

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

ОЛЕКСЕНКО СЕРГІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ



УДК 621.313.282

**ОЦІНКА ПОКАЗНИКІВ ЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ
ПЕРЕТВОРІЮВАЧІВ УДАРНОЇ ДІЇ З ВИСОКОЮ МАГНІТНОЮ
СУМІСНІСТЮ**

Спеціальність 05.09.01 – електричні машини і апарати

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі загальної електротехніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Болюх Володимир Федорович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
професор кафедри загальної електротехніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Васьковський Юрій Миколайович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»,
професор кафедри електромеханіки

кандидат технічних наук, доцент
Петренко Олександр Миколайович,
Національний університет міського
господарства імені О.М. Бекетова,
старший викладач кафедри електротранспорту

Захист відбудеться 02 червня 2016 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий 26 квітня 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Юр'єва О.Ю.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Перспективним напрямком розвитку сучасної електротехніки є лінійні електродвигуни, які забезпечують як швидке переміщення різних об'єктів з високою швидкістю на незначній активній ділянці, так і потужні силові імпульси. Лінійні електромеханічні перетворювачі ударної дії забезпечують безпосереднє перетворення електричної енергії імпульсного джерела в кінетичну енергію лінійного переміщення рухомих елементів. Характерним є: пульсуючий, зворотно-поступальний, циклічний або одноразовий режим роботи; переривчастий характер перетворення енергії за рахунок наявності тривалої паузи, неробочого або зворотного ходу протягом робочого циклу; велика тривалість накопичення енергії імпульсним джерелом живлення по відношенню до тривалості робочого періоду; короткочасний режим збудження навантаження обмоток струмом високої густини; лінійне переміщення якоря з швидким прискоренням на короткій активній ділянці; короткочасне, але інтенсивне електромагнітне навантаження ударного типу з високим рівнем імпульсних магнітних полів та ін.

Однак при роботі в імпульсному режимі зі швидкою зміною електромагнітних, механічних і теплових процесів, які істотно залежать від навантаження, показники лінійних електромеханічних перетворювачів ударної дії є недостатньо високими. Крім того, в лінійних електромеханічних перетворювачах ударної дії доцільно використати феромагнітні елементи (осердя, екрани), що обумовлено істотним рівнем магнітних полів розсіювання, які мають негативний вплив на близько розташовані технічні та біологічні об'єкти.

Таким чином, задача розробки науково-технічних засобів щодо підвищення показників лінійних електромеханічних перетворювачів ударної дії і зменшення магнітних полів розсіювання є актуальною і визначає тему дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі загальної електротехніки НТУ «ХПІ» у рамках бюджетних НДР МОН України: «Розробка комплексу науково-технічних рішень по підвищенню ефективності лінійних електромеханічних пристроїв ударної дії» (№ ДР 0111U002261, 2012 р.), «Розробка комплексу науково-технічних заходів для високоефективних лінійних імпульсних електромеханічних перетворювачів наукового та промислового призначення» (№ ДР 0113U000421, 2014 р.), «Розробка засобів підвищення ефективності лінійних ударних електромеханічних прискорювачів та силових пристроїв» (№ ДР 0115U000522, 2015 р.), а також госпдоговірної теми «Розробка та дослідження високошвидкісного електродинамічного приводу» (за рахунок ТОВ «Фірма ТЕТРА, Ltd», м. Харків), в яких здобувач був співвиконавцем.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розробка комплексу науково-технічних рішень, спрямованих на оцінку і підвищення ефективності лінійних електромеханічних перетворювачів ударної дії з високою магнітною сумісністю.

Для досягнення мети поставлені завдання:

- виконати аналіз показників лінійних електромеханічних перетворювачів ударної дії з урахуванням конструктивних особливостей;
- розробити імітаційну модель робочого процесу осесиметричного і неосесиметричного лінійного електромеханічного перетворювача ударної дії, що враховує комплекс взаємопов'язаних просторово-часових електромагнітних, механічних і теплофізичних процесів;
- розробити методику синтезу параметрів лінійних електромеханічних перетворювачів ударної дії, яка враховує різні варіанти стратегії вибору, визначити оптимальні параметри електропровідного якоря, феромагнітного осердя і зовнішнього екрана;
- виконати порівняльний аналіз лінійних електромеханічних перетворювачів ударної дії індукційного, електродинамічного і електромагнітного типів, що забезпечують найбільші силові і швидкісні показники та розробити конструктивні схеми лінійних електромеханічних перетворювачів ударної дії індукційно-електромагнітного типу;
- провести експериментальні дослідження лінійних електромеханічних перетворювачів ударної дії в лабораторних умовах з одночасним вимірюванням електричних і механічних параметрів;
- практично реалізувати лінійні електромеханічні перетворювачі ударної дії для ряду технічних систем.

Об'єкт дослідження – електромагнітні, механічні, теплофізичні процеси в лінійних електромеханічних перетворювачах ударної дії.

Предмет дослідження – лінійні електромеханічні перетворювачі ударної дії з високою магнітною сумісністю.

Методи дослідження. При виконанні дисертаційної роботи використано сучасні методи математичного моделювання, які базуються на вирішенні рівнянь електромагнітного, механічного та теплового полів за допомогою методу скінченних елементів, що дозволило визначити вплив параметрів елементів лінійних електромеханічних перетворювачів ударної дії, враховуючи комплекс взаємопов'язаних просторово-часових фізичних процесів в тривимірній системі координат. Для побудови математичної моделі робочого процесу використовувались сучасні методи імітаційного моделювання. Порівняння різних типів лінійних електромеханічних перетворювачів ударної дії виконано на основі методів теоретичної електротехніки. З використанням методів оптимізації розроблено комбінований лінійний електромеханічний перетворювач ударної дії індукційно-електромагнітного типу. Підтвердження основних розрахунково-теоретичних результатів виконано методами багатofакторних експериментів і обробки результатів експериментальних досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів:

- удосконалено імітаційну модель робочого процесу осесиметричного і неосесиметричного лінійного електромеханічного перетворювача ударної дії, що враховує комплекс взаємопов'язаних просторово-часових електромагнітних, механічних і теплофізичних процесів;

- вперше запропоновано і обґрунтовано вибір використання зовнішнього екрану комбінованого типу в лінійних електромеханічних перетворювачах ударної дії індукційного типу;

- отримала подальший розвиток методика синтезу параметрів лінійних електромеханічних перетворювачів ударної дії, яка заснована на використанні комплексного критерію ефективності та враховує основні показники і використовує різні варіанти стратегії вибору;

- обґрунтовано вибір типу лінійного електромеханічного перетворювача ударної дії з обмеженими масогабаритними параметрами, призначеними для створення найбільших або силових, або швидкісних показників;

- удосконалено методику експериментальних досліджень лінійних електромеханічних перетворювачів ударної дії за рахунок одночасної реєстрації електричних і механічних показників.

Практичне значення отриманих результатів для електромашинобудування полягає у:

- розробці науково-методичного забезпечення, що включає імітаційні математичні моделі, методики вибору параметрів та проведення експериментальних досліджень лінійних електромеханічних перетворювачів ударної дії;

- розробці конструктивних схем з удосконаленими елементами (якір, феромагнітне осердя, зовнішній екран) та конструкціями індукційно-електромагнітного типу, які дозволяють підвищити показники лінійних електромеханічних перетворювачів ударної дії;

- визначенні характеру зміни показників індукційно-динамічної катапульти балістичного лазерного гравіметра, які впливають на точність останнього, від величини початкового бокового зміщення і кута нахилу електропровідного якоря відносно обмотки індуктора;

- реалізації запропонованого швидкодіючого виконавчого механізму реле, стенду для дослідження пристрою ударно-механічного очищення проводів ліній електропередач від налипання снігу і обмерзання, і для ударно-механічного очищення технологічного обладнання від сипучих матеріалів;

- виготовленні зразків пристрою знищення інформації на цифрових носіях з високою магнітною сумісністю, у якого обмотка індуктора виконана з феромагнітним екраном.

Результати роботи впроваджені і використані в ТОВ «Фірма ТЕТРА, Ltd», в ННЦ «Інститут метрології» (м. Харків), перспективні для застосування в АК «Харківобленерго» (м. Харків), а також можуть бути використані проектними, науково-дослідними та промисловими установами електротехнічного профілю для подальшого впровадження.

Підходи до розрахунку сучасних електродвигунів, перспективних електричних апаратів, на базі лінійних електродвигунів використовуються в НТУ «ХП» у курсах «Сучасні проблеми, перспективи та технології розвитку електричних станцій», «Сучасний математичний апарат в енергетиці» і «Основи технічної творчості» на спеціальності 8.05070101 «Електричні станції», а також при виконанні дипломних робіт магістрів електроенергетичного факультету.

Особистий внесок здобувача. У дисертаційну роботу включено теоретичні положення і практичні результати, отримані здобувачем особисто. Виконано дослідження впливу геометричних параметрів елементів на показники лінійних електромеханічних перетворювачів ударної дії. Розроблено комплекс науково-технічних заходів, що включає вдосконалення імітаційної математичної моделі, розробку методики синтезу параметрів, обґрунтування вибору типу лінійних електромеханічних перетворювачів ударної дії для створення найбільших силових і швидкісних показників. Удосконалено конструктивні схеми і методики експериментальних досліджень, які забезпечують підвищення показників лінійних електромеханічних перетворювачів ударної дії, що мають високу магнітну сумісність. Виконано експериментальні дослідження лінійних електромеханічних перетворювачів ударної дії як: катапульти балістичного лазерного гравіметра, виконавчого механізму швидкодіючого реле, пристроїв ударно-механічного очищення і знищення інформації на цифрових накопичувачах.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися і були схвалені на міжнародних науково-технічних конференціях: XI конференція молодих учених и спеціалістів (м. Кременчук, 2013 р.); 13th International institute of refrigeration conference on cryogenics (м. Прага, Чехія, 2014 р.); XXI, XXII, XXIII – Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (м. Харків 2013, 2014, 2015 р.); на міжнародних симпозиумах: «Проблеми вдосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика (SIEMA)» (м. Харків, 2013, 2014, 2015 р.); «International young scientists forum on applied physics (YSF-2015)» (м. Дніпропетровськ, 2015 р.); на всеукраїнських науково-технічних конференціях: «Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод (ДДМА)» (м. Краматорськ, 2012 р.), «Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка» (м. Донецьк, 2012 р.).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 36 наукових публікаціях, з них: 19 статей у наукових фахових виданнях України (серед них 7 – у наукометричних базах), 1 стаття у періодичному фаховому іноземному виданні, включеному до наукометричної бази «Scopus», 1 заявка на патент на винахід України, 15 – у матеріалах конференцій (1 – індексована в базі «Scopus»).

