

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"**

АББАСІАН МОХСЕН



УДК 621.313.84: 69.0025-192-868

**КОАКСІАЛЬНО-ЛІНІЙНИЙ ДВИГУН З
ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ У ВІБРАЦІЙНІЙ СИСТЕМІ
ЗАНУРЮВАЧА БУДІВЕЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

Спеціальність 05.09.01 – електричні машини й апарати

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електротехніки та електроприводу Київського національного університету будівництва і архітектури Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Голенков Геннадій Михайлович,
Київський національний університет будівництва і архітектури,
доцент кафедри електротехніки та електроприводу

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Болюх Володимир Федорович,
Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут",
професор кафедри загальної електротехніки

кандидат технічних наук
Карлов Олексій Миколайович,
Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ,
науковий співробітник відділу
електромагнітних систем

Захист дисертації відбудеться " __02__ " __06__ 2016 р. о __12:30__ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою:
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою:
61000, Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розіслано " __27__ " __Квітень__ 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



О.Ю. Юр'єва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Застосування коаксіально-лінійних двигунів з аксіальним вектором намагнічування постійних магнітів на основі рідкоземельних матеріалів NdFeB для привода робочого органу вібраційного обладнання для занурення будівельних елементів дозволило поліпшити техніко-економічні показники. Однак розрахунок та побудова даного двигуна обмежені за потужністю до 10 кВт через технологічну складність виготовлення полюсів з аксіальним вектором намагнічування постійних магнітів. З метою побудови двигуна для приводу занурювача будівельних елементів потужністю 30 кВт і більше запропоновано конструкцію двигуна, де полюси були виготовлені з постійних магнітів з радіальним вектором намагнічування.

У наявних наукових роботах визначена перспективність досліджень електромагнітних процесів та методів розрахунку електроmechanічних та частотних характеристик коаксіально-лінійних двигунів з постійними магнітами. Доцільним є також відзначення рекомендації щодо вибору більш енергоефективного із запропонованих коаксіально-лінійних двигунів з аксіальним і радіальним вектором намагнічування постійних магнітів для вібраційного обладнання при однакових вагових, конструктивних та електричних параметрах для побудови віброзанурювачів будівельних елементів.

Таким чином, науково-практична задача з впровадження відзначених пристроїв потребує вдосконалення методів розрахунку електромагнітних, електроmechanічних та частотних характеристик коаксіально-лінійних двигунів з постійними магнітами та визначення більш енергоефективного з двох запропонованих двигунів. У зв'язку з цим тема дисертаційної роботи є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі електротехніки та електроприводу Київського національного університету будівництва і архітектури у рамках завдань держбюджетної НДР МОН України: "Автоматизовані електроmechanічні системи та вимірювальні комплекси" (№ ДР 0112U005112), де здобувачем проведено дослідження коаксіально-лінійних двигунів з постійними магнітами у вібраційній системі занурювача будівельних елементів.

Мета та задачі дослідження. *Мета дослідження* – створення високонадійного коаксіально-лінійного двигуна з постійними магнітами для привода робочого органу вібраційного обладнання будівельних елементів, що забезпечує його енергоефективність за рахунок удосконалення магнітної системи.

Для досягнення мети поставлені наступні завдання:

- проаналізувати стан досліджень коаксіально-лінійного двигуна з постійними магнітами для привода віброзанурювача будівельних елементів;
- розробити методи розрахунку параметрів та характеристик розподілу магнітної індукції в повітряному проміжку коаксіально-лінійних двигунів з аксіальним та радіальним вектором намагнічування постійних магнітів без струму та зі струмом в обмотках статора;

- удосконалити методи розрахунку електромеханічних тягових та частотних характеристик коаксіально-лінійного двигуна з постійними магнітами при статичному та динамічному режимах роботи вібраційного обладнання;

- розробити схеми заміщення для коаксіально-лінійних двигунів з аксіальним та радіальним вектором намагнічування постійних магнітів;

- виготовити експериментальні стенди для отримання статичних та динамічних характеристик коаксіально-лінійного двигуна з постійними магнітами;

- проаналізувати ефективність застосування коаксіально-лінійних двигунів з аксіальним та радіальним вектором намагнічування постійних магнітів з однаковою конструкцією, однаковими параметрами статора та рівними за масою магнітами у вібраційному обладнанні на основі порівняння електромагнітних, електромеханічних та частотних характеристик, отриманих при статичному та динамічному режимах роботи.

Об'єктом дослідження є електромагнітні та електромеханічні процеси коаксіально-лінійного двигуна з постійними магнітами вібраційних систем.

Предмет дослідження – конструктивні параметри коаксіально-лінійного двигуна з аксіальним та радіальним вектором намагнічування постійних магнітів вібраційної системи занурювача будівельних елементів.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених завдань з розрахунку електромагнітних, електромеханічних, тягових та частотних характеристик коаксіально-лінійного двигуна з постійними магнітами використані теорія електромагнітного поля, теорія електричних кіл та теорія механічних коливань. Дослідження розподілу магнітної індукції здійснювалось за допомогою комп'ютерного моделювання методом кінцевих елементів. Інструментом аналізу магнітного поля застосовано програмний комплекс Comsol Multiphysics, для побудови геометрії моделей для імпортування – AutoCAD. Апроксимуючі криві розподілу магнітної індукції електромеханічних, тягових та частотних характеристик отримані за допомогою методу найменших квадратів програмного пакету Microsoft Excel. Верифікація результатів теоретичних досліджень та моделювання проводилась на експериментальному стенді для випробування фізичних моделей коаксіально-лінійних двигунів з аксіальним та радіальним векторами намагнічування постійних магнітів.

Наукова новизна отриманих результатів:

- здійснено подальший розвиток теоретичних та експериментальних досліджень коаксіально-лінійного двигуна з радіальним вектором намагнічування постійних магнітів, що дозволило науково обґрунтувати оптимальний вибір для привода вібраційного обладнання, яке дозволяє занурювати довгомірні будівельні елементи;

- вперше отримано вирази, що описують тягові та хід-амперні характеристики коаксіально-лінійних двигунів з аксіальним та радіальним вектором намагнічування постійних магнітів, що забезпечують проектування двигунів та створення енергоефективного вібраційного обладнання;

– удосконалено математичну модель роботи коаксіально-лінійного двигуна з постійними магнітами вібраційної системи для дослідження динамічних режимів, яка дозволяє, на відміну від відомих моделей, розрахувати амплітудно-та фазо-частотну характеристики, а також залежності інерційних сил від частоти напруги живлення.

Практичне значення отриманих результатів для електромашинобудування полягає у створенні методики розрахунку параметрів коаксіально-лінійного двигуна з радіальним вектором намагнічування постійних магнітів для вібраційної системи. Запропоновано конструктивні рішення коаксіально-лінійного двигуна з постійними магнітами для привода робочого органу віброзанурювачів довгомірних будівельних елементів (палі, труби, шпунти тощо) в ґрунт.

Результати досліджень у вигляді розрахункових електромеханічних, тягових та частотних характеристик статичних та динамічних режимів коаксіально-лінійних двигунів з аксіальним та радіальним вектором намагнічування постійних магнітів, а також конструктивні рішення цих двигунів для вібраційного обладнання впроваджені в НПП "Промелектрообладнання" (м. Київ) та використовувались при створенні нових зразків вібраторів ТОВ «ОПТИМА-Ф» (м. Київ).

Розроблена методика розрахунку електромеханічних параметрів коаксіально-лінійного двигуна з постійними магнітами електромеханічних систем вібраційного обладнання використовується у навчальному процесі Київського національного університету будівництва і архітектури під час викладання дисциплін "Електротехніка та електромеханіка", "Автоматизований електропривід (спеціальні розділи)", а також при виконанні магістерських робіт та дипломного проектування.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота містить теоретичні положення та результати, що отримані здобувачем особисто. Серед них: розробка методів розрахунку параметрів та характеристик розподілу магнітної індукції в повітряному проміжку двигунів коаксіально-лінійних двигунів з аксіальним та радіальним векторами намагнічування постійних магнітів без струму та зі струмом в обмотках статора; обґрунтування підходу щодо розрахунку електромеханічних тягових та хід-амперних характеристик двигунів, а також частотних характеристик вібраційних систем занурювачів; розробка схем заміщення для двигунів з аксіальним та радіальним вектором намагнічування постійних магнітів. Здобувач брав безпосередню участь у виготовленні коаксіально-лінійного двигуна з постійними магнітами, експериментальних стендів для зняття статичних та динамічних характеристик.

Апробація результатів дисертації. Основні положення роботи доповідались та обговорювались на: XIII Міжнародній науково-технічній конференції "Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації" (Кременчук, 2011 р.); Міжнародних симпозіумах "Проблеми вдосконалення електричних машин та апаратів" (Харків, 2012–2015 р.р.); наукових конференціях

молодих вчених, аспірантів та студентів КНУБА (Київ, 2011–2014 р.р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 8 наукових праць, з них 6 статей у наукових фахових виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз (одна – у базі Scopus), 2 – у матеріалах конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації становить 140 сторінок, серед них: 105 рисунків по тексту; 8 таблиць по тексту; список використаних джерел зі 104 найменувань на 13 сторінках; 2 додатки на 10 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету та задачі дослідження, відображені наукова новизна та практична цінність роботи, наведені відомості про апробацію результатів роботи, особистий внесок здобувача, кількість публікацій за темою.

