магнітний потік Φ_{nom} .

Для визначення магнітної провідності повітряного проміжку Λ_{δ} необхідно знати величину полюсного кроку.

Визначення полюсного кроку пов'язано зі складнощами. Полюсний крок статора повинен дорівнювати полюсному кроку бігуна, як і у обертових синхронних машин, $\tau_{ps} = \tau_{pr} = \tau_p$. Величина полюсного кроку повинна бути достатньою для розміщення постійного магніту товщиною l_m та зубцевих поділок статора кількістю $m_s \cdot q_s$, де q_s – кількість пазів на полюс фазу обмотки статора, що буде визначено при її проектуванні. Тому розташування постійних магнітів на бігуні визначається однозначно розмірами паза та зубця статора.

Крім того, при визначенні полюсного кроку бігуна та статора необхідно зважувати на величину тягового зусилля, яке може розвинути двигун в усталеному режимі роботи.

З досвіду проектування полюсний крок пропонується визначати як $\tau_p = (6-8) l_m$.

Проектування статора. Статор коаксіального лінійного двигуна проектується за таким самим порядком, як і статор класичної обертової електричної машини. Відмінності стосуються визначення геометрії пазово-зубцевої зони.

Фазні обмотки статора з'єднуються за схемою Y. В цьому випадку фазна напруга обмотки статора

$$U_{\phi N} = \frac{U_N}{\sqrt{3}}.$$

Номінальний фазний струм обмотки статора

$$I_{sN} = \frac{P_N}{m_s \cdot U_{\phi N} \cdot \cos \varphi_N \cdot \eta_N}.$$

Значення номінального ККД обирається в залежності від призначення двигуна. Так, наприклад, в двигунах для офісної техніки ККД становить близько 0,1, для силового електроприводу – з діапазону 0,5–0,9. Після визначення робочих характеристик уточнюється.

Кількість витків фазної обмотки статора

$$N_s = \frac{k_e \cdot U_{\phi N}}{\pi \sqrt{2} \cdot \Phi_{nom} \cdot f_N \cdot K_{ws}},$$

Площа поперечного перерізу неізолюваного провідника обмотки статора визначається через густину струму J , яка для сучасних мідних проводів знаходиться в межах 4,5–8 А/мм²:

$$S_{QCu} = \frac{I_{sN}}{J_s}.$$

За значенням S_{QCu} обирається стандартний провідник діаметром ізолюваного проводу d_s .

Розміри паза статора визначаються розмірами котушки обмотки статора. З огляду на те, що обмотку статора прийнятніше виконувати зосередженою, з кількістю пазів на полюс і фазу $q_s = 1$, усі витки фазної обмотки повинні розміщуватися в одному пазу. Таким чином площа поперечного перерізу паза статора буде дорівнювати площі поперечного перерізу усіх витків фазної обмотки статора з урахуванням коефіцієнту заповнення K_{Qs} :

$$S_s = N_s \cdot \frac{\pi d_s^2}{4 K_{Qs}}.$$

Коефіцієнт заповнення паза статора K_{Qs} залежить від технології виготовлення котушок обмотки статора, типу проводу обмотки статора, товщини корпусної ізоляції, та може знаходитися в межах 0,5–0,8.

З технологічних міркувань форма паза статора повинна наближатись до квадрату, тобто

$$h_s \approx \sqrt{S_s}.$$

З досвіду проектування висота паза статора h_s повинна приблизно дорівнювати висоті спинки статора h_{ys} .

При великій номінальній напрузі U_N та малій частоті f_N кількість витків фазної обмотки статора N_s стає настільки великою, всі витки неможливо розташувати в одному пазу. Тоді необхідно переходити на розподілену обмотку статора з $q_s \geq 2$.

Остаточні розміри паза статора визначаються після магнітного розрахунку.

Магнітний розрахунок здійснюється за загальними правилами для електричних машин з урахуванням шляху проходження магнітного потоку (рис. 3).