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 205 сторінки, з них: 51 рисунки та 2 таблиці по тексту; 73 рисунки і 8 таблиць на окремих 37 сторінках; список використаних джерел із 158 найменувань на 19 сторінках; 11 додатків на 16 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність та доцільність дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наукову новизну та теоретичну і практичну цінність отриманих результатів, їх

зв'язок з науковими програмами, подано інформацію щодо апробації роботи, наведено інформацію про публікації.

У **першому розділі** виконано аналіз існуючих лінійних електромеханічних перетворювачів ударної дії (ЛЕПУД). Проаналізовано використання ЛЕПУД як ударно-силових пристроїв для електричних апаратів і актуаторів, електромагнітного елеватора і пристроїв дроблення магнітних порошків, магнітно-імпульсного компактування композитної кераміки, ударних пристроїв маркування та гравірування, ударно-конденсаторного зварювання, клепально-складальних і штампувальних робіт, магнітно-імпульсних пристроїв очищення обладнання і розвантаження сипучих вантажів, пристроїв видалення льоду ударно-динамічним способом та ін. Крім того, проаналізовано різні концепції на основі ЛЕПУД, які використовуються у якості електромеханічних прискорювачів для металевих пристроїв і пускових аерокосмічних установок, випробувальних установок з ударними навантаженнями.

В процесі аналізу детально проаналізовано науково-технічні джерела та визначено, що польові методи розрахунку дозволяють практично без істотних спрощень та припущень з високою точністю розрахувати розподіл полів різної природи. Відмічено, що суттєвий внесок у розвиток теорії і практики побудови лінійних перетворювачів внесли: Афонін А.А., Болух В.Ф., Булавина Т.Г., Васьковський Ю.М., Голенков Г.М., Гурін А.Г., Данько В.Г., Мілих В.І., Нейман В.Ю., Татмишевський К.В., Чемерис В.Т., Ямпольский Ю.Г., Balıkcı A., Bissal A., Hongjun X., Jeon W.J., Mehran M., Skurdal B.D., Spahn E., Yongxia H., Li W., Young-woo J. та ін.

Визначено, що ККД існуючих ЛЕПУД знаходиться на низькому рівні; під час роботи ЛЕПУД останні створюють дуже значні імпульсні магнітні поля розсіювання, які різко негативно впливають на близько розташоване устаткування і екологічну чистоту для людини; у перспективі доцільно дослідити вплив конструктивної несиметрії елементів перетворювача по відношенню один до одного, зважаючи на неможливість проведення розрахунків аналітичними методами; відсутні обґрунтовані висновки про переваги застосування різних типів ЛЕПУД, призначених для створення силових навантажень або високошвидкісного розгону робочого елемента.

У **другому розділі** запропоновано загальний підхід і обґрунтовано середовище моделювання взаємопов'язаних електричних, магнітних, механічних і теплових процесів ЛЕПУД. Розроблено імітаційну математичну модель робочого процесу ЛЕПУД, яка враховує часові та просторові чинники.

Імітаційна математична модель реалізована в програмному пакеті Comsol Multiphysics 4.4, на основі якого створена двовірна модель при наявності осьової симетрії і тривимірна модель при відсутності зазначеної симетрії ЛЕПУД.

Моделювання електричних процесів у ЛЕПУД виконувалося фізичними модулями «Electrical circuit», який здійснював розрахунок перехідних процесів, і «Magnetic fields», який здійснював розрахунок параметрів на основі розрахунку магнітного поля, наприклад, повного опору обмотки індуктора (OI) Z_{ref} з урахуванням взаємного переміщення відносно електропровідного якоря (ЕЯ).

Збудження ОІ здійснювалося за допомогою керуючого тиристора аперіодичним імпульсом струму з використанням ємнісного накопичувача енергії (ЄНЕ), шунтованого зворотним діодом з активним опором R_{VD} . Активні опори R_C , R_{VS} враховують, відповідно, опір контактів і сполучних елементів схеми.

В основу дослідження електричного кола збудження узято рівняння:

$$\left(R_c + R_{vs} + Z_{ref}\right) \cdot i_1 + \frac{1}{C} \int_0^t i_1 \cdot dt = 0; \quad \frac{1}{C} \int_0^t i_1 \cdot dt = U_0, \quad (1)$$

де R_c – активний опір сполучних контактів; R_{vs} – активний опір керуючого тиристора; i_1 – струм збудження ОІ; U_0 – початкова напруга ЄНЕ; C – ємність ЄНЕ.

Моделювання магнітних процесів виконувалося фізичним модулем «Magnetic fields», де електромагнітний процес описується системою диференціальних рівнянь для кожного вузла в залежності від комплексного векторного магнітного потенціалу $\bar{A} = (\bar{A}_x, \bar{A}_y, \bar{A}_z)$ або $\bar{A} = (\bar{A}_r, \bar{A}_z)$ (в декартовій (x, y, z) або циліндричній (r, z) системі координат, відповідно) для немагнітних матеріалів

$$\sigma(\bar{T}) \cdot \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \cdot \mu_r^{-1} \cdot \bar{B}) - \sigma(\bar{T}) \cdot \bar{v} \times \bar{B} = \bar{j}_e, \quad (2)$$

де \bar{B} – матриця-вектор магнітної індукції; $\sigma(\bar{T})$ – електрична провідність, яка адаптивно враховує поточну температуру T матеріалу; μ_0 , μ_r – абсолютна і відносна магнітна проникність матеріалу, відповідно; \bar{v} – матриця швидкості та \bar{j}_e – матриця густини струму розрахункових вузлів сіткового розбиття;

$$\bar{B} = \nabla \times \bar{A}; \quad \nabla \times \bar{E} = -\frac{d\bar{B}}{dt}. \quad (3)$$

Для феромагнетиків рівняння (2) модифікується у формулу:

$$\sigma(\bar{T}) \cdot \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} + \nabla \times \bar{H} - \sigma(\bar{T}) \cdot \bar{v} \times \bar{B} = \bar{j}_e; \quad \bar{H} = f(\bar{B}, \bar{J}_\mu), \quad (4)$$

де \bar{H} – матриця-вектор напруженості магнітного поля; \bar{E} – матриця напруженості електричного поля; \bar{J}_μ – матриця намагніченості матеріалу під дією магнітного поля у вузлах сіткового розбиття в початковий момент часу робочого циклу.

Густина струму ОІ визначається стороннім джерелом:

$$\sigma(\bar{T}) \cdot \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \cdot \mu_r^{-1} \cdot \bar{B}) - \sigma(\bar{T}) \cdot \bar{v} \times \bar{B} = \frac{N_1 \cdot (U_{1ex} + U_{1in})}{S_{coil} \cdot R_{coil}} = \bar{j}_e; \quad (5)$$

$$U_{1in} = \oint_L \bar{E} d\bar{l}; \quad \bar{E} \quad R_{coil} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_s \cdot N_1}{\sigma(\bar{T}) \cdot S_1}, \quad (6)$$

де U_{1ex} – зовнішня напруга, прикладена до ОІ; S_{coil} – площа поперечного перерізу ОІ; N_1 – число витків ОІ; r_s – усереднений радіус витків ОІ; S_1 – перетин витків ОІ.

Система рівнянь (2 – 6) має початкові умови:

$$\text{– для 2-D моделі: } \bar{A}(\bar{A}_r, \bar{A}_z) = \bar{A}(0,0); \quad (7)$$

$$\text{– для 3-D моделі: } \bar{A}t(\bar{A}_x, \bar{A}_y, \bar{A}_z) = \bar{A}(0,0,0). \quad (8)$$

Граничні умови розрахункової області:

$$\bar{n} \times \bar{A} = 0. \quad (9)$$

Моделювання теплових процесів виконувалося фізичним модулем «Heat transfer in solid». Теплові процеси в ЛЕПУД описуються рівнянням:

$$\rho C_p \left(\frac{dT}{dt} + (\bar{u}_s \cdot \nabla) T \right) = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) + Q; \quad \bar{Q} = \bar{J} \cdot \bar{E}, \quad (10)$$

де C_p – теплоємність; κ – теплопровідність; ρ – щільність матеріалу; T – температура; Q – потужність тепловиділення; \bar{J} – матриця густини струму; \bar{u}_s – матриця-вектор зміщення розрахункових вузлів сіткового розбиття; \bar{Q} – матриця потужності тепловиділення.

Рівняння (10) має початкову умову: $T = 273$ К, граничні умови описуються рівнянням

$$-\bar{n} \cdot (-\kappa \nabla T) = 0. \quad (11)$$

Моделювання гідродинамічних процесів ЛЕПУД виконувалося фізичним модулем «Fluid structure interaction». Використання гідродинамічних процесів обумовлено високими швидкостями переміщення ЕЯ в середовищі, що має певну щільність. Значення сил, що діють на задану частину перетворювача визначалося за допомогою розрахунку тензора натягу Максвелла σ_M з урахуванням електромагнітних сил, діючих на елементи ЛЕПУД:

$$\bar{n} \cdot \sigma_M = -\frac{1}{2} (\bar{H} \cdot \bar{B}) + (\bar{n} \cdot \bar{H}) \bar{B}^T; \quad \bar{f} = \int_{\partial\Omega-V} \bar{n} \cdot \sigma_M dS, \quad (12)$$

де \bar{f} – матриця електромагнітного зусилля, яке діє на розрахункові вузли сіткового розбиття; \bar{n} – матриця-вектор зовнішньої нормалі до поверхні інтегрування dS .

