

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

**Болюх Володимир Федорович**

УДК 621.313:536.2.24:539.2

**НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ  
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ІМПУЛЬСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ІНДУКЦІЙНОГО  
ТИПУ З КРІОРЕЗИСТИВНИМИ ОБМОТКАМИ**

Спеціальність 05.09.01 - Електричні машини і апарати

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Харків - 2003

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі загальної електротехніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор  
**Данько Володимир Григорович**,  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
завідувач кафедри загальної електротехніки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Яковлєв Олександр Іванович**,  
Національний аерокосмічний університет ім.  
М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»,  
завідувач кафедри енергетики та електротехніки;

доктор технічних наук, професор  
**Дудник Михайло Захарович**,  
Донецький національний технічний університет,  
завідувач кафедри електромеханіки і теоретичних основ елек-  
тротехніки;

доктор технічних наук, доцент,  
**Васьковський Юрій Миколайович**,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»,  
професор кафедри електромеханіки.

Провідна установа: Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ

Захист відбудеться « 30 » жовтня 2003 р. о 14.30 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 в бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Автореферат розісланий " 15 " вересня 2003 р.

В. о. вченого секретаря  
спеціалізованої вченої ради

Набока Б.Г.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Одним із важливих напрямків розвитку електромеханіки у ХХІ столітті є істотне поліпшення параметрів традиційних і створення нових високоефективних спеціалізованих пристроїв, що можливо реалізувати за рахунок використання матеріалів з унікальними властивостями, застосування нетрадиційних конструкцій, залучення накопичених знань із суміжних галузей науки і техніки. В цьому сенсі провідники, які функціонують при кріогенному охолодженні, розглядаються як одні з найбільш перспективних електротехнічних матеріалів, що дозволяють за рахунок багаторазового або повного зменшення опору радикально зменшити втрати та підвищити ККД електромеханічних устроїв. Забезпечуючи високі щільності струму в обмотках, можна збуджувати сильні магнітні поля в активній зоні та вилучити феромагнетик з магнітного кола електромеханічного перетворювача, тим самим поліпшуючи його динамічні характеристики і питомі показники.

Електромеханічні перетворювачі з кріорезистивними обмотками збудження (КРОЗ), що виготовлені з традиційних провідникових матеріалів, почали розроблятися з 60-х років минулого століття. Однак при роботі з високими навантаженнями струмом у перетворювачах з довготривалими режимами роботи кріорезистивні обмотки не змогли скласти достойну конкуренцію надпровідниковим, не зважаючи на свою дешевизну, простоту конструкції, функціонування та живлення. При цьому КРОЗ досить широко використовуються у статичних електрофізичних пристроях, призначених для створення сильних імпульсних магнітних полів.

Можна передбачити, що застосування кріорезистивних обмоток, які охолоджуються рідким азотом, у цілому класі електромеханічних пристроїв з коротким робочим циклом і високими ударними навантаженнями буде ефективним. В першу чергу це електромеханічні імпульсні перетворювачі індукційного типу (ЕППТ) з лінійним переміщенням якоря, що забезпечують як високі швидкості на короткій активній ділянці, так і значні ударні навантаження при невеликих переміщеннях. Такі пристрої, що широко використовуються у багатьох галузях науки, техніки, оборони та інших сферах життєдіяльності, мають досить низький ККД, що робить задачу по їх удосконаленню актуальною. При цьому необхідно враховувати, що рідкий азот, який використовується для охолодження КРОЗ, є широко доступним, безпечним і дешевим холодоагентом, гарним діелектриком і не вимагає складної системи теплового захисту та рекуперації.

Однак при створенні кріогенних ЕППТ виникає комплекс невирішених теоретичних і практичних проблем. Так, хоча охолоджена рідким азотом обмотка з провідникового матеріалу