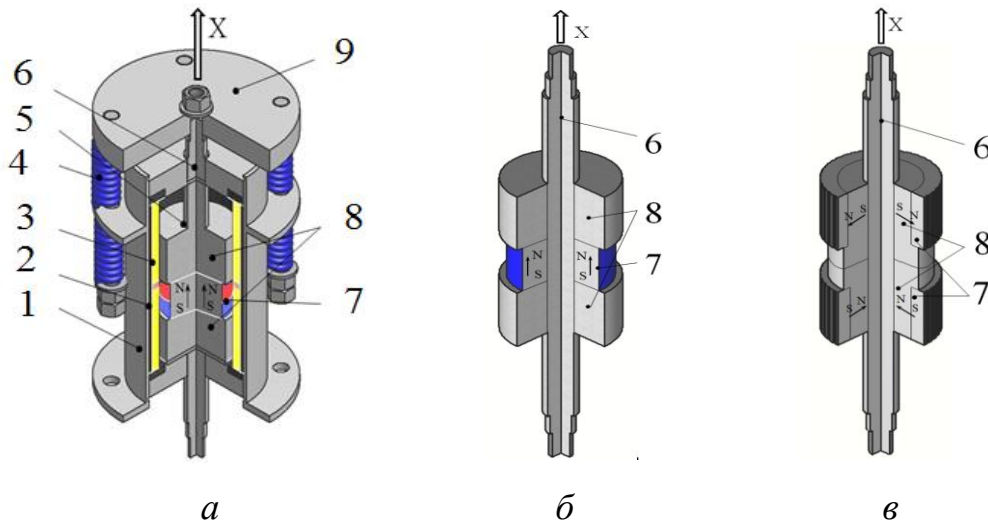
В першому розділі проведено аналіз існуючих гідравлічних та електромеханічних систем для занурення будівельних елементів, їхні конструктивні, енергетичні та електромеханічні характеристики, а також аналіз лінійних двигунів з постійними магнітами, які можуть використовуватись в якості приводу робочих органів віброзанурювачів.

Визначено, що перспективним є вивчення рекомендацій з вибору та ефективного застосування у вібраційному обладнанні коаксіально-лінійних двигунів з аксіальним та радіальним вектором намагнічування постійних магнітів (КЛД-ПМ-А та КЛД-ПМ-Р відповідно) з однаковими конструктивними параметрами статора та однаковими за масою постійними магнітами. Електромеханічні та частотні характеристики розподілу магнітного потоку отримані теоретично при статичному та динамічному режимах роботи та підтверджені експериментальними даними. Запропоновані схеми заміщення КЛД-ПМ потребують подальшого удосконалення відображення фізичних процесів, які характеризують роботу вібраційних систем у динамічному режимі. На основі проведеного аналізу зроблено висновок про доцільність розробки методів дослідження та вибору більш ефективного КЛД-ПМ з двох запропонованих КЛД з аксіальним та радіальним вектором намагнічування постійних магнітів для приводу робочого органу вібраційного пристрою занурення будівельних елементів.

Другий розділ присвячено комп'ютерному моделюванню електромагнітних, електромеханічних та частотних процесів, які виникають у коаксіально-лінійному двигуні з аксіальним та радіальним вектором намагнічування постійних магнітів при статичному та динамічному режимах, а також розробці схеми заміщення. Для дослідження електромагнітних, електромеханічних та частотних характеристик досліджувались КЛД (рис.1) з аксіальним та радіальним вектором намагнічування постійних магнітів, його конструктивні розміри та електричні параметри. Проведено порівняння характеристик та енергетичних витрат при використанні

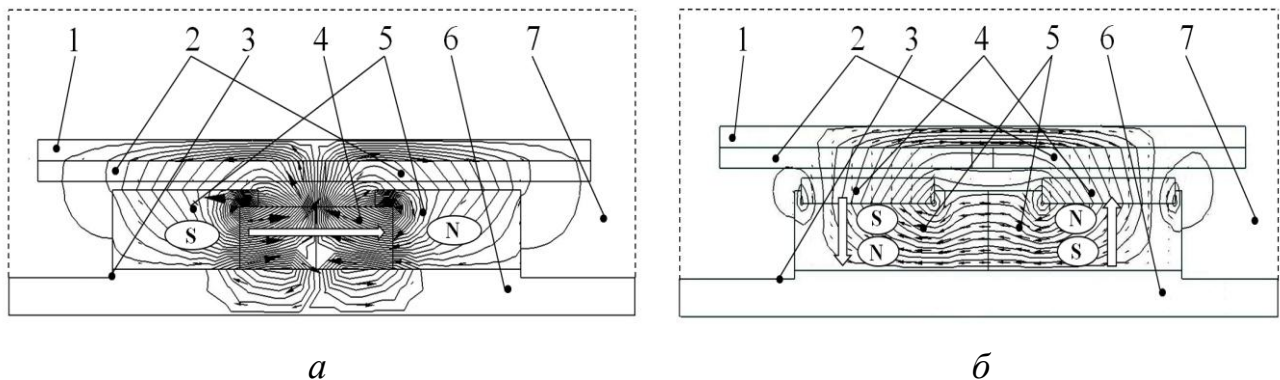
коаксіально-лінійного двигуна з постійними магнітами при однакових конструктивних та масо-габаритних параметрах двигунів.

Для розрахунку розподілу магнітної індукції в межах довжини статора КЛД-ПМ тягових та хід-амперних характеристик розроблені комп'ютерні моделі двигунів (рис. 2) в програмному пакеті Comsol Multiphysics.



1 – статор; 2 – магнітопровід статора; 3 – обмотки статора; 4 – пружини;
5 – бігун з постійними магнітами; 6 – стрижень бігуна; 7 – постійні магніти;
8 – концентратори магнітного потоку (полюси); 9 – додаткова маса.

Рисунок 1 – Схематичне зображення коаксіально-лінійного двигуна з постійними магнітами: *а* – КЛД з постійними магнітами; *б* та *в* – бігуни з аксіальним та радіальним вектором намагнічування



1 – обмотка статора; 2 – магнітопровід статора; 3 – бігун; 4 – постійні магніти (ПМ); 5 – концентратори магнітних потоків (полюси); 6 – металевий стрижень бігуна (немагнітний); 7 – повітряне середовище.

Рисунок 2 – Схематичне зображення моделей КЛД- ПМ: *а* – з аксіальним; *б* – з радіальним вектором намагнічування постійних магнітів

В основу комп'ютерного моделювання роботи двигуна покладені наступні співвідношення. Розподіл магнітної індукції розраховувався у циліндричній системі координат в площині $\rho\phi$ та $\chi\phi$ для векторного потенціалу $\mathbf{A}$ відповідно для двигунів з аксіальним та радіальним вектором намагнічування постійних магнітів, який має єдину ϕ -компоненту в магнітостатичному наближенні.

З системи диференційних рівнянь Максвелла:

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J}, \quad \mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}, \quad (1)$$

а також рівняння стану магнітного матеріалу для стаціонарного магнітного поля без струму в обмотці статора та квазістаціонарного магнітного поля зі струмом в обмотці статора, відповідно:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \mathbf{H} + \mathbf{B}_r; \quad (2)$$

$$\mathbf{B} = \mu_{\text{eff}}(\mathbf{B}) \cdot \mathbf{H}, \quad (3)$$

отримується рівняння векторного потенціалу для стаціонарного і квазістаціонарного магнітних полів, відповідно:

$$\text{rot} \left[\frac{\text{rot} \mathbf{A}}{\mu_0 \cdot \mu_r} - \frac{\mathbf{B}_r}{\mu_0 \cdot \mu_r} \right] = \mathbf{J}; \quad (4)$$

$$\text{rot} \left[\frac{\text{rot} \mathbf{A}}{\mu_{\text{eff}}(\mathbf{B})} \right] = -j\omega\sigma\mathbf{A} + \mathbf{J}, \quad (5)$$

де $\mathbf{H}$ – вектор напруженості магнітного поля, А/м; $\mathbf{B}$ – вектор магнітної індукції, Тл; $\mathbf{B}_r$ – залишкова магнітна індукція, Тл; $\mathbf{A}$ – векторний потенціал, Вб/м²; $\mathbf{J}$ – щільність струму в обмотці статора (вважається відомою величиною), А/мм²; μ_0 – магнітна проникність вакууму; μ_r – відносна магнітна проникність; $\mu_{\text{eff}}(\mathbf{B})$ – ефективна магнітна проникність, залежить від величини $\mathbf{B}$, Г/м; ω – кутова частота, рад/с; σ – електропровідність матеріалу бігуна, Ом⁻¹.

Розрахунок величини електромагнітної сили F_z , що діє на бігун, виконувалась на підставі тензора напруги Максвелла $\mathbf{T}$

$$F_z = \iint_S 2\pi \cdot r \cdot n \cdot T_z dS, \quad (6)$$

де r – відстань від вісі симетрії до поверхні інтегрування dS , n – одиничний вектор нормалі до активної поверхні бігуна S . Враховано тільки вісьова компонента сили F_z .