Опір середовища при переміщенні ЕЯ описується рівнянням Нав'є-Стокса і нерозривності для рухомого поля $\bar{u}_f = (u, v, w)$ і тиску p для рухомої системи координат, яка деформується:

$$\rho \frac{d\bar{u}_f}{dt} - \nabla \cdot \left[-p\bar{I} + \mu_v (\nabla \bar{u}_f + (\nabla \bar{u}_f)^T) - \frac{2}{3} \mu_v (\nabla \bar{u}_f) \bar{I} \right] + \rho (\bar{u}_f \cdot \nabla) \bar{u}_f = \bar{f}_v; \quad (13)$$

$$\frac{dp}{dt} + \nabla \cdot (p \bar{u}_f) = 0, \quad (14)$$

де \bar{u}_f – матриця-вектор швидкості руху рідини (газу); p – тиск; μ_v – динамічна в'язкість; \bar{I} – одиничний тензор; \bar{f}_v – матриця-вектор об'ємної сили, що приводить повітря (рідину) у рух.

Структурні зміни твердого тіла, наприклад ЕЯ, описуються за допомогою еластичної і нелінійної деформації відповідно до

$$\rho \frac{d_2 \bar{u}_s}{dt_2} - \nabla \cdot \sigma_M = \bar{f}_v, \quad (15)$$

де \bar{f}_v – матриця-вектор щільності об'ємної сили; $\bar{u}_s = (u, v, w)$ – матриця-вектор зсувів; σ_M – тензор механічних напружень.

Система рівнянь (13 – 15) має початкові умови:

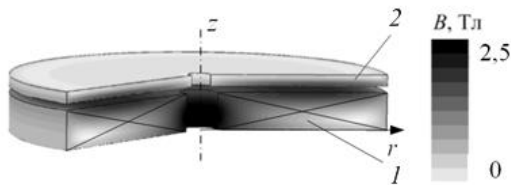
$$\bar{u}_s = 0; \frac{d\bar{u}_s}{dt} = 0; p = const \quad (16)$$

та граничні умови

$$\bar{u}_s = 0. \quad (17)$$

Розрахунок робочих процесів імітаційної мультифізичної моделі ЛЕПУД виконано в залежності від початкових даних, обмежень, вимог збіжності системи рівнянь, критеріїв відносної похибки (але не більше 0,005) і часу розрахунку як прямими методами (SPOOLES; PARDISO; MUMPS), так і ітераційним (GMRES; FGMRES; BiCGStad; Conjugate gradients method) з плаваючим кроком і обмеженнями за часом. Крок за часом послідовно автоматично варіювався залежно від умов збіжності і показників похибки отриманих рішень.

Для ЛЕПУД розроблено блок-схему взаємозв'язків параметрів різних фізичних процесів та детально проаналізовано просторово-часові електромагнітні, механічні і теплофізичні робочі процеси. В якості лінійного перетворювача основного виконання прийнятий ЛЕПУД індукційного типу коаксіальної конфігурації без феромагнітних елементів з параметрами індуктора: зовнішній діаметр $D_{ex1} = 100$ мм, внутрішній діаметр $D_{in1} = 10$ мм, висота $H_1 = 10$ мм, кількість витків $N_1 = 46$ з перетином шини $S = a \times b = 1,8 \times 4,8 = 8,64$ мм², ЕЯ: зовнішній діаметр $D_{ex2} = 100$ мм, внутрішній діаметр $D_{in2} = 10$ мм, висота $H_2 = 3$ мм, ЄНЕ: ємність $C = 2850$ мкФ, напруга $U_0 = 400$ В. З ОІ магнітно взаємодіє масивний



ЕЯ дискової форми, який коаксіально встановлений по відношенню до ОІ з можливістю аксіального переміщення Δz . ОІ та ЕЯ виготовлені з технічної міді.

Відзначено, що електромеханічні процеси в ЛЕПУД носять складний просторово-часовий характер (рис. 1). Густина струму в ОІ j_1 в часі має форму полярного імпульсу, в той час як усереднена густина струму в ЕЯ j_2 через певний час t^* після початку роботи змінює полярність. В результаті цього через зазначений час аксіально спрямовані електродинамічні зусилля (ЕДЗ) f_z змінюють напрямок дії з відштовхування на притягання ЕЯ. Це призводить до незначного зниження імпульсу ЕДЗ $F_z = \int f_z dt$ і швидкості ЕЯ з ВЕ v_z . Переміщення ЕЯ Δz виникає через певний час після початку робочого процесу і за відсутності протидіючих елементів через певний час набуває практично лінійного характеру від часу. На кожному часовому кроці спостерігається істотна нерівномірність розподілу індукції магнітного поля в активних

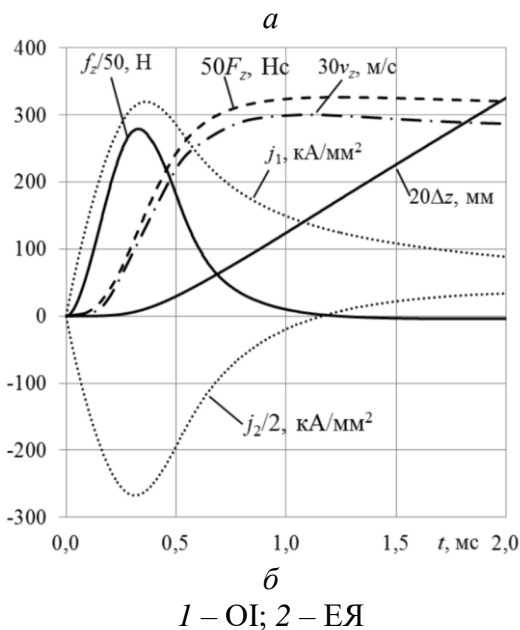


Рисунок 1 – Розподіл магнітного поля в момент максимуму ЕДЗ (а) і електромеханічні характеристики (б) ЛЕПУД основного виконання

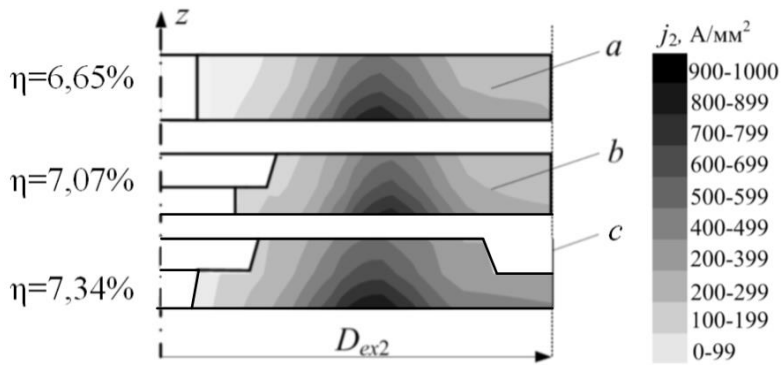


Рисунок 2 – Розподіл густини струму в ЕЯ ЛЕПУД основного виконання (а) і в удосконалених ЕЯ (b, c) в момент максимуму ЕДЗ

параметрів ЕЯ здійснюється на основі аналізу просторового розподілу густини індукваного струму. Встановлено залежність ККД ЛЕПУД η від висоти H_2 , зовнішнього D_{ex2} і внутрішнього D_{in2} діаметрів ЕЯ (рис. 2 а) прямокутного перерізу

$$\eta = (m_2 + m_e) \cdot V_m^2 \cdot C^{-1} \cdot U_0^{-2}. \quad (18)$$

Найбільшого значення ККД досягає при виконанні ЕЯ прямокутного перерізу з розмірами: $D_{ex2}/D_{ex1} = 1,1$, $D_{in2}/D_{ex1} = 0,2$, $H_2/H_1 = 0,3$.

Визначено форми перерізу ЕЯ, при яких забезпечується підвищення ККД ЛЕПУД. Методика вибору форми перерізу ЕЯ полягає у видаленні з прямокутного перерізу ділянок з мінімальною густиною струму. Вдосконалені якоря з внутрішніми і зовнішніми вирізами забезпечують підвищення ККД (рис. 2).

Проведено аналіз впливу кількості та розташування отворів для кріплення в ЕЯ на силові показники ЛЕПУД. Встановлено, що кількість отворів має бути мінімальним, тому що зі збільшенням кількості отворів n відбувається зниження величини імпульсу ЕДЗ. Це пояснюється тим, що кожен отвір локально перерозподіляє індукований в ЕЯ струм (рис. 3 а). Отвори для кріплення в ЕЯ доцільно розташовувати в областях ЕЯ з найменшою густиною струму: або в центральній частині, або на периферії.

Виявлено, що при нахилі ЕЯ відносно ОІ відбувається просторовий перерозподіл індукованих струмів в ЕЯ. Максимальна густина струму j'_{2m} і максимальні питомі ЕДЗ f'_{zm} спостерігаються в області, прилеглій до ОІ (рис. 3 б). При цьому в області, прилеглій до ОІ та центрального отвору вздовж осі нахилу x існує область, в якій питомі ЕДЗ змінюють знак на протилежний.

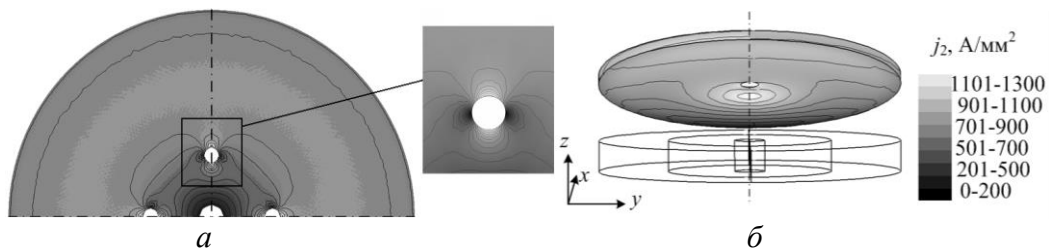


Рисунок 3 – Розподіл густини індукваного струму по перерізу ЕЯ з чотирма отворами для кріплення (а) і при його нахилі відносно ОІ уздовж осі x (б) в момент максимуму ЕДЗ

елементах.