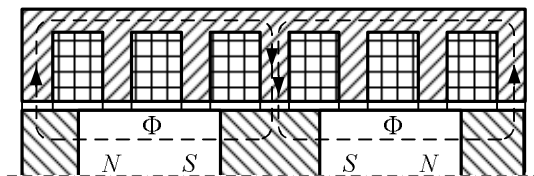


Рис. 3 – Магнітне коло коаксіального лінійного двигуна

Магнітна напруга зовнішнього магнітного кола двигуна F_{out} складається з магнітних напруг ділянок: повітряного проміжку F_{δ} , зубців статора F_{ts} , спинки статора F_{ys} , спинки бігуна F_{yr} :

$$F_{out} = F_{\delta} + F_{ts} + F_{ys} + F_{yr}.$$

Значення магнітної напруги зовнішнього

магнітного кола двигуна, отримане для номінального магнітного потоку, $F_{out\ nom}$ повинно співпадати з номінальною МРС магніту F_{nom} . В іншому випадку необхідно змінити геометрію магнітного кола.

Розрахунок тягового зусилля лінійного коаксіального двигуна. Перевіркою правильності проектування зубцево-пазової зони статора та бігуна на полюсному кроці є розрахунок залежності тягового зусилля від величини лінійного переміщення бігуна в номінальному режимі $F_N(x)$. Вісь координати x жорстко зв'язана зі статором. При проектуванні пропонується використовувати методику, викладену в [4], в якій магнітний потік лінійного двигуна при навантаженні пропонується поділити на складові: магнітний потік, що проходить крізь повітряний проміжок та зникається по магнітопроводу; магнітний потік крайового ефекту, що проходить по боках магнітопроводу, та магнітний потік розсіяння, що проходить повз магнітопровід. При переміщенні бігуна виникає перерозподіл складових магнітних потоків (рис. 4). Тобто магнітний потік є функцією лінійного переміщення x , що впливає на величину тягового зусилля F_N .

При переміщенні бігуна з постійними магнітами, наприклад, праворуч, коли $x > 0$, відбувається перерозподіл магнітних потоків. При розрахунку тягового зусилля вважається, що струм в обмотці статора змінюється за синусоїдним законом з незмінною частотою та амплітудою.

За початкове положення (координата $x = 0$) приймається положення, коли постійні магніти розташовуються симетрично по відношенню до осі котушки фази A (рис. 4, *a*). У міру просування бігуна уздовж розточки статора кожен з трьох магнітних потоків змінює свій шлях та проходить крізь ділянки з різною магнітною провідністю (рис. 4, *б*).

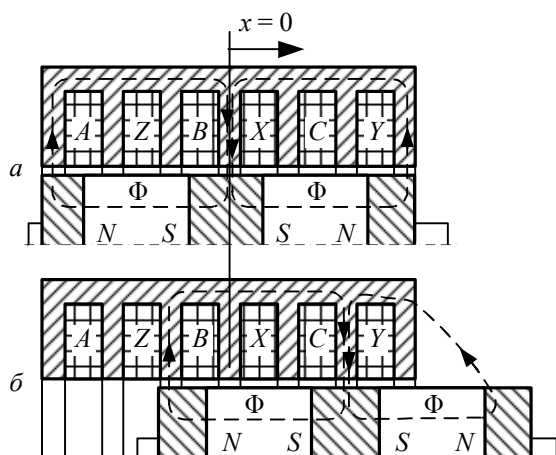


Рис. 4 – Схематичне зображення розподілу магнітного потоку при переміщенні бігуна

В початковому положенні ($x = 0$) електромагнітна сила сягає свого максимального значення. У міру просування бігуна електромагнітна сила змінюється. Змінення електромагнітної сили

залежить від взаємного розташування полюсів статора та ротора. Електромагнітна сила в межах одного полюсного кроку повинна змінюватись незначно, що свідчатиме про сталу роботу двигуна.

При виконанні цієї умови розміри коаксіального лінійного двигуна можна вважати остаточними.