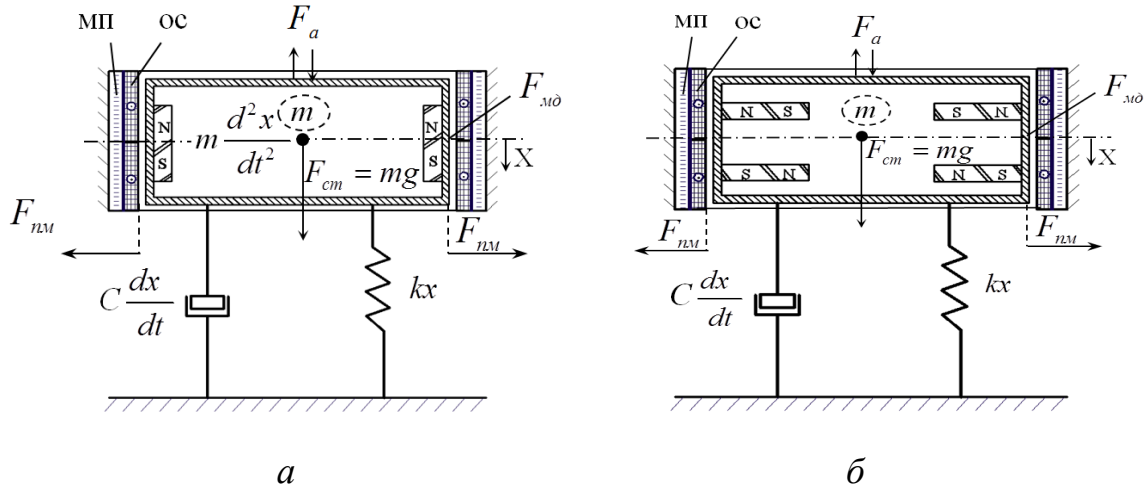
На основі рівнянь (4),(5) і (6) при відповідних початкових та граничних умовах досліджуються параметри кривих електромагнітних полів КЛД-ПМ з аксіальним та радіальним вектором намагнічування постійних магнітів.

Диференційне рівняння вимушених коливань вібраційних систем на основі механічних схем (рис.3) КЛД-ПМ має вигляд:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = F_{a(\max)} \cos \omega t + F_{\text{ст}} - \Sigma F_{\text{пм}}, \quad (7)$$

де m – маса рухомої частини вібратора (бігуна), кг; $F_{a(\max)}$ – максимальне значення амплітуди примушуючої сили, Н; $F_{\text{ст}}$ – статичне навантаження

($F_{ст} = mg$), Н; $F_{пм}$ – сила притягіння постійних магнітів, Н; c – коефіцієнт в'язкого тертя, кг/с; Q – добротність контура коливальної системи; k – коефіцієнт жорсткості пружини, Н/мм; x – переміщення бігуна, м; t – час, с.



мп – магнітопровід статора КЛД-ПМ; ос – обмотка статора;
NS – постійні магніти.

Рисунок 3 – Еквівалентні механічні схеми вібраційних систем на основі КЛД-ПМ: *а* – з аксіальним; *б* – радіальним вектором намагнічування постійних магнітів

Після інтегрування рівняння (7) з відповідними початковими умовами отримуються вирази амплітудно-частотних та фазо-частотних характеристик, відповідно:

$$x_a = \frac{F_{a(max)}}{m \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4h^2 \omega^2}}; \quad (8)$$

$$\varphi = \arctg \frac{2h\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}, \quad (9)$$

де $h = c/2m$; ω_0 – власна кутова частота вібраційної системи ($\omega_0 = (k/m)^{1/2}$), c^{-1} .

Співвідношення (8) і (9), які є основою для побудови амплітудно-частотних та фазо-частотних характеристик, використовуються для аналізу інерційних сил під час роботи коаксіально-лінійних двигунів з постійними магнітами у динамічному режимі.

Розроблено еквівалентні електричні схеми заміщення КЛД-ПМ зі змішаним та послідовним з'єднанням елементів (рис. 4), які є доцільними для побудови векторних діаграм.

Рівняння напруг в комплексній формі для електричних схем заміщення зі змішаним та з послідовним з'єднанням елементів, відповідно:

$$\underline{U} = \underline{RI} + jX\underline{I} + \underline{U}_s - \underline{E}_{(ax,rad)}; \quad (10)$$

$$\underline{U} = \underline{RI} + jX\underline{I} + \underline{U}_{sm} - \underline{E}_{sm}, \quad (11)$$

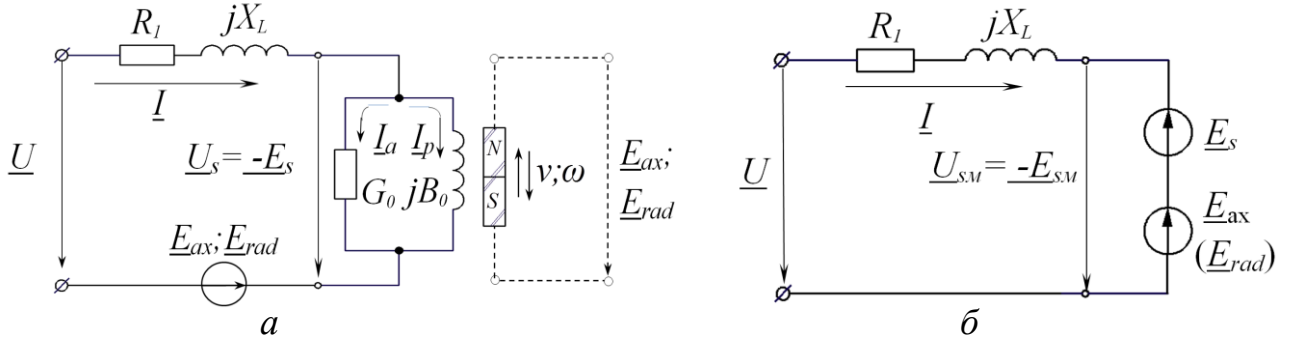


Рисунок 4 – Схема заміщення КЛД-ПМ: *а* – схема заміщення зі змішаним з'єднанням елементів; *б* – з послідовним з'єднанням елементів

де $\underline{U}$ – підведена напруга, В; $G_0 = I_a/U_s$ – активна та $B_0 = I_p/U_s$ – індуктивна провідність контура намагнічування, Ом^{-1} ; $I_p = (I^2 - I_a^2)^{1/2}$ – реактивний та $I_a = P_{\text{ст}}/U_s$ – активний струми контура намагнічування, А; I – струм в обмотці статора, А; $\underline{U}_{sm} = -\underline{E}_{sm} = -\underline{E}_s - \underline{E}_{ax}$ (або $\underline{U}_{sm} = -\underline{E}_{sm} = -\underline{E}_s - \underline{E}_{rad}$) – векторна сума ЕРС, В; $\underline{E}_s$ – ЕРС, яка наводиться магнітним потоком у магнітопроводі статора, В:

$$-\underline{E}_s = \underline{U}_s = j2\pi f w_s \Phi_{\text{max}} / \sqrt{2} = j4,44 f w_s B_s \Delta S_s, \quad (12)$$

де B_s – діюче значення магнітної індукції при проходженні змінного струму з частотою f в обмотках статора КЛД-ПМ, Тл; w_s – кількість витків у обмотках статора; ΔS_s – активна площа магнітопровода статора, м^2 ; $\underline{E}_{ax}$ та $\underline{E}_{rad}$ – ЕРС, що виникає при зворотньо-поступальному русі бігуна з постійними магнітами, вектори намагнічування яких направлені аксіально та радіально, відповідно:

$$\underline{E}_{ax} = j\pi B_{ax} w_s D_{ak} x_{axi} f_i / \sqrt{2}; \quad (13)$$

$$\underline{E}_{rad} = j\pi B_{rad} w_s D_{ak} x_{radi} f_i / \sqrt{2}, \quad (14)$$

де B_{ax} та B_{rad} – амплітудні значення магнітної індукції КЛД-ПМ-А та КЛД-ПМ-Р відповідно, Тл; D_{ak} – середній діаметр котушок обмоток статора, м; x_{axi} та x_{radi} – амплітуда коливання бігуна, м; f_i – частота коливання бігуна, Гц.

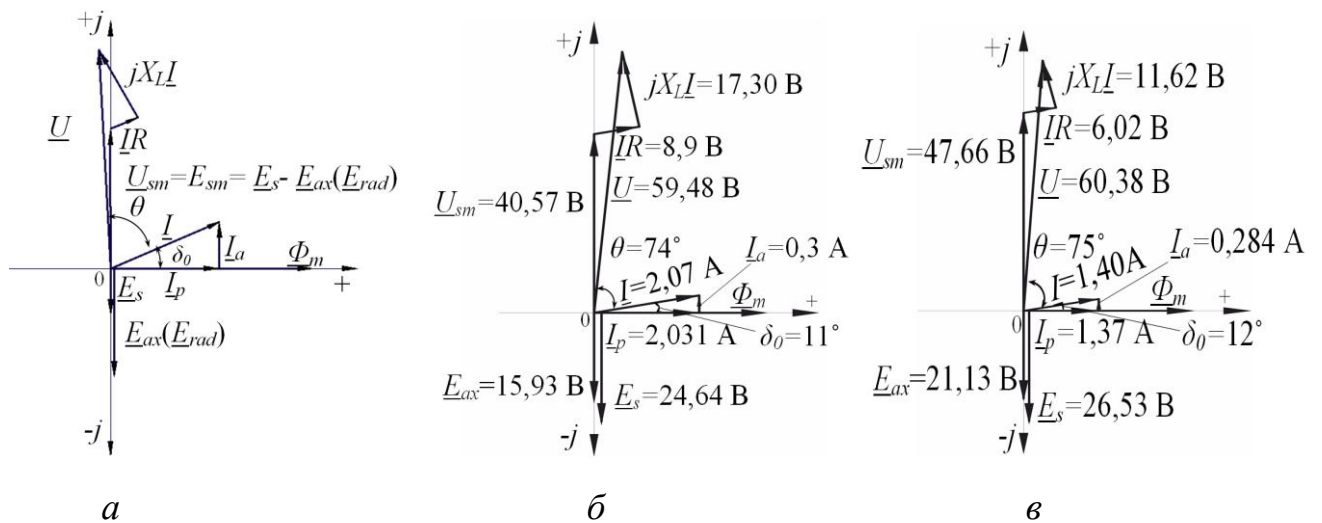


Рисунок 5 – Векторні діаграми: *а* – загальний вигляд; *б* – КЛД-ПМ-А; *в* – КЛД-ПМ-Р при розрахунковій власній резонансній частоті КЛД-ПМ $f_0 = 24,2$ Гц

При побудові векторних діаграм (рис. 5) КЛД-ПМ використовуються вирази (10–14) та еквівалентна електрична схема заміщення (рис. 4).