У третьому розділі досліджено шляхи підвищення ефективності ЛЕПУД індукційного типу за рахунок вибору параметрів ЕЯ, феромагнітного осердя (ФО), зовнішнього екрана, синтезу параметрів і використання криогенного охолодження.

Вибір геометричних параметрів

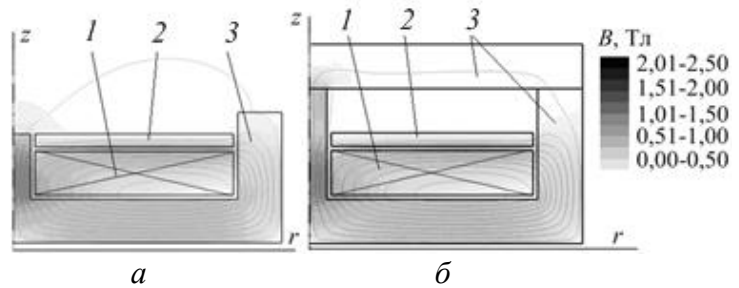
Таким чином, внаслідок нахилу ЕЯ аксіальний імпульс ЕДЗ F_z знижується, але виникає поздовжній імпульс ЕДЗ F_x , спрямований уздовж осі нахилу. Для ряду практичних застосувань доцільно використовувати прямокутний ЕЯ. Встановлено характер індукованого струму і питомих ЕДЗ в прямокутному ЕЯ. Ширина якоря Y з конструктивних міркувань прийнята рівною зовнішньому діаметру ОІ D_{ex1} . На підставі аналізу величини імпульсу ЕДЗ F_z встановлено раціональну довжину ЕЯ: $X = 1,16D_{ex1}$.

Проведено аналіз впливу зміни ФО, виконаного з магнітодіелектрика, на ККД ЛЕПУД. Показано, що найбільші силові показники розвиває ЛЕПУД, у якого в напрямку руху ЕЯ відсутній феромагнетик або він розташований на певній відстані (рис. 4).

За рахунок використання запропонованих конфігурацій ФО збільшується тривалість перехідного процесу і підвищується імпульс ЕДЗ більш ніж на 50 %. Ефективність ФО істотно залежить від матеріалу. Якщо ФО виконано з масивної сталі, то вихрові струми, які виникають у ньому, перешкоджають проникненню магнітного поля в масив ФО, при цьому відбувається погіршення електромеханічних показників ЛЕПУД. Ця проблема вирішується виконанням в масивному сталевому ФО радіальних розрізів, що перешкоджають протіканню вихрових струмів. Чим більша кількість радіальних розрізів в ФО, тим нижча амплітуда індукованого в ньому струму. Максимальні струми індуковані в поверхневому шарі масивного ФО. При збільшенні кількості радіальних розрізів величина індукованих струмів в ФО знижується і струм дедалі більше проникає у сталевий масив. У порівнянні з масивним ФО при 2-х розрізах величина ЕДЗ f_{zm} зростає на 12,7 %, при 4-х розрізах – на 17,1 %, при 8-й розрізах – на 19,2 %. При виготовленні ФО з магнітодіелектрика величина f_{zm} зростає на 35,9 %. Оптимальним з точки зору технологічності, конструктивної складності і ефективності є ФО з чотирма радіальними розрізами (рис. 5). У порівнянні з масивним ФО ККД такого ЛЕПУД підвищується на 45 %.

Для обраної конфігурації ФО (рис. 4 а) визначено геометричні параметри, при яких забезпечуються мінімальні поля розсіювання, максимальні магнітні поля в активній зоні при мінімальних масогабаритних параметрах. Магнітні поля розсіювання реєструються на віддаленій від ЛЕПУД поверхні.

Досліджено вплив типу і форми зовнішнього феромагнітного екрана (ФЕ) на ефективність ЛЕПУД індукційного типу. ФЕ охоплює ОІ тільки з зовнішньої поверхні і призначений, в першу чергу, для зниження полів розсіювання. Вплив параметрів ФЕ, виконаного з магнітодіелектрика, на роботу ЛЕПУД оцінено за допомогою інтегрального показника ефективності K^* , що враховує максимальні (max) і мінімальні (min) відносні значення ККД η^* , маси активних елементів m^* і



1 – ОІ; 2 – ЕЯ; 3 – ФО

Рисунок 4 – Конфігурації ФО ЛЕПУД з вільним (а) і обмеженим (б) переміщенням ЕЯ і розподіл магнітних полів в момент максимуму ЕДЗ

усередненого значення магнітного поля розсіювання B_{ex}^*

$$K^* = \beta_1 \left(\frac{\eta^* - \eta_{\min}^*}{\eta_{\max}^* - \eta_{\min}^*} \right) + \beta_2 \left(\frac{m_{\max}^* - m^*}{m_{\max}^* - m_{\min}^*} \right) + \beta_3 \left(\frac{B_{ex \max}^* - B_{ex}^*}{B_{ex \max}^* - B_{ex \min}^*} \right), \quad (19)$$

де $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ – вагові коефіцієнти, що враховують ККД, масу активних елементів та усереднене значення магнітного поля розсіювання ЛЕПУД, відповідно.

Конфігурацію ФЕ з дисковою основою висотою H_{3a} , циліндричною обичайкою висотою H_{3b} і зовнішнім діаметром D_{ex3} описано безрозмірними геометричними параметрами, які змінюються у діапазоні $\chi \in [1; 1,3]$; $\varepsilon \in [0; 6]$; $\theta \in [0; 1,5]$:

$$\chi = \frac{H_{3a}}{H_1}; \quad \theta = \frac{D_{ex3b}}{D_{ex1}}; \quad \varepsilon = \frac{H_{3b}}{H_1}. \quad (20)$$

Відносні значення ККД η^* , маси m^* і магнітного поля розсіювання B_{ex}^* нормовані щодо відповідних показників ЛЕПУД основного виконання. Максимальне магнітне поле $B_{ex \max}^*$ має місце при мінімальних значеннях параметрів (20), а мінімальне магнітне поле $B_{ex \min}^*$ – при максимальних значеннях параметрів (20). Максимальні значення відносного ККД η_{\max}^* і маси m_{\max}^* мають місце при максимальних значеннях параметрів, а мінімальні значення відносного ККД η_{\min}^* і маси m_{\min}^* – при мінімальних значеннях параметрів. Вагові коефіцієнти показників ЛЕПУД задовольняють співвідношенню

$$\sum_{j=1}^3 \beta_j = 1. \quad (21)$$

Для отримання оптимальних значень геометричних параметрів ФЕ, при яких досягаються максимальні значення інтегрального показника K^* , використано метод, що передбачає пошук локального екстремуму в обмеженій околиці поточної точки пошуку на кожній ітерації і переміщенні поточної в знайдену точку локального екстремуму. У таблиці 1 представлені оптимальні значення безрозмірних параметрів ФЕ, відносні показники ККД η^* , маси m^* і магнітного поля розсіювання B_{ex}^* , а також значення інтегрального показника ефективності ЛЕПУД K^* для чотирьох варіантів оцінки ефективності. Показано, що товстостінний ФЕ підсилює, а тонкостінний електромагнітний екран (ЕЕ) ослаблює магнітне поле в зоні ОІ та ЕЯ. Магнітне поле практично не виходить за зовнішню поверхню ФЕ, в той час як для ЛЕПУД з ЕЕ поле проникає за зовнішню поверхню ЕЕ. Геометричні параметри екрану описані безрозмірними величинами:

$$\sigma_a = \frac{H_{3a}}{H_1}; \quad \sigma_b = \frac{\delta}{H_1}, \quad (22)$$

де H_{3a} – відстань від нижньої (бічної) поверхні ОІ до нижньої (бічної) зовнішньої поверхні ФЕ; δ – відстань

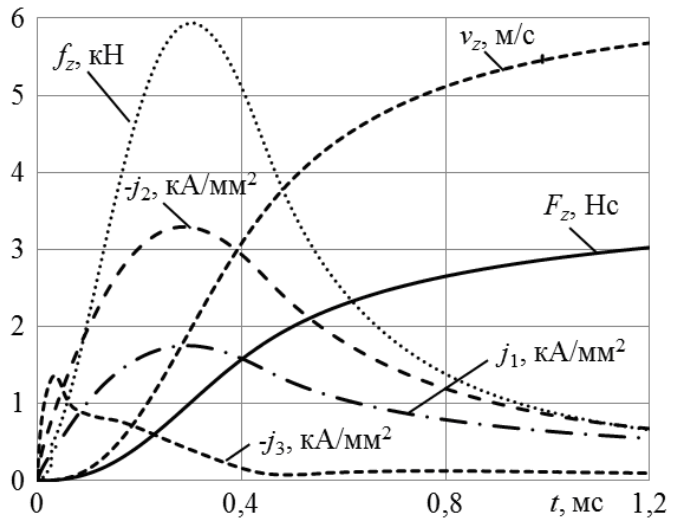


Рисунок 5 – Електромеханічні характеристики ЛЕПУД, у якого ФО має чотири радіальних розрізи

Таблиця 1 – Оптимальні значення параметрів ФЕ і показників ЛЕПУД, в.о.

№ П/П	Вагові коефіцієнти			Параметри ФЕ			Показники ЛЕПУД			
	β_1 ,	β_2 ,	β_3 ,	χ	θ	ε	η^*	m^*	B_{ex}^*	K^*
1	0,3(3)	0,3(3)	0,3(3)	1,02	1,17	2,51	1,60	2,01	0,075	3,41
2	0,50	0,25	0,25	0,95	1,21	2,18	1,62	1,93	0,069	3,25
3	0,25	0,25	0,50	1,51	1,18	2,34	1,52	2,53	0,032	3,06
4	0,25	0,50	0,25	0,63	1,10	1,80	1,33	1,82	0,401	1,47

від нижньої (бічної) поверхні ОІ до зовнішньої нижньої (бічної) поверхні ЕЕ.