Приклад проектування лінійного коаксіального двигуна. За запропонованою методикою було спроектовано коаксіальний лінійний двигун для занурюваного плунжерного насоса (рис. 5). Бігун складається з постійних магнітів 1 та кільцевих шайб 2 для проведення магнітного потоку. Статор складається з котушок обмотки статора 3 та профільованих шайб 4, що утворюють зубці та спинку статора. Двигун монтується безпосередньо в обсадній трубі (на рис. 5 не показано). Двигун розраховувався на номінальну потужність 500 Вт, номінальну напругу 30 В, номінальний коефіцієнт потужності 0,9 з частотою 5 Гц через перетворювач частоти. Обмежуючим фактором був зовнішній діаметр статора, який становив 117 мм. Ця умова викликана діаметром обсадної труби, де монтується двигун.

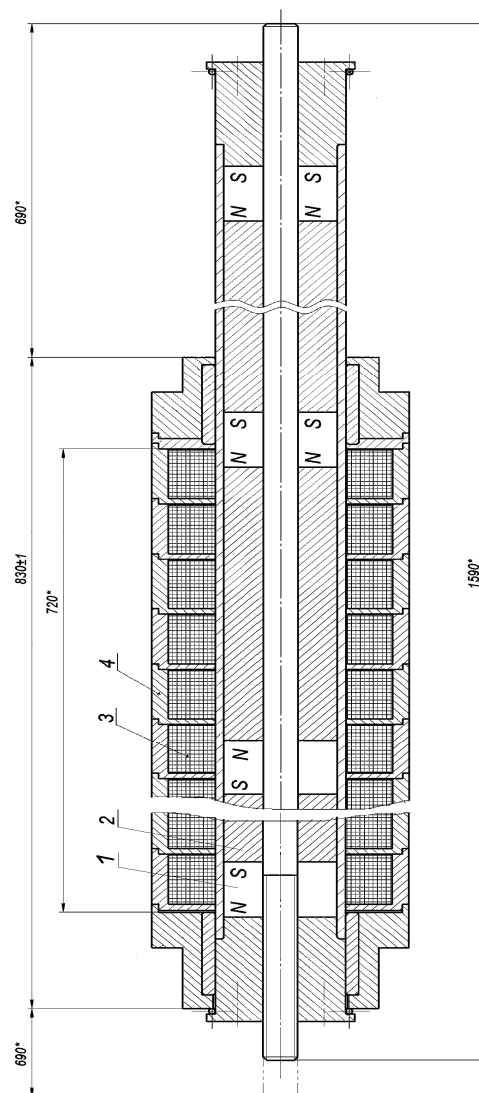


Рис. 5 – Загальний вигляд коаксіального лінійного двигуна потужністю 500 Вт для занурюваного насоса

Для забезпечення ходу штока на 500 мм кількість постійних магнітів на роторі становить 16. Було обрано

кільцевий постійний магніт Nd-Fe-B зі стандартними розмірами: зовнішнім діаметром 60 мм, внутрішнім діаметром 15 мм, товщиною 30 мм; остаточною магнітною індукцією 1,26 Тл, коерцитивною силою 10^6 А/м. Повітряний проміжок між статором і бігуном обрано величиною 0,5 мм за технологічними умовами складання двигуна, а саме, можливості заведення ротора до статора. Обмотка статора виконана чотириполюсною. Фазна обмотка статора, що складається з 290 витків, з кількістю пазів на полюс і фазу 2. Трифазна обмотка статора займає 24 паза висотою 20 мм, шириною 27 мм.

На полюсному кроці довжиною 179 мм забезпечується тягове зусилля величиною 3,8 кН.

Висновки. Специфічність методики проектування коаксіальних лінійних двигунів з постійними магнітами викликана особливостями конструкції та застосування цих двигунів.

Електромагнітні навантаження визначаються за формулою машинної постійної з урахуванням об'єму постійного магніту. При узгодженні технічного завдання на проектування необхідно зазначити специфічні номінальні дані. Наприклад, лінійний рух бігуна обумовив появу лінійної швидкості замість кутової в обертових електричних машинах. Поява тягового зусилля в технічному завданні на проектування викликана особливостями роботи двигунів в безредукторному електроприводі. Хід штоку залежить від призначення двигуна.