В третьому розділі проведено експериментальні дослідження розподілу магнітної індукції (рис. 6) в межах довжини статора КЛД-ПМ-А та КЛД-ПМ-Р. Експериментальні дослідження розподілу магнітної індукції на поверхні бігунів, в немагнітному проміжку без обмотки статора, у повітряному проміжку без струму та зі струмом в обмотці статора коаксіально-лінійних двигунів з аксіальним і радіальним вектором намагнічування постійних магнітів проводились на стендах в лабораторії кафедри електротехніки та електроприводу КНУБА.

Проаналізовано розбіжності значень магнітної індукції між розрахунковими та експериментальними даними, а також проведено порівняння амплітудних значень магнітної індукції в повітряному проміжку двигунів КЛД-ПМ-А та КЛД-ПМ-Р.

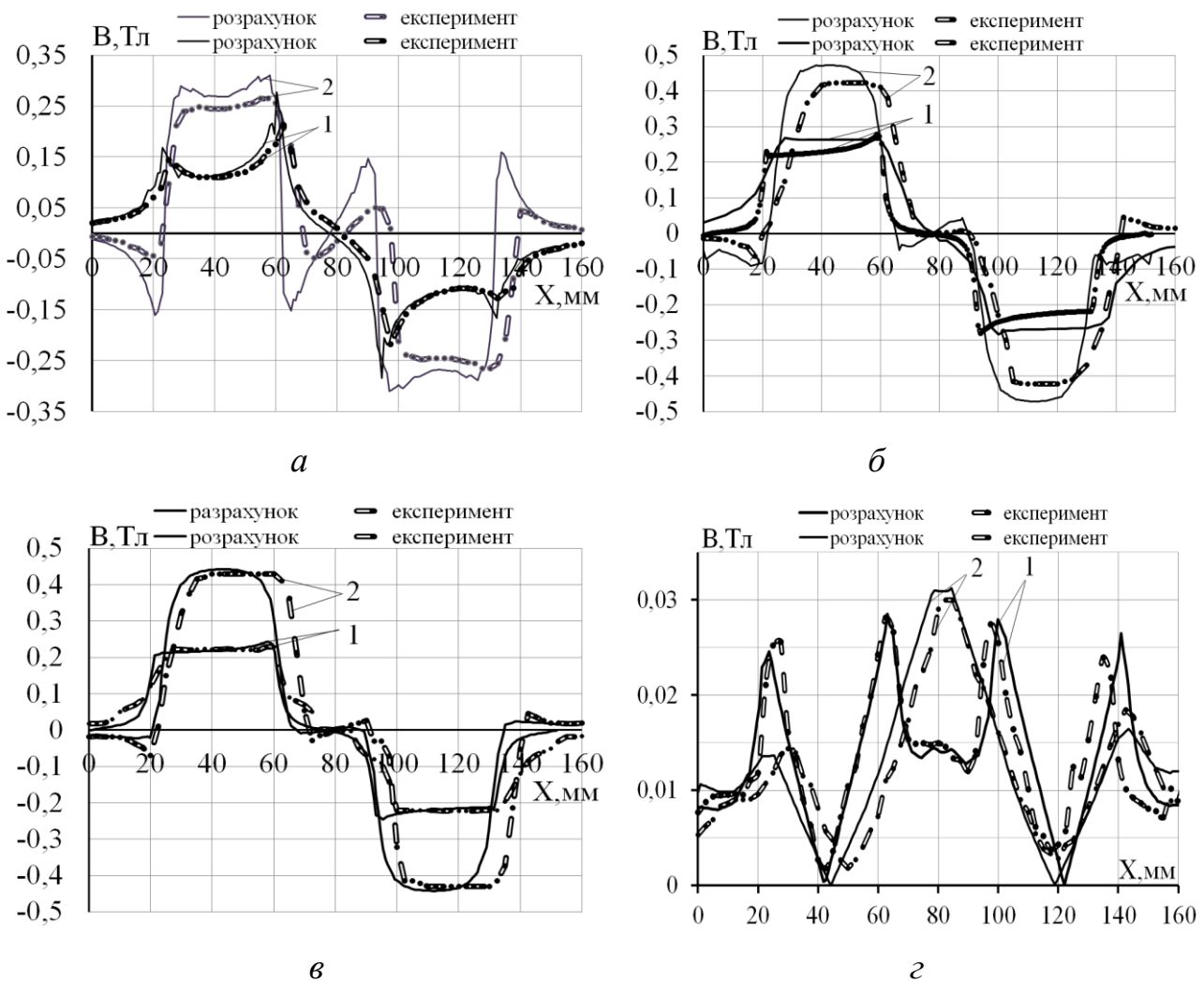


Рисунок 6 – Криві розподілу магнітної індукції 1 – КЛД-ПМ-А; 2 – КЛД-ПМ-Р: а – на поверхні бігуна ($\delta_{rh} = 1,5$ мм); б – в немагнітному проміжку без обмотки статора ($\delta_{rh} = 1$ мм); в – у повітряному проміжку без струму ($\delta_{rh} = 1$ мм); г – зі струмом в обмотці статора ($\delta_{rh} = 1,5$ мм)

При побудові розрахункових кривих магнітної індукції (рис. 6) в повітряному проміжку КЛД-ПМ-А та КЛД-ПМ-Р використано комп'ютерне моделювання двигунів у програмному пакеті Comsol Multiphysics.