Досліджено вплив товщини ФЕ σ_a і віддалення від ОІ ЕЕ σ_b на електро-механічні і магнітні (поля розсіювання) показники ЛЕПУД (рис. 6 а, б). Запропоновано конструкцію комбінованого екрана, що складається з прилеглої до ОІ феромагнітної частини, яка зовні охоплена електропровідною частиною. Феромагнітна частина комбінованого екрана служить опорою для електропровідної частини і може бути виконана відносно тонкостінною. У порівнянні з ФЕ комбінований екран забезпечує зниження магнітних полів приблизно в 4 рази при однакових габаритах (рис. 6 в).

Для синтезу параметрів високоефективного ЛЕПУД з ФО використано комплексний критерій ефективності (показники нормовані до відповідних показників ЛЕПУД основного виконання)

$$K_{\Sigma}^* = \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot par_i, \quad (23)$$

де $par_i = \{f_{zm}, F_z, t^*, j_{1m}, j_{2m}, j_{2sred}, \Delta z, V_m, B_{ex}, m, H_{ex}, D_{ex}, \theta_2\}$ – варійовані параметри; β_i – вагові коефіцієнти; j_{1m} – максимальна густина струму в ОІ; j_{2sred} – усереднена густина струму в ЕЯ; V_m – максимальна швидкість ЕЯ; зовнішній діаметр D_{ex} , аксіальна висота H_{ex} перетворювача; θ_2 – приріст температури ЕЯ за робочий цикл.

На основі аналізу величини комплексного критерію ефективності K_{Σ}^* встановлено найкращі безрозмірні геометричні параметри ЛЕПУД:

$$\varepsilon = 2,5; \zeta = 1,0; \theta = 1,12; D_{in2}^* = 0,05; D_{ex2}^* = 1,2; H_2^* = 0,3,$$

де $\zeta = D_{in3}/D_{in1}$; D_{in3c} – внутрішній діаметр внутрішнього циліндру ФО.

Досліджено вплив криогенного охолодження ЛЕПУД рідким азотом. Показано, що криогенне охолодження ОІ дозволяє збільшити максимальні ЕДЗ f_{zm} на 18,7 %, при охолодженні ЕЯ – на 75,7 %, а при одночасному охолодженні ЕЯ і ОІ – на 210 %. Для ЛЕПУД з неоптимізованими параметрами за відсутності криогенного охолодження ККД становить 3,53 %. При охолодженні ОІ ККД підвищується до 5,5 %, при охолодженні ЕЯ – до 17,6 %, а при спільному охолодженні ОІ та ЕЯ – до 38,9 %.

В четвертому розділі обґрунтовано шляхи підвищення показників ЛЕПУД, що використовують електромагнітні і феромагнітні якорі, за рахунок вибору типу ЛЕПУД і конструктивної схеми комбінованого ЛЕПУД індукцій-

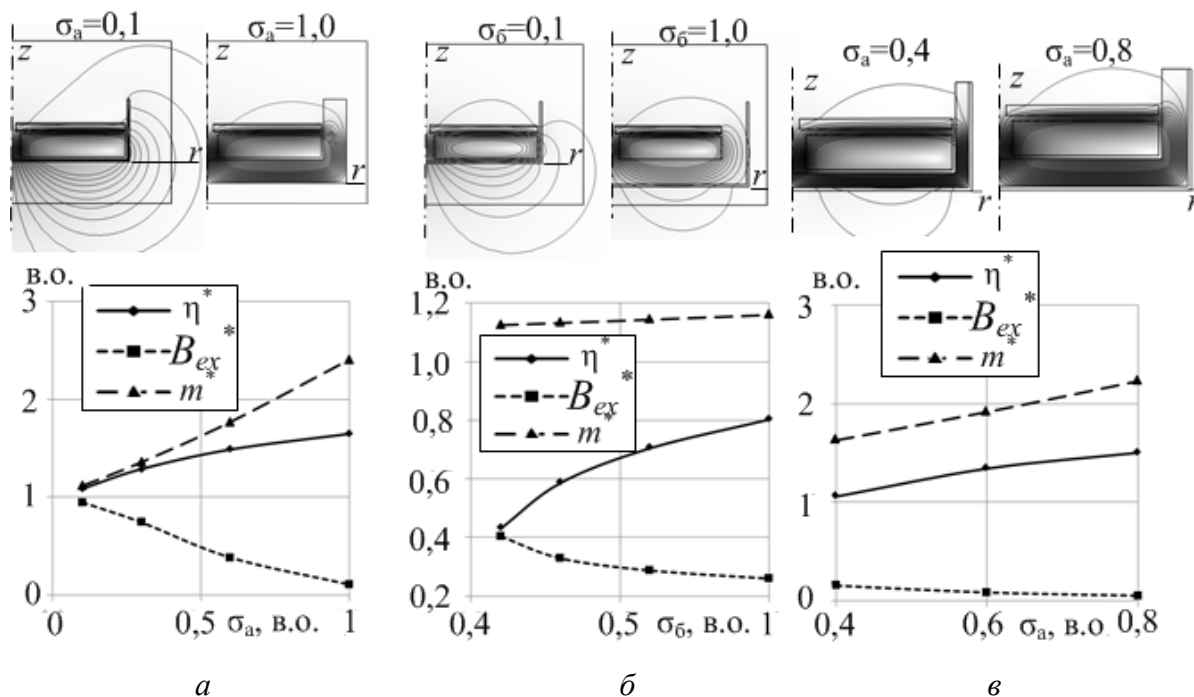


Рисунок 6 – Розподіл магнітного поля в момент максимуму ЕДЗ для граничних значень і залежності показників ЛЕПУД від товщини ФЕ (а), від відстані віддалення ЕЕ від ОІ (б), від товщини феромагнітної частини при віддалення ЕЕ $\sigma_b = (\sigma_a + 0,1)$ (в)

но-електромагнітного типу. Проведено порівняльний аналіз ЛЕПУД індукційного, електромагнітного і електродинамічного типів з ФЕ, враховуючи електромеханічні і масогабаритні показники, магнітні поля розсіювання. Показано, що в ЛЕПУД електродинамічного типу електромеханічні процеси протікають найбільш швидко, струм в ОІ та ЕДЗ приймають максимальні значення при мінімальному рівні магнітних полів розсіювання. У ЛЕПУД електромагнітного типу електромеханічні процеси протікають найбільш повільно, струм в ОІ і ЕДЗ приймають найменші значення при найбільшому рівні полів розсіювання. У таблиці 2 наведено відносні показники ЛЕПУД електродинамічного і електромагнітного типу по відношенню до відповідних показників ЛЕПУД індукційного типу.

Виконано параметричний синтез досліджених типів ЛЕПУД, що забезпечують найбільші силові і швидкісні показники. Використано постійні, залежні і варійовані параметри при обліку заданих обмежень і граничного розміру перетворювача, величина якого обумовлена параметрами ЛЕПУД основного виконання. При цьому необхідно забезпечити максимальні значення величини f_{zm} і імпульсу ЕДЗ F_z , усередненої на інтервалі руху швидкості V_c і ККД η при мінімальних значеннях густини струму в ОІ j_{1m} і магнітного поля розсіювання B_{ex} .

Для синтезу параметрів використано метод Монте-Карло. В якості цільової

Таблиця 2 – Відносні показники ЛЕПУД, в.о.

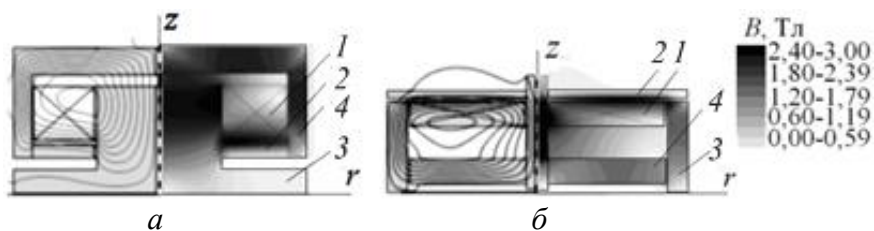
Тип ЛЕПУД	j_{1m}^*	f_{zm}^*	V_m^*	η^*	B_{ex}^*	m_2^*
Електродинамічний	2,513	2,094	0,984	2,85	0,231	1,683
Електромагнітний	0,992	0,430	0,497	0,62	2,870	2,610

функції при синтезі параметрів силового ЛЕПУД виступає найбільша величина імпульсу ЕДЗ F_z , а при синтезі параметрів швидкісного ЛЕПУД – найбільша величина швидкості ЕЯ V_m . Показано, що найбільші силові показники розвиває ЛЕПУД електромагнітного типу, а найбільші швидкісні показники – ЛЕПУД електродинамічного типу. Проаналізовано конструктивні схеми ЛЕПУД індукційного-електромагнітного типу з комбінованим якорем. З боку ОІ на електропровідний елемент якоря (ЕЕЯ) діє сила відштовхування f_{z-id} , а на феромагнітний елемент якоря (ФЕЯ) – сила тяжіння f_{z-em} , які спрямовані в один бік і формують результуючу силу f_z , що діє на комбінований якор (рис. 7). У порівнянні з ЛЕПУД індукційного типу в дослідженому перетворювачі імпульс сили F_z зростає більш ніж в 2 рази. За рахунок збільшення маси комбінованого якоря його швидкість знижується до 35 %, а масогабаритні показники погіршуються. Але густина струму в ОІ знижується, що є позитивним для електронної схеми збудження, а ККД підвищується більш ніж в 2 рази. Запропоновано і запатентовано ЛЕПУД індукційно-електромагнітного типу. В даному перетворювачі послідовно відбувається лінійне переміщення бойка, його поворот на заданий кут і додаткова силова дія на об'єкт впливу протягом одного робочого циклу.