При розрахунку магнітного потоку, що створюється постійними магнітами на бігуні, необхідно враховувати специфіку визначення полюсного кроку, який залежить від розмірів пазово-зубцевої зони статора. Розміри осердя статора визначаються умовами розташування котушок обмотки статора, а потім перевіряються при магнітному розрахунку за величинами магнітної індукції в зубцях та спинці.

Розрахунок тягового зусилля на полюсному кроці є остаточною перевіркою правильності обраних розмірів активної частини двигуна. Приклад проектування коаксіального лінійного двигуна з постійними магнітами для занурюваного плунжерного насоса довів спроможність запропонованої методики проектування.

Список літератури

1. *Голенков Г. М.* Электромеханические характеристики коаксиально-линейного двигателя с аксиальным и радиальным направлениями намагничивания постоянных магнитов / *Г. М. Голенков, Мохсен Аббасян* // *Технічна електродинаміка*. – 2014. – № 3. – С. 64–69.
2. *Копылов И. П.* Проектирование электрических машин / *И. П. Копылов, Ф. А. Горяинов, Б. К. Клоков и др.* Под ред. *И. П. Копылова*. – М.: Издательство Юрайт, 2011. – 767 с.
3. Офіційний сайт ВАТ фірма «МАГНЕТ». – Режим доступу: <http://www.magnet.com.ua/magnet.html>. – Дата звертання: 25 квітня 2017.
4. *Хитерер М. Я.* Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения / *М. Я. Хитерер, И. Е. Овчинников* – СПб.: КОРОНА принт, 2004. – 366 с.
5. *Балагуров В. А.* Электрические машины с постоянными магнитами / *В. А. Балагуров, Ф. Ф. Галтеев, А. Н. Ларионов* – М. – Л.: «Энергия», 1964. – 479 с.

References (transliterated)

1. *Golenkov G. M., Mohsen Abbasian.* Elektromechanicheskie karakteristiki koaksial'no-linejnogo dvigatelja s aksial'nym i radial'nym napravlenijami namagnichivanija postojannyh magnitov [Electromechanical characteristics coaxial-linear motor with axial and radial direction of magnetization permanent magnets]. *Tehnichna Elektrodinamika*. 2014, no. 3, pp. 64–69.
2. *Kopylov I. P., Goryainov F. A., Klovov B. K.* *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Design of electrical machines]. Moscow, Yurait Publ, 2011, 767 p.
3. The official website of the company LTD «MAGNET»/ Available at: <http://www.magnet.com.ua/magnet.html>. (accessed 24.04.2017).
4. *Hiterer M. Ya., Ovchinnikov I. E.* *Sinhronnye elektricheskie mashiny vozvratno-postupatel'nogo dvizhenija* [Synchronous electric machines for reciprocating motion]. St. Petersburg, KORONA print, 2004, 366 p.
5. *Balagurov V. A., Galteev F. F., Larionov A. N.* *Elektricheskie mashiny s postojannymi magnitami* [Electric machines with permanent magnets]. Moscow – St. Petersburg, Energia, 1964, 479 p.

Надійшла (received) 03.05.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Особливості проектування коаксіальних лінійних двигунів з постійними магнітами / О. Ю. Юр'єва // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 1 (1223). – С. 125–130. – Библиогр.: 5 назв. – ISSN 2409-9295.

Особенности проектирования коаксиальных линейных двигателей с постоянными магнитами / Е. Ю. Юрьева // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 1 (1223). – С. 125–130. – Библиогр.: 5 назв. – ISSN 2409-9295.

Design Features of Coaxial Linear Motor with Permanent Magnets / О. Yu. Yurieva // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – No. 1 (1223). – P. 125–130. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2409-9295.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Юр'єва Олена Юрївна, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних машин, тел. (057)707-68-44, e-mail: ele6780@gmail.com.

Юрьева Елена Юрьевна, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры электрических машин, тел. (057)707-68-44, e-mail: ele6780@gmail.com.

Yurieva Olena Yuriyivna, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Associate Professor at the Department of Electrical machines, tel. +38 (057) 707-68-44, e-mail: ele6780@gmail.com.