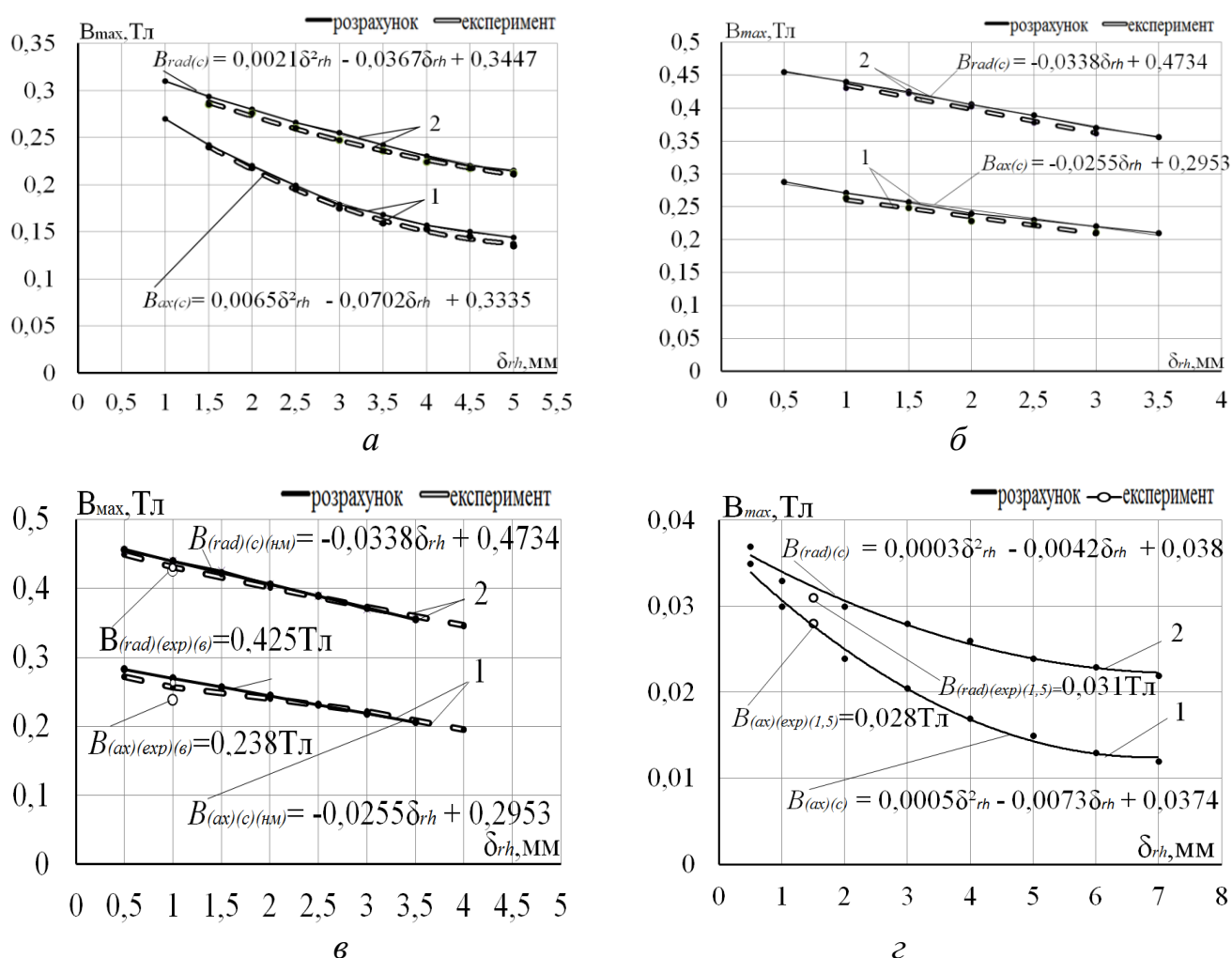


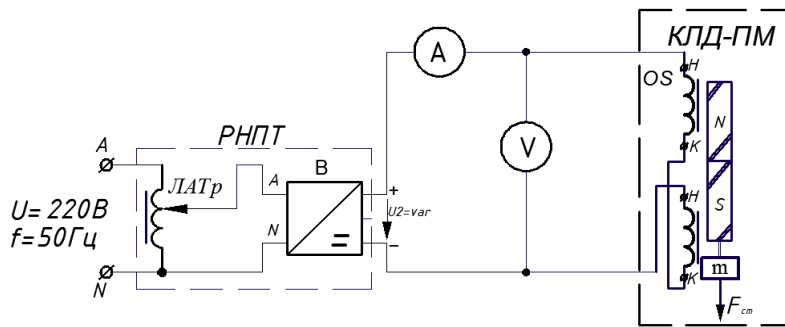
Рисунок 7 – Залежності $B_{max}(\delta_{rh})$ 1 – КЛД-ПМ-А, 2 – КЛД-ПМ-Р:

a – на поверхні бігуна без магнітопровода статора; *б* – в немагнітному зазорі без обмотки статора; *в* – у повітряному проміжку без струму в обмотці статора; *з* – у повітряному проміжку зі струмом в обмотці статора

Отримані при дослідженні вирази апроксимуючих кривих $B_{max}(\delta_{rh})$ на основі метода найменших квадратів дозволяють визначити максимальні значення магнітної індукції при різних радіальних висотах у повітряному проміжку двигунів та можуть використовуватись при розрахунках тягового зусилля коаксіально-лінійного двигуна з постійними магнітами для привода електромеханічних систем вібраційного обладнання.

У четвертому розділі проведено експериментальні дослідження тягових, хід-амперних та частотних характеристик при статичному та динамічному режимах роботи коаксіально-лінійних двигунів з постійними магнітами. Експериментальні дослідження тягових та хід-амперних характеристик КЛД-ПМ

проводились на стендах в лабораторії кафедри електротехніки та електроприводу (рис. 8).



КЛД-ПМ – коаксіально-лінійний двигун з постійними магнітами;

OS – обмотка статора; SN – постійні магніти; А – амперметр; V – вольтметр;

РНПТ – регулятор напруги постійного струму, який складається з лабораторного автотрансформатора ЛАТр та випрямувача В.

Рисунок 8 – Принципова електрична схема стенду

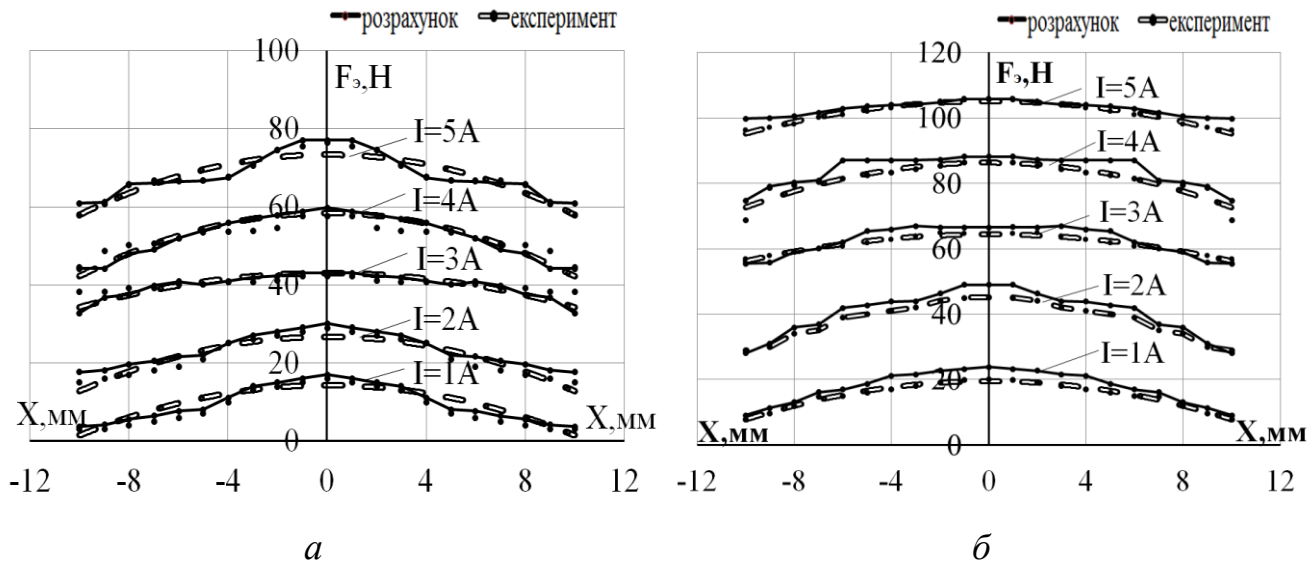


Рисунок 9 – Сімейство електромеханічних тягових характеристик:

a – КЛД-ПМ-А; *б* – КЛД-ПМ-Р

Дослідження тягових $F_z(x)$ характеристик КЛД-ПМ (рис. 9) проводились при переміщенні бігуна в межах $\tau/4$ та струмах від 1 до 5 А.

Залежності коефіцієнта жорсткості тягових характеристик від переміщення бігуна $\beta_{Fc}(x)$ коаксіально-лінійних двигунів з постійними магнітами (рис.10), які характеризують відношення різниці обраних значень електромагнітної сили, що розвивається двигуном, до відповідної різниці переміщення бігуна, апроксимуються на основі метода найменших квадратів для КЛД-ПМ-А та КЛД-ПМ-Р, відповідно:

$$\beta_{Fc(ax)} = -0,2029x + 0,0691; \quad (15)$$

$$\beta_{Fc(rad)} = -0,1579x + 0,0532. \quad (16)$$

Результати експериментального дослідження КЛД-ПМ показали, що хід бігуна (рис.10, в) для КЛД-ПМ-А при його масі $m = 7,25$ кг та жорсткості тягових характеристик $\beta_{Fc} = -1,5$ склав 7,6 мм, а для КЛД-ПМ-Р – 9,8 мм.

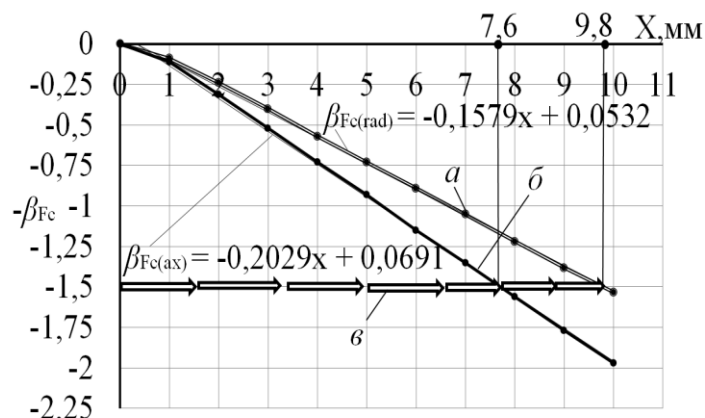


Рисунок 10 – Характеристики $\beta_{Fc}(x)$ КЛД-ПМ: а – КЛД-ПМ-А; б – КЛД-ПМ-Р; в – хід бігуна

Дослідження хід-амперних КЛД-ПМ характеристик $I(x)$ (рис.11) проводились при переміщенні бігуна в межах $\tau/4$ та додаткових масах від 4 до 10 кг.