У п'ятому розділі представлено науково-технічні застосування і експериментальні дослідження ЛЕПУД. Розроблено методику експериментальних досліджень ЛЕПУД з одночасним вимірюванням струму в ОІ та механічних показників. Механічні показники ЕДЗ і переміщення ЕЯ реєструвалися з використанням п'єзодатчика і резистивного датчика положення.

Проведено дослідження впливу геометричних параметрів ФЕ на показники ЛЕПУД індукційного типу. Використовувався багатоелементний складений ФЕ з чотирма радіальними розрізами. За допомогою двоканального цифрового осцилографа RIGOL DS 522М одночасно вимірювався струм в ОІ i_1 і переміщення ЕЯ з силовим диском Δz (рис. 8 а). Визначено, що ФЕ при певних параметрах збільшує швидкість ЕЯ до 47 %.

На кафедрі загальної електротехніки проведено експериментальні дослідження в лабораторних умовах на установці, в якій ЛЕПУД індукційного типу кріпиться між двома масивними сталевими плитами за допомогою регульованих опорних штирів. На верхній плиті, яка виконує роль упора, зверху встановлений п'єзоелектричний перетворювач типу ДН-4-М1, який здійснює перетворення механічних коливань, що виникають в результаті удару бойка, в електричні сигнали. На рис. 8 б показані форми аперіодичного струму в ОІ та віброшвидкості. За допомогою осцилограм визначається час затримки t_3 між початком електричних і механічних процесів, що дозволяє обчислити середню швидкість якоря. В цілому отримано задовільну ві-



1 – ОІ, 2 – ЕЕЯ, 3 – ФО, 4 – ФЕЯ

Рисунок 7 – Конструктивні схеми ЛЕПУД індукційного-електромагнітного типу з зовнішнім (а) і внутрішнім (б) розташуванням ФЕЯ і розподіл магнітного поля в момент максимуму ЕДЗ:

дповідність між експериментальними і розрахованими електромагнітними (до 5 %) і механічними (до 10 %) показниками. Реалізовано науково-технічні застосування розроблених ЛЕПУД для виконавчих механізмів швидкодіючих реле, для ударно-механічних пристроїв очищення,

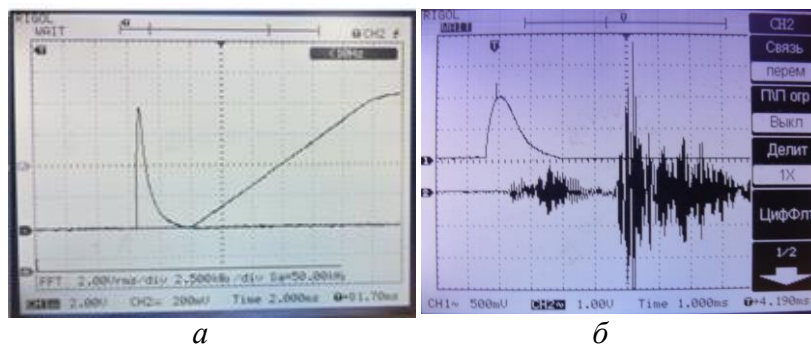


Рисунок 8 – Осцилограми імпульсу струму в ОІ і дані резистивного датчика положення (а) і п'єзоелектричного датчика (б)

для пристрою знищення інформації на цифрових носіях, для катапульти балістичного лазерного гравіметра. На макетах показано ефективність використання ЛЕПУД в пристроях, що забезпечують очищення проводів ЛЕП від налипання снігу та очищення технологічного обладнання від сипучих матеріалів.

На основі ЛЕПУД індукційного-електромагнітного типу виготовлено зразок пристрою знищення інформації, в якому ЕДЗ відштовхування і електромагнітні сили тяжіння діють на бойок, що впливає на цифровий накопичувач. На основі ЛЕПУД індукційного типу виготовлено і випробувано пристрій знищення інформації на цифровому накопичувачі, в якому за рахунок використання ФЕ забезпечується підвищення силового впливу на 15 %.

Запропоновано використовувати ЛЕПУД індукційного типу в якості катапульти балістичного лазерного гравіметра, що дозволяє підвищити точність вимірювання прискорення вільного падіння за рахунок вільного польоту оптичного кутового відбивача вимірювальної системи інтерферометра. Теоретично встановлено характер розподілу індукованого струму і питомих ЕДЗ в ЕЯ, складових швидкості, інтегральних ЕДЗ і зсувів у верхній точці підкидання кутового відбивача в залежності від величини початкового бокового зміщення і кута нахилу ЕЯ відносно ОІ.

У **додатках** наведено акти впровадження матеріалів дисертації на підприємстві «ТЭТРА, Ltd», ННЦ «Інститут метрології», АК «Харківобленерго», в навчальний та науковий процес НТУ «ХП».

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу розробки комплексу науково-технічних рішень, спрямованих на підвищення ефективності ЛЕПУД з високою магнітною сумісністю.

1. На основі аналізу науково-технічних джерел встановлено, що ЛЕПУД широко застосовуються в ударно-силових пристроях і для прискорення об'єктів до високих швидкостей. Однак ККД існуючих ЛЕПУД знаходиться на низькому рівні. Крім того, під час роботи ЛЕПУД останні створюють дуже значні імпульсні магнітні поля розсіювання, які різко негативно впливають на близько розташоване устаткування і екологічну чистоту для біологічних об'єктів.

2. Розроблено імітаційну математичну модель робочого процесу осесиметричного і неосесиметричного ЛЕПУД з феромагнітними елементами, що описує взаємопов'язані просторово-часові електричні, магнітні, механічні та теплофізичні процеси із змінними параметрами, яка дозволяє виконувати оцінку показників ЛЕПУД.

3. Для проектування визначено оптимальну форму перерізу і параметри ЕЯ ЛЕПУД індукційного типу. На підставі аналізу просторового розподілу індукційних струмів і ЕДЗ встановлено вплив кількості та розташування отворів для кріплення в круглому і прямокутному ЕЯ, а також вплив його нахилу відносно ОІ. Встановлено, що ФЕ з чотирма радіальними розрізами забезпечує підвищення ефективності ЛЕПУД індукційного типу на 45 % в порівнянні з масивним ФЕ. Запропоновано конструкцію комбінованого екрана, що забезпечує зниження магнітних полів розсіювання до 4 разів у порівнянні з ФЕ.

4. Набула подальшого розвитку методика синтезу параметрів високоефективного ЛЕПУД, заснована на використанні комплексного критерію ефективності, який враховує основні показники при різних варіантах стратегії вибору. На основі порівняльного аналізу ЛЕПУД індукційного, електродинамічного і електромагнітного типів встановлено, що найбільша величина імпульсу сили має місце в ЛЕПУД електромагнітного типу, а найменші поля розсіювання – в ЛЕПУД електродинамічного типу. Встановлено, що криогенне охолодження до температури рідкого азоту ОІ дозволяє збільшити ККД ЛЕПУД в 1,6 раз, при охолодженні ЕЯ – в 5 разів, а при одночасному охолодженні ЕЯ і ОІ – в 11 разів. Розроблено конструктивні схеми ЛЕПУД індукційно-електромагнітного типу, які дозволяють збільшити імпульс ЕДЗ більш, ніж в 2,2 рази, ККД – більше, ніж в 2 рази в порівнянні з ЛЕПУД індукційного типу.

5. Розроблено методику експериментальних досліджень ЛЕПУД з одночасним вимірюванням електричних і механічних показників. Експериментально встановлено, що ФЕ дозволяє збільшити швидкість ЕЯ до 47 %, зменшити максимальний струм в ОІ до 35 % і збільшити час досягнення максимального струму до 21 %. Отримано задовільну згоду між експериментальними і розрахованими показниками ЛЕПУД.

6. Експериментально і теоретично показана ефективність використання ЛЕПУД як: катапульти балістичного лазерного гравіметра, виконавчого механізму швидкодіючого реле, в пристроях ударно-механічного очищення проводів ЛЕП від налипання снігу і обмерзання, в установках ударно-механічного очищення технологічного обладнання від сипучих матеріалів, в пристроях знищення інформації на цифрових носіях.

7. Результати, отримані в дисертаційній роботі, впроваджені в навчальний процес, застосовані в ННЦ «Інститут метрології», у ТОВ «Фірма «ТЭТРА, Ltd», АК «Харківобленерго».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Олексенко С.В. Влияние конфигурации якоря на эффективность линей-

ного электромеханического преобразователя / В.Ф. Болух, С.В. Олексенко // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – № 49. – С. 18 – 26.

Здобувачем виконано моделювання і аналіз впливу геометрії якоря на показники індукційно-динамічного двигуна.

2. Олексенко С.В. Влияние параметров ферромагнитного сердечника на эффективность индукционно-динамического двигателя / В.Ф. Болух, С.В. Олексенко, И.С. Щукин // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – №6. – С.20 – 27.

Здобувачем проаналізовано вплив ферромагнітного осердя на ефективність лінійного індукційно-динамічного двигуна.

3. Олексенко С.В. Оптимизационный подход к выбору параметров ферромагнитного сердечника индукционно-динамического устройства / В.Ф. Болух, О. Бенаисса, С.В. Олексенко // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – № 61. – С. 24 – 34.

Здобувачем виконано оптимізацію ферромагнітного осердя лінійного індукційно-динамічного двигуна.

4. Олексенко С.В. Влияние параметров ферромагнитного сердечника на электромеханические параметры индукционно-динамического двигателя / В.Ф. Болух, С.В. Олексенко // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2013. – № 1. – С. 83 – 90.

Здобувачем проаналізовано вплив ферромагнітного осердя на показники лінійного індукційно-динамічного двигуна.

5. Олексенко С.В. Синтез параметров индукционно-динамического двигателя / В.Ф. Болух, С.В. Олексенко // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – № 15. – С. 93 – 104.

Здобувачем обґрунтовано оптимізаційний підхід при виборі геометрії елементів індукційно-динамічного двигуна.

6. Олексенко С.В. Методика выбора параметров индукционно-динамического двигателя с ферромагнитным сердечником / В.Ф. Болух, О. Бенаисса, С.В. Олексенко // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – № 51. – С. 3 – 15.

Здобувачем обґрунтовано методіку вибору параметрів елементів індукційно-динамічного двигуна.

7. Олексенко С.В. Влияние формы и расположения якоря на эффективность индукционно-динамического двигателя с использованием 3D модели / В.Ф. Болух, С.В. Олексенко, И.С. Щукин // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – № 65. – С. 63 – 83.

Здобувачем виконано комп'ютерне моделювання робочих процесів індукційно-динамічного двигуна.

8. Олексенко С.В. Сравнение электромеханических показателей индукционно-динамического и электромагнитного двигателей / В.Ф. Болух, С.В. Олексенко // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 20. – С. 25 – 34.

Здобувачем виконано аналіз різних типів лінійних електродвигунів.

9. Олексенко С.В. Влияние параметров наружного экрана на эффективность индукционно-динамического преобразователя / В.Ф. Болух, С.В. Олексенко // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2014. – № 2. – С. 24 – 35.

Здобувачем виконано комп'ютерне моделювання та аналіз впливу зовнішнього екрану на робочі процеси індукційно-динамічного двигуна.

10. Олексенко С.В. Экспериментальные исследования влияния параметров ферромагнитного сердечника на электромеханические показатели линейного индукционно-динамического преобразователя / В.Ф. Болух, С.В. Олексенко, И.С. Щукин // Електротехніка і електромеханіка. – 2014. – № 5. – С.13 – 18.

Здобувачем виконано експериментальне дослідження і аналіз отриманих результатів впливу ферромагнітного осердя на показники лінійного індукційно-динамічного перетворювача.

11. Олексенко С.В. Сравнительный анализ ударных электромеханических преобразователей индукционно-динамического, электродинамического и электромагнитного типа / В.Ф. Болух, С.В. Олексенко, И.С. Щукин // Вісник НТУ «ХПІ». – 2014. – № 38. – Харків: НТУ «ХПІ». – С. 30 – 44.

Здобувачем виконано розрахунок електромеханічних перетворювачів.

12. Олексенко С.В. Влияние числа радиальных разрезов ферромагнитного экрана на показатели линейного индукционно-динамического преобразователя / В.Ф. Болух, С.В. Олексенко // Вісник НТУ «ХПІ». – 2015. – № 13 (1122). – С.45 – 60.

Здобувачем проаналізовано вплив конструктивних особливостей і конфігурації ферромагнітного осердя на показники лінійного перетворювача.

13. Олексенко С.В. Эффективность линейных импульсных электромеханических преобразователей, предназначенных для создания ударных нагрузок и высоких скоростей / В.Ф. Болух, С.В. Олексенко, И.С. Щукин // Електротехніка і електромеханіка. – 2015. – №3. – С.31 – 40.

Здобувачем виконано синтез силових і швидкісних електромеханічних перетворювачів.

14. Олексенко С.В. Сравнительный анализ конструктивных схем линейных ударных электромеханических преобразователей комбинированного типа / В.Ф. Болух, С.В. Олексенко, И.С. Щукин // Електротехніка і електромеханіка – 2015. – № 4. – С. 20 – 27.

Здобувачем виконано синтез комбінованих лінійних перетворювачів.

15. Oleksenko S.V. The Influence of the Parameters of a Ferromagnetic Shield on the Efficiency of a Linear Induction-Dynamic Converter / V.F. Bolyukh, S.V. Oleksenko // Russian electrical engineering. – 2015. – Vol. 86, Issue 7. – P. 425 – 431.

Здобувачем проведено комп'ютерне моделювання та оптимізація екрану.

16. Олексенко С.В. Оптимизационный подход к выбору типа высокоскоростного линейного электромеханического преобразователя ударного действия / В.Ф. Болух, С.В. Олексенко, И.С. Щукин // Вісник НТУ «ХПІ». – 2015. – № 5 (1114). – С.12 – 19.

Здобувачем проведено комп'ютерне моделювання та оптимізація лінійних перетворювачів ударної дії.

17. Олексенко С.В. Параметрический синтез и анализ эффективности многосекционного линейного индукционно-динамического ускорителя с наружным экраном / В.Ф. Болух, С.В. Олексенко // Вісник НТУ «ХП». – 2015. – № 42 (1151). – С.12 – 18.

Здобувачем запропоновано критерії синтезу багатосекційного лінійного електродвигуна індукційного типу.

18. Олексенко С.В. Влияние начальных отклонений якоря на показатели индукционно-динамической катапульты баллистического лазерного гравиметра / В.Ф. Болух, С.В. Олексенко, А.И. Винниченко // Український метрологічний журнал. – 2015. – № 3. – С. 31 – 36.

Здобувачем проведено комп'ютерне моделювання індукційно-динамічного перетворювача балістичного гравіметра.

19. Олексенко С.В. Линейный электромеханический доускоритель индукционно-динамического типа / В.Ф. Болух, С.В. Олексенко // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2015. – № 2. – 81 – 89.

Здобувачем проведено комп'ютерне моделювання та оптимізація лінійного перетворювача.

20. Заявка № а201503719 на винахід України. Електромеханічний лінійно-поворотний перетворювач ударної дії / Болух В.Ф., Олексенко С.В. – Заявл. 20.04.2015. (Висновок про відповідність умовам патентноздатності від 28.12.2015).

Здобувачем розроблено креслення, описано принцип роботи пристрою.

21. Олексенко С.В. Возвратно-поступательный цикл линейного индукционного импульсного двигателя / С.В. Олексенко, В.Ф. Болух // Вісник кафедри «Електротехніка». – Донецьк: ДонНТУ. – 2012. – С. 83 – 85.

Здобувачем досліджено робочі процеси лінійного електродвигуна індукційного типу.

22. Олексенко С.В. Влияние геометрических параметров массивного якоря на эффективность индукционно-динамического двигателя / В.Ф. Болух, С.В. Олексенко / Тези доповідей ХХ міжн. наук.-практ. конф. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я, 15–17 травня 2012, Харків. – Харків: НТУ «ХП». – Ч. II. – С. 145.

Здобувачем виконано моделювання і аналіз впливу геометрії якоря на показники індукційно-динамічного двигуна.

23. Олексенко С.В. Влияние конфигурации якоря на эффективность линейного электромеханического преобразователя / С.В. Олексенко / Тези доповідей науково-практичної конференції «Научные итоги 2012 г.», спец. вып. Технологічний аудит та резерви виробництва. – Харків. – 2012. – С. 29 – 31.

24. Олексенко С.В. Оптимизационный подход к выбору параметров ферромагнитного сердечника индукционно-динамического устройства / В.Ф. Болух, С.В. Олексенко / Современные информационные технологии, средства автоматизации и электропривод: материалы всеукраинской научно-технической

конференции, посвященной 60-летию ДГМА, 17–21 декабря 2012 г. / ред. кол.: А. Ф. Тарасов, Г. П. Клименко. – Краматорск: ДГМА. – С. 38 – 40.

Здобувачем виконано оптимізацію ферромагнітного осердя.

25. Олексенко С.В. Влияние конфигурации ферромагнитного сердечника на эффективность индукционного электромеханического преобразователя ударного действия / В.Ф. Болух, С.В. Олексенко / Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації. Збірник наукових праць XI міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених і спеціалістів, 09–11 квітня 2013. – Кременчук: КрНУ. – С. 285 – 286.

Здобувачем проаналізовано вплив ферромагнітного осердя на показники лінійного індукційно-динамічного двигуна.

26. Олексенко С.В. Синтез параметров ферромагнитного сердечника индукционно-динамического двигателя / В.Ф. Болух, С.В. Олексенко, И.С. Щукин // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXI міжнар. наук.-практ. конф., 29–31 травня 2013, Харків. – Харків: НТУ «ХП». – Ч. II. – С.142.

Здобувачем обґрунтовано оптимізаційний підхід при виборі геометрії елементів індукційно-динамічного двигуна.

27. Oleksenko S.V. The Use of Fast Cryogenic Cooling and Ferromagnetic Core Greatly Increases Efficiency of a Linear Induction-Dynamic Converter / V.F. Bolyukh, S.V. Oleksenko, I.I. Katkov // Refrigeration science and technology. – 13th international institute of refrigeration conference on cryogenics, April 7–11. – Prague, Czech Republic. – 2014. – P. 268 – 275 (індексовано у «Scopus»).

Здобувачем проведено аналіз лінійного індукційно-динамічного двигуна з криогенним охолодженням.

28. Олексенко С.В. Методика выбора геометрической конфигурации ферромагнитного сердечника индукционно-динамического двигателя / В.Ф. Болух, С.В. Олексенко / Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXII міжнар. наук.-практ. конф., 15–17 жовтня 2014, Харків. – Харків: НТУ «ХП». – Ч. II. – С.151.

Здобувачем обґрунтовано основні чинники, що впливають на вибір геометричної конфігурації елементів індукційно-динамічного двигуна.

29. Олексенко С.В. Экспериментальные исследования индукционно-динамического двигателя / В.Ф. Болух, С.В. Олексенко, И.С. Щукин / Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXII міжнар. наук.-практ. конф., 15–17 жовтня 2014, Харків. – Харків: НТУ «ХП». – Ч. II. – С.152.

Здобувачем обґрунтовано основні чинники, що впливають на показники індукційно-динамічного двигуна.

30. Олексенко С.В. Влияние угла наклона электропроводящего якоря на импульс электродинамических усилий индукционно-динамического устройства / В.Ф. Болух, С.В. Олексенко / Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXII між нар. наук.-практ. конф., 15–17 жовтня 2014, Харків. – Харків: НТУ «ХП». – Ч. II. – С. 153.