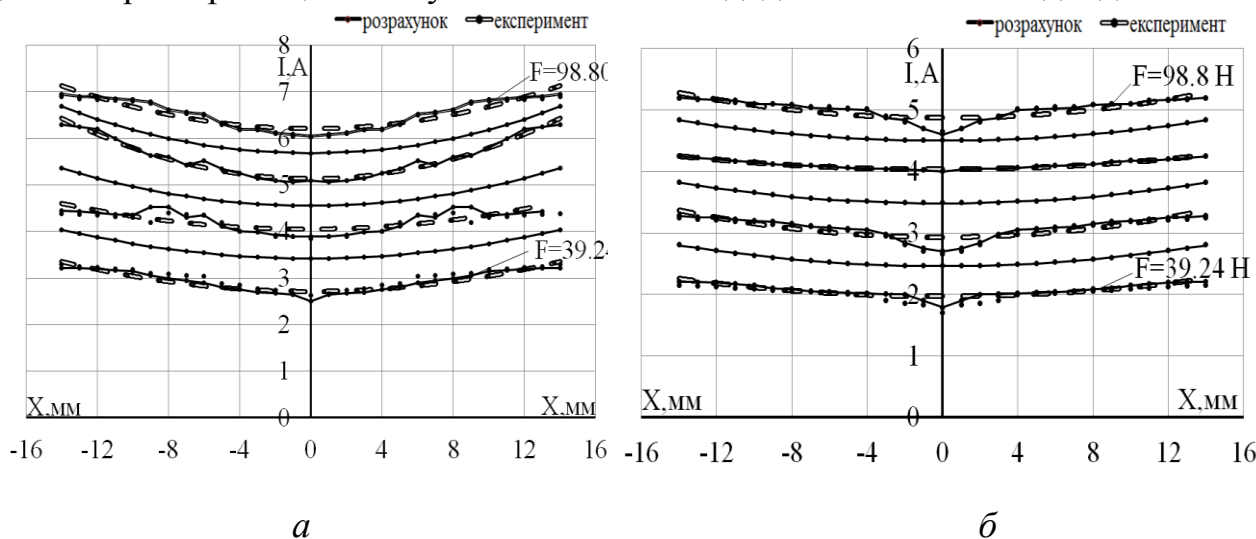


Рисунок 11 – Сімейство електромеханічних хід-амперних характеристик: а – КЛД-ПМ-А; б – КЛД-ПМ-Р

Залежності коефіцієнта жорсткості хід-амперних характеристик фізичних моделей $\beta_{ic}(x)$ КЛД-ПМ (рис.12), які характеризують відношення різниці значень струмів у межах від 1 до 6 А в обмотках статора до відповідної різниці переміщення бігуна, апроксимуються на основі метода найменших квадратів для КЛД-ПМ-А та КЛД-ПМ-Р, відповідно:

$$\beta_{ic(ax)} = 0,009x - 0,0027; \quad (17)$$

$$\beta_{ic(rad)} = 0,0038x - 0,0014. \quad (18)$$

На рис. 12 показано, що при статичному навантаженні з масою в 10 кг та коефіцієнтом жорсткості $\beta_{ic} = 0,035$ хід бігуна (рис.12, в) для КЛД-ПМ-А склав 4,2 мм, а для КЛД-ПМ-Р – 9,5 мм.

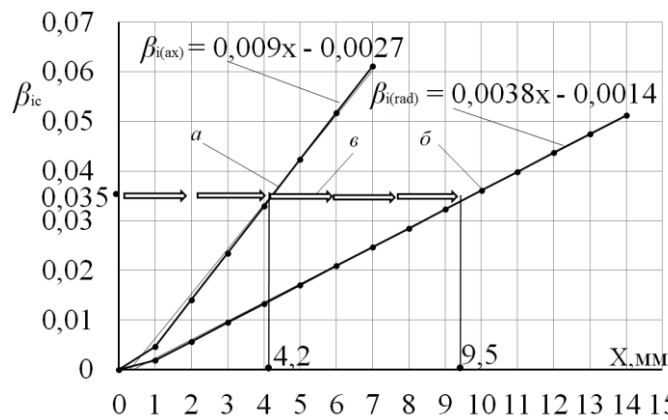
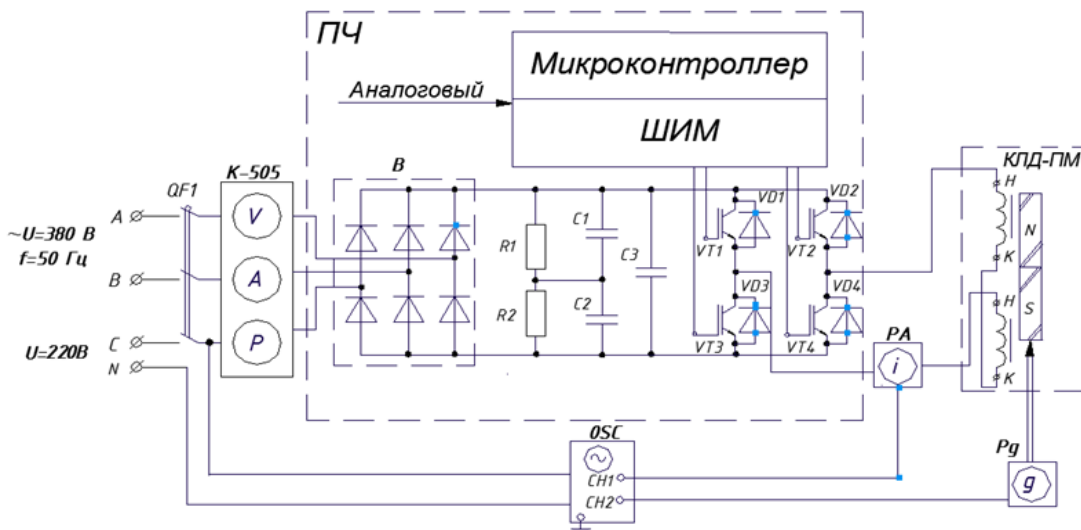


Рисунок 12 – Характеристики $\beta_{ic}(x)$: а – КЛД-ПМ-А;
б – КЛД-ПМ-Р; в – хід бігуна

При побудові розрахункових кривих тягових та хід-амперних (див. рис.9 і рис.11) в зазорі КЛД-ПМ використані виконані комп'ютерні моделі двигунів у програмному пакеті Comsol Multiphysics.

Експериментальні дослідження частотних характеристик КЛД-ПМ проводились на стендах в лабораторії кафедри електротехніки та електроприводу (рис. 13).



КЛД-ПМ – коаксіально-лінійний двигун з постійними магнітами;
SN – постійні магніти; К-505 – комплект вимірювальних приладів;
ПЧ-JR9000 – інвертор; PA – датчик струму; Pg – датчик прискорення
(акселерометр); OSC – цифровий осцилограф.

Рисунок 13 – Функціональна електрична схема стенду для дослідження частотних характеристик КЛД-ПМ

В роботі отримані розрахункові та експериментальні амплітудно-частотні $X(f)$ (рис. 14) та частотні $F_u(f)$ (рис. 15) характеристики вібраційної системи КЛД-ПМ при зміні густині струму $J = 1,88\text{--}4,6\text{ А/мм}^2$. Зміна щільності струму дозволяє визначити характер зміни амплітуди коливання бігуна.

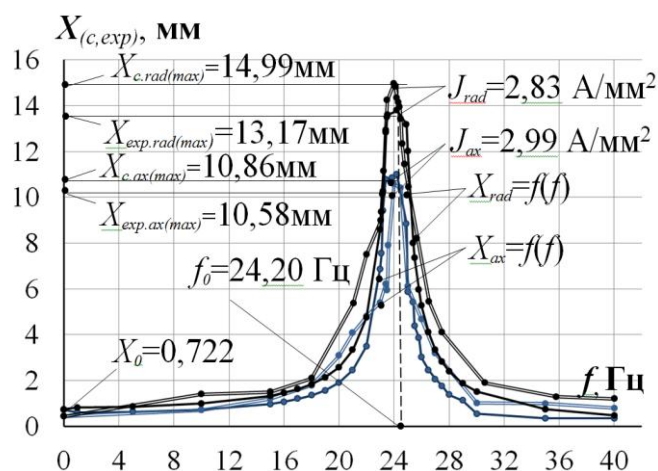


Рисунок 14 – Амплітудно-частотні характеристики $X(f)$ вібраційних систем КЛД-ПМ

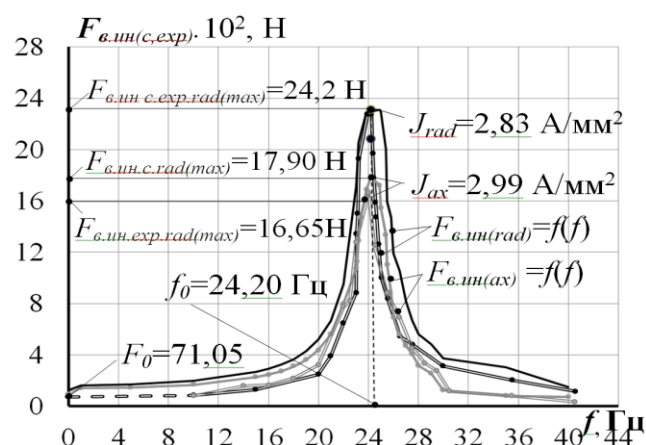


Рисунок 15 – Частотні характеристики $F_u(f)$ інерційних сил вібраційних систем КЛД-ПМ

Для порівняння КЛД-ПМ-А та КЛД-ПМ-Р вібраційних систем при однакових конструктивних та електричних параметрах статора та рівних за масою постійних магнітах, застосованих при побудові полюсів бігунів, пропонується використовувати характеристики $\beta_x(J)$ (рис. 16) та $\beta_F(J)$ (рис. 17).

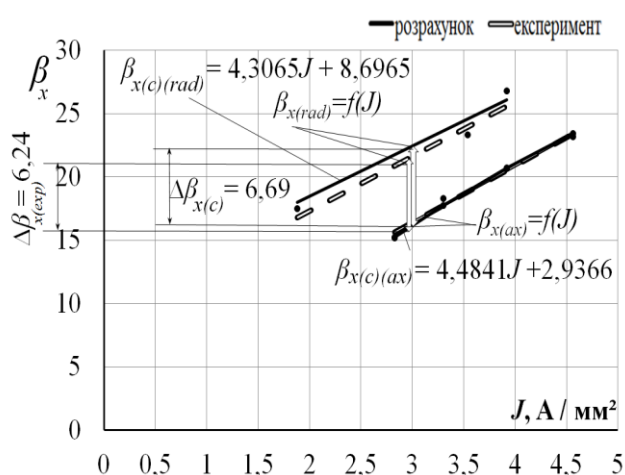


Рисунок 16 – Залежність $\beta_x(J)$ КЛД-ПМ

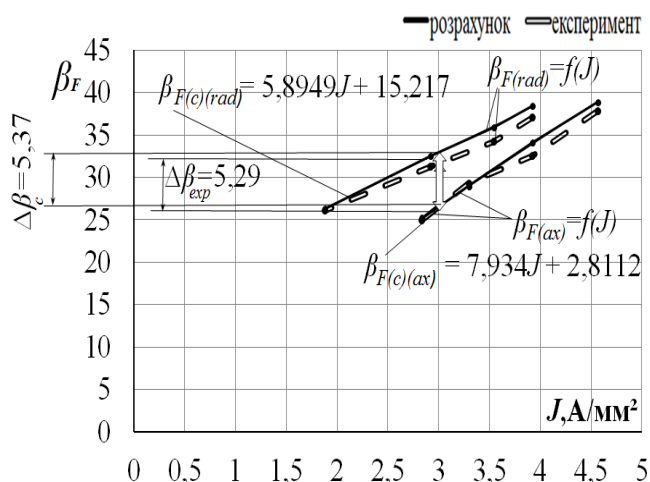


Рисунок 17 – Залежність $\beta_F(J)$ КЛД-ПМ

Коефіцієнти динамічності β_x та динамічного посилення β_F визначають здатність КЛД-ПМ розвивати при резонансі відповідно максимальні значення

$X_{\max}$ амплітуди коливань бігуна та максимальні значення F_u інерційних сил в залежності від густини струму J .

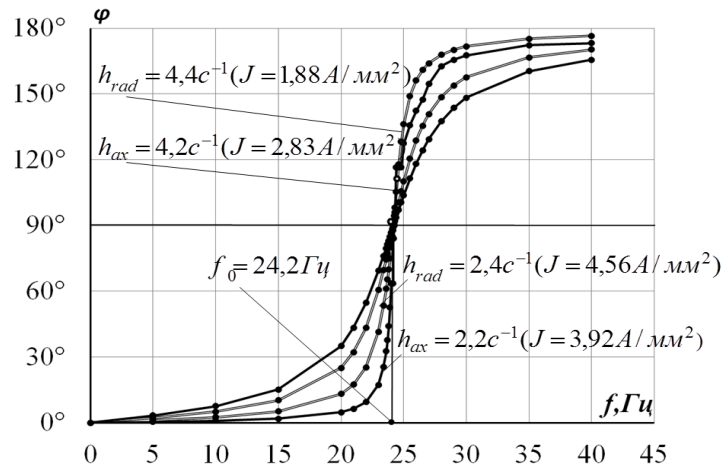


Рисунок 18 – Фазо-частотні характеристики $\varphi(f)$ КЛД-ПМ

Аналізуючи криві фазо-частотних характеристик $\varphi(f)$ КЛД-ПМ (рис. 18), можна зробити висновок, що в стані резонансу незалежно від величини демпфування h зсув фаз дорівнює $\pi/2$, а енергія, що постачається системі збурюючою силою двигуна $F_{a(\max)}$, має максимальне значення, оскільки при цьому втрати потужності при роботі двигуна на тертя наближаються до нуля.

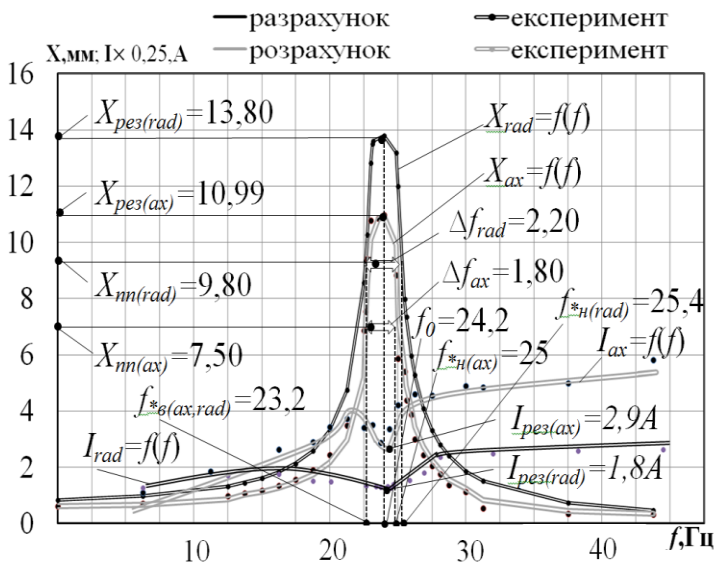


Рисунок 19 – Характеристики $X=f(f)$ та $I=f(f)$ КЛД-ПМ

Аналізуючи амплітудно-частотні характеристики $X(f)$ і характеристики струму $I(f)$ в залежності від зміни частоти напруги при динамічному режимі роботи КЛД-ПМ-А та КЛД-ПМ-Р (рис. 19) на ділянках $X(f)$ та $I(f)$ в межах частот, що визначають частоту смуги пропускання $(f_{*B}-f_0)$, можна зробити висновок, що $X(f)$ та $I(f)$ характеризують стійкість роботи вібраційної системи. Витрати електричної енергії в межах смуги пропускання $(f_{*B}-f_0)$ менші, ніж за межами частот смуги пропускання.

При побудові розрахункових частотних характеристик (див. рис.14, рис.15 і рис.18) в зазорі КЛД-ПМ використані математичні моделі електромагнітних процесів, які представлені в розділі 2.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу з розробки методик розрахунку електромагнітних, електромеханічних та частотних характеристик, конструктивних рішень лінійних двигунів з аксіальним та радіальним вектором намагнічування постійних магнітів, що забезпечує створення вібраційного устаткування з підвищеними енергетичними показниками. У ході роботи отримано результати:

1. Проаналізовано стан проблеми та визначено завдання щодо дослідження електромагнітних, електромеханічних та частотних характеристик коаксіально-лінійного двигуна з постійними магнітами для привода віброзанурювача будівельних елементів.

2. Розроблено методи розрахунку розподілу магнітної індукції на поверхні бігунів з полюсами в повітряному проміжку без струму та зі струмом в обмотках статора для визначення тягових, хід-амперних та частотних характеристик коаксіально-лінійних двигунів з аксіальним та радіальним вектором намагнічування постійних магнітів при статичному та динамічному режимах роботи.

3. Отримані розрахунковим шляхом електромагнітні, електромеханічні, тягові та хід-амперні характеристики КЛД-ПМ-А і КЛД-ПМ-Р підтверджені експериментально. Похибка між розрахунковими та експериментальними значеннями електромагнітних $B(x)$, тягових $F_z(x)$ (при густині струму $J = 3 \text{ А/мм}^2$) та хід-амперних $I(x)$ характеристик (при статичному навантаженні 10 кг та ході бігуна на 10 мм) КЛД-ПМ становить 5,60–6,30 %.

4. Амплітудні значення магнітної індукції для КЛД-ПМ з радіальним вектором намагнічування більші, ніж для КЛД-ПМ з аксіальним вектором намагнічування, і становлять 20–40 %. Витрати енергії при однаковій жорсткості тягових та хід-амперних характеристик КЛД-ПМ-Р на переміщення бігуна менші, ніж для КЛД-ПМ-А, на 30–35 %. На основі результатів комп'ютерного моделювання та експериментального дослідження КЛД-ПМ вперше отримані вирази, що описують тягові та хід-амперні характеристики КЛД-ПМ-А і КЛД-ПМ-Р та дозволяють здійснювати проектування вібраційного обладнання.

5. Розроблено схеми заміщення КЛД-ПМ, проведено порівняльний аналіз векторних діаграм напруг та струмів при різній частоті. Розрахунки показали, що при резонансній частоті енергетична ефективність системи з КЛД-ПМ-Р є на 34,4 % вищою, ніж ефективність системи з КЛД-ПМ-А.

6. У результаті теоретичного та експериментального дослідження частотних характеристик КЛД-ПМ отримані вирази для визначення коефіцієнтів динамічності β_x та коефіцієнтів динамічного посилення інерційних сил β_F , які дозволяють виявити переваги за енергетичними показниками двигуна. Так, діапазон значень коефіцієнтів динамічності при густині струму $J = 3 \text{ А/мм}^2$ (ТВ 100 %) у КЛД-ПМ-Р більший, ніж у КЛД-ПМ-А, і становить 44,90 %, а для коефіцієнтів динамічного посилення інерційних сил – 26,63 %. Встановлено, що

стійкість роботи вібраційної системи на основі КЛД-ПМ здійснюється в межах 5 % від резонансної частоти.

7. На підставі аналізу електромагнітних, електромеханічних, частотних та енергетичних характеристик лінійних двигунів при однакових конструктивних рішеннях обмоток статора, а також рівних за масою постійних магнітів, застосованих при побудові полюсів бігунів ПМ-А та ПМ-Р, зроблено науково обґрунтований вибір КЛД-ПМ з радіальним вектором намагнічування постійних магнітів для привода робочого органу вібраційного обладнання для занурення будівельних елементів, що забезпечує його енергоефективність.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Аббасиан М. Исследование распределения магнитной индукции в воздушном зазоре коаксиально-линейного синхронного двигателя с аксиальным и радиальным расположением постоянных магнитов на якоре /Голенков Г.М., Аббасиан М. // Електротехніка і електромеханіка. – Харків. – 2012. – №2. – С. 30–32.

Здобувачем проведено експериментальні дослідження характеристик розподілу магнітної індукції у повітряному проміжку двигунів КЛД-ПМ.

2. Аббасиан М. Распределение магнитной индукции в воздушном зазоре коаксиально-линейного синхронного двигателя с аксиальным и радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов на бегуне/ Голенков Г.М., Аббасиан М. // Електротехніка і електромеханіка. – Харків. – 2013. – №1. – С. 16–21.

Здобувачем проведено експериментальні дослідження розподілу магнітної індукції у повітряному проміжку без струму та зі струмом в обмотці статора.

3. Аббасиан М. Моделирование распределения магнитной индукции коаксиально-линейного двигателя с аксиальным и радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов / Голенков Г.М., Аббасиан М. // Електротехніка і електромеханіка. – Харків. – 2014. – №1. – С. 21–25.

Здобувачем проведено комп'ютерне моделювання та експериментальні дослідження розподілу магнітної індукції в повітряному проміжку при різних значеннях повітряного проміжку між бігуном та магнітопроводом індуктора двигунів з аксіальним та радіальним вектором намагнічування постійних магнітів.

4. Аббасиан М. Моделирование работы коаксиально-линейных двигателей с аксиальным и радиальным направлениями намагничивания постоянных магнитов при динамическом режиме / Голенков Г.М., Аббасиан М. //Електротехніка і електромеханіка. – Харків. – 2014. – №6. – С. 21–29.

Здобувачем проведено теоретичні та експериментальні дослідження амплітудних, фазових та частотних характеристик інерційних сил коаксіально-лінійних двигунів з аксіальним та радіальним вектором намагнічування постійних магнітів та КЛД-ПМ-Р вібраційного обладнання.

5. Аббасиан М. Электромеханические характеристики коаксиально-линейного двигателя с аксиальным и радиальным направлениями намагничивания постоянных магнитов/Голенков Г.М., Аббасиан М. // Технічна електродинаміка. – Київ. – 2014. – №3. – С. 64–69. (SCOPUS).

Здобувачем проведено комп'ютерне моделювання та розроблено методики експериментального дослідження електромеханічних тягових характеристик двигунів коаксіально-лінійних двигунів з аксіальним та радіальним вектором намагнічування постійних магнітів.

6. Аббасиан М. Схема замещения коаксиально-линейного двигателя с аксиальным и радиальным вектором намагничивания постоянных магнитов/Голенков Г.М., Аббасиан. М // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ"ХП".– 2015. – №5. – С.27–31.

Здобувачем розроблено схему заміщення та побудовано векторні діаграми, що характеризують енергетичні показники коаксіально-лінійних двигунів з аксіальним і радіальним вектором намагнічування постійних магнітів.

7. Аббасиан М. Дослідження розподілу електромагнітної індукції в зазорі лінійного синхронного двигуна / Голенков Г.М., Аббасиан М. // Тези доповідей на XIII Міжнародній науково-технічній конференції "Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації". – Кременчук: КНУ. Вип. 1/2011(1). – С. 254–256.

Здобувачем проведено експериментальні дослідження розподілу магнітної індукції в немагнітному зазорі (без котушок статора).

8. Аббасиан М Розподілення магнітної індукції у повітряному зазорі вібророзбуджувача з коаксіально-лінійним синхронним двигуном (ВЗ-КЛСД) з постійним магнітом на якорі / Голенков Г.М., Аббасиан М. // Тези доповідей на Наукової конференції молодих вчених, аспірантів і студентів КНУБА. – Ч.1. – К.: КНУБА. – 2010. – С. 131–132.

Здобувачем проведено експериментальні дослідження розподілу магнітної індукції у повітряному зазорі без струму в обмотці статора.

АНОТАЦІЇ

Аббасіан Мохсен. Коаксіально-лінійний двигун з постійними магнітами у вібраційній системі занурювача будівельних елементів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.01 – електричні машини й апарати. – Національний технічний університет України "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2016.

Дисертаційна робота присвячена питанням розробки та дослідження особливостей електромагнітних та електромеханічних процесів коаксіально-лінійних двигунів з аксіальним та радіальним вектором намагнічування постійних магнітів для привода робочого органу занурювача. Запропоновані конструкції коаксіально-лінійних двигунів з постійними магнітами для привода робочого

органу занурювача будівельних елементів, а також методи розрахунку магнітної індукції, електро механічних та частотних характеристик при статичному та динамічному режимах роботи вібраційного обладнання на основі коаксіально-лінійних двигунів з постійними магнітами. Розроблені та виготовлені експериментальні стенди для дослідження статичних та динамічних характеристик коаксіально-лінійних двигунів з постійними магнітами. На основі проведеного дослідження коаксіально-лінійних двигунів з аксіальним та радіальним вектором намагнічування постійних магнітів з однаковими конструктивними параметрами статора та рівними за масою магнітами та порівняння їх характеристик, отриманих при статичному та динамічному режимах роботи двигунів, встановлено доцільність використання коаксіально-лінійних двигунів з радіальним вектором намагнічування постійних магнітів для привода робочого органу занурювача будівельних елементів.

Ключові слова: коаксіально-лінійний двигун, аксіальний і радіальний, вектор намагнічування, постійні магніти, частотні характеристики, вібраційне обладнання, електромагнітні процеси, електро механічні характеристики.

Аббасиан Мохсен. Коаксиально-линейный двигатель с постоянными магнитами в вибрационной системе погружателя строительных элементов. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – электрические машины и аппараты. – Национальный технический университет Украины "Харьковский политехнический институт" Харьков, 2016.

Диссертация посвящена вопросам разработки и исследованию особенностей электромагнитных и электро механических процессов коаксиально-линейных двигателей с аксиальным и радиальным вектором намагничивания постоянных магнитов для привода рабочего органа погружателя. Рассмотрены конструкции коаксиально-линейных двигателей с постоянными магнитами для привода рабочего органа погружателя строительных элементов и разработана математическая модель, а также методы расчета магнитной индукции, электро механических и частотных характеристик при статическом и динамическом режимах работы вибрационного оборудования на основе коаксиально-линейных двигателей с аксиальным и радиальным вектором намагничивания постоянных магнитов. Предложена модель коаксиально-линейного двигателя с постоянными магнитами с аксиальным и радиальным вектором намагничивания постоянных магнитов в виде электрической схемы замещения и проведён сравнительный анализ векторных диаграмм напряжений и токов, позволяющий характеризовать энергетические параметры и рабочие характеристики при различных частотах напряжения. Разработан и изготовлен экспериментальный стенд для исследования статических и динамических характеристик коаксиально-линейных двигателей с постоянными магнитами. Проведённый анализ электро механических характеристик коаксиально-линейных двигателей с постоянными магнитами показал, что при одинаковых параметрах

жёсткости тяговых и ход-амперных характеристик более эффективным является двигатель с радиальным вектором намагничивания постоянных магнитов. На основе проведенных исследований коаксиально-линейных двигателей с аксиальным и радиальным вектором намагничивания постоянных магнитов с одинаковыми конструктивными параметрами статора и равными по массе магнитами и сравнение их электромагнитных, электромеханических и частотных характеристик, полученных при статическом и динамическом режимах работы двигателей, установлена целесообразность использования коаксиально-линейных двигателей с радиальным вектором намагничивания постоянных магнитов для привода рабочего органа погружателя строительных элементов.

Ключевые слова: коаксиально-линейный двигатель, аксиальный и радиальный, вектор намагничивания, постоянные магниты, частотные характеристики, вибрационное оборудование, электромагнитные процессы, электромеханические характеристики.

Abbasian Mohsen. Coaxial-line Engine with Permanent Magnets in the Vibration System pogruzhatelya building elements. – In the manuscript.

The thesis for competition of the academic degree of candidate of technical sciences on the speciality 05.09.01 - electrical machines and apparatus. - The National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" (NTU "KhPI"), Kharkiv, 2016.

The thesis is devoted to the issues of development and study of the characteristics of magnetic and electromechanical processes in the coaxial linear motors with axial and radial magnetization vector of permanent magnets for drive of the working body of immertor. The construction of coaxial linear motors with permanent magnets for drive of the working body of the immertor of building, models and methods of calculating the values of the parameters of electromagnetic induction, electromechanical and frequency characteristics under static and dynamic modes of vibration equipment with axial and radial magnetization vector of permanent magnets are researched. The experimental stand for removal of static and dynamic characteristics of coaxial linear motors with permanent magnets is developed and manufactured. The analysis of the effectiveness of using the coaxial linear motors with axial and radial magnetization vector of permanent magnets for drive of the working body of the immertor of building elements with the same design parameters of stator and magnets equal in weight during the process of creating drives of vibrators based on comparison, obtained by static and dynamic modes.

Key words: coaxial linear motor, axial and radial, vector of magnetization, permanent magnets, frequency response, vibration equipment, electromagnetic processes, electromechanical characteristics.

Аббасян.