Здобувачем виконано комп'ютерне моделювання і аналіз робочих процесів.

31. Олексенко С.В. Исследование линейного электромеханического преобразователя ударного типа с ферромагнитным сердечником / М.Ю. Хохлов, В.Ф. Болух, С.В. Олексенко // Вісник «Електротехніка». – Донецьк: ДонНТУ. – 2014. – С. 17 – 19.

Здобувачем виконано комп'ютерне моделювання двигуна.

32. Олексенко С.В. Влияние параметров якоря на силовые и скоростные показатели индукционно-динамического и электромагнитного привода высокоскоростных электрических аппаратов / С.В. Олексенко / Интеллектуальные энергосистемы: тезисы доклада II межд. молод. форума, 6–10 октября 2014, Том 2. – Томск: Энергетический институт Томского политехнического университета. – С. 99 – 102.

33. Олексенко С.В. Влияние геометрических параметров якоря на силовые показатели индукционно-динамического устройства / В.Ф. Болух, С.В. Олексенко, И.С. Щукин / Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXIII міжнар. наук.-практ. конф., 20–22 травня 2015, Харків. – Харків: НТУ «ХПІ». – Ч. II. – С. 81.

Здобувачем проаналізовано вплив геометрії якоря на показники лінійного індукційно-динамічного перетворювача.

34. Олексенко С.В. Анализ работы ударного электромеханического преобразователя индукционно-электромагнитного типа / В.Ф. Болух, С.В. Олексенко / Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXIII міжнар. наук.-практ. конф., 20–22 травня 2015, Харків. – Харків: НТУ «ХПІ». – Ч. II. – С. 82.

Здобувачем проаналізовано робочі процеси ударного перетворювача індукційно-електромагнітного типу.

35. Олексенко С.В. Влияние радиальных разрезов ферромагнитного экрана на эффективность индукционно-динамического преобразователя / В.Ф. Болух, С.В. Олексенко / Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXIII міжнар. наук.-практ. конф., 20–22 травня 2015, Харків. – Харків: НТУ «ХПІ». – Ч. II. – С. 83.

Здобувачем проаналізовано вплив конструктивних особливостей і конфігурації ферромагнітного осердя на показники лінійного перетворювача.

36. Oleksenko S.V. Influence of the ferromagnetic shield on efficiency of a hybrid multi-stage coilgun / S.V. Oleksenko // International young scientists forum on applied physics (YSF-2015), Sept.29 – Oct. 2. – Dnipropetrovsk, Ukraine. – 2015. – DOI: 10.1109/YSF.2015.7333162

Олексенко С.В. Оцінка показників лінійних електромеханічних перетворювачів ударної дії з високою магнітною сумісністю. – на правах рукопису.

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

Дисертацію присвячено розробці комплексу науково-технічних рішень, спрямованих на оцінку показників лінійних електромеханічних перетворювачів ударної дії з високою магнітною сумісністю.

Запропонована імітаційна математична модель лінійного електромеханічного перетворювача ударної дії, що описує взаємопов'язані просторово-часові електричні, магнітні, механічні та теплові процеси із змінними параметрами. Визначено геометричні параметри електропровідного якоря, феромагнітних осердя та екрана, при яких перетворювач забезпечує найбільші показники.

Отримала подальший розвиток методика синтезу параметрів високоефективного лінійного електромеханічного перетворювача ударної дії, заснована на використанні комплексного критерію ефективності, який враховує основні показники при різних варіантах стратегії вибору. Встановлено, що криогенне охолодження до температури рідкого азоту обмотки індуктора дозволяє збільшити ККД лінійних електромеханічних перетворювачів ударної дії в 1,6 раз, при охолодженні якоря – в 5 разів, а при одночасному їх охолодженні – в 11 разів. Розроблено конструктивні схеми лінійних електромеханічних перетворювачів ударної дії індукційно-електромагнітного типу ударної і ударно-поворотної дії. Розроблено методику експериментальних досліджень лінійних електромеханічних перетворювачів ударної дії з одночасним вимірюванням електричних і механічних показників.

Показана ефективність використання лінійних електромеханічних перетворювачів ударної дії для катапульти балістичного лазерного гравіметра, виконавчих механізмів швидкодіючих реле, пристроїв ударно-механічного очищення проводів ліній електропередач від налипання снігу і обмерзання та технологічного обладнання від сипучих матеріалів, пристроїв знешкодження інформації на цифрових носіях.

Ключові слова: лінійний електромеханічний перетворювач ударної дії, перетворювач індукційного типу, перетворювач електромагнітного типу, перетворювач електродинамічного типу, імітаційна математична модель, електромеханічні показники, масогабаритні показники, магнітне поле розсіювання.

Олексенко С.В. Оценка показателей линейных электромеханических преобразователей ударного действия с высокой магнитной совместимости. – на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – электрические машины и аппараты. – Национальный

технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2016.

Диссертация посвящена разработке комплекса научно-технических решений, направленных на оценку эффективности линейных электромеханических преобразователей ударного действия с высокой магнитной совместимости.

На основе анализа научно-технических источников установлено, что линейные электромеханические преобразователи ударного действия широко применяются в ударно-силовых устройствах и для ускорения объектов до высоких скоростей. Однако КПД существующих линейных электромеханических преобразователей ударного действия находится на низком уровне. Кроме того, во время работы линейных электромеханических преобразователей ударного действия последние создают очень значительные импульсные магнитные поля рассеяния, которые резко негативно влияют на близко расположенное оборудование и экологическую чистоту для биологических объектов.

Предложена имитационная математическая модель линейного электромеханического преобразователя ударного действия, описывающая взаимосвязанные пространственно-временные электрические, магнитные, механические и тепловые процессы с переменными параметрами. Определены геометрические параметры электропроводящего якоря, ферромагнитных сердечника и экрана, при которых преобразователь обеспечивает наибольшие показатели. Предложена конструкция комбинированного экрана, обеспечивающего снижение магнитных полей рассеяния до 4 раз по сравнению с ферромагнитным экраном.

Получила дальнейшее развитие методика синтеза параметров высокоэффективного линейного электромеханического преобразователя ударного действия, основанная на использовании комплексного критерия эффективности, который учитывает основные показатели при различных вариантах стратегии выбора. Установлено, что криогенное охлаждение до температуры жидкого азота обмотки индуктора позволяет увеличить КПД линейных электромеханических преобразователей ударного действия в 1,6 раза, при охлаждении якоря – в 5 раз, а при одновременном охлаждении – в 11 раз. Разработаны конструктивные схемы линейных электромеханических преобразователей ударного действия индукционно-электромагнитного типа ударного и ударно-поворотного действия, которые позволяют увеличить импульс электродинамических усилий более чем в 2,2 раза, КПД – более чем в 2 раза в сравнении с линейным электромеханическим преобразователем ударного действия индукционного типа. Разработана методика экспериментальных исследований линейных электромеханических преобразователей ударного действия с одновременным измерением электрических и механических показателей. Экспериментально установлено, что ферромагнитный экран позволяет увеличить скорость электропроводящего якоря до 47 %, уменьшить максимальный ток в обмотке индуктора до 35 % и увеличить время достижения максимального тока на 12 %. Получено удовлетворительное согласие между экспериментальными и расчетными показателями линейных электромеханических преобразователей ударного действия.

Показана эффективность использования линейных электромеханических

преобразователей ударного действия для катапульты баллистического лазерного гравиметра, исполнительных механизмов быстродействующих реле, устройств ударно-механической очистки проводов линий электропередач от налипания снега и обледенения и технологического оборудования от сыпучих материалов, устройств обезвреживания информации на цифровых носителях.

Результаты, полученные в диссертационной работе, внедрены в учебный процесс, применены в ННЦ «Институт метрологии», в ООО «Фирма «ТЭТРА, Ltd», в АК «Харьковоблэнерго», а также могут быть использованы проектными, научно-исследовательскими и промышленными учреждениями электротехнического профиля для последующего внедрения.

Ключевые слова: линейный электромеханический преобразователь ударного действия, преобразователь индукционного типа, преобразователь электромагнитного типа, преобразователь электродинамического типа, имитационная математическая модель, электромеханические показатели, массогабаритные показатели, магнитное поле рассеяния.

Oleksenko S.V. Evaluation of Performance Linear Electromechanical Transducers Impact of High Magnetic Compatibility. – Manuscript.

The thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.09.01 – electrical machinery and apparatus. – National technical university «Kharkiv polytechnic institute», Kharkiv, 2016.

The thesis is devoted to development of complex scientific and technical solutions aimed at improving the efficiency linear electromechanical transducers with high magnetic compatibility.

The proposed computer model linear electromechanical transducers with ferromagnetic core, describing connected field-temporal electrical, magnetic, mechanical and thermal processes with variable parameters. The optimum form of section and parameters conductive anchor linear electromechanical transducers induction type. The influence of the configuration and geometrical parameters ferromagnetic core, ferromagnetic shield, electromagnetic shield and combined on screen indicators linear electromechanical transducers. Further developed methods of synthesis parameters highly linear electromechanical transducers, based on a comprehensive criteria. The effect of cryogenic cooling efficiency linear electromechanical transducers. Developed design schemes linear electromechanical transducers electromagnetic induction-type. The method of experimental studies linear electromechanical transducers simultaneous measurement of electrical and mechanical performance. Experimentally confirmed the basic theoretical training is shown linear electromechanical transducers efficiency.

Keywords: electrical machines, linear motors, induction-dynamic transducer, electrodynamic transducer, electromagnetic transducer, electromechanical performance, weight and overall dimensions, magnetic stray field.



Підписано до друку 22.02.2016 р. Формат 60х90/16.
Гарнітура Times New Roman. Папір офсетний.
Друк – різнограф. Ум. друк. аркушів. 0,9
Наклад 100 прим. Зам. №

Надруковано у ТОВ «ПЛАНЕТА-ПРІНТ».
61002, м. Харків, вул. Багалія, 16
ЄДРПОУ 31235131 від 19.12.2000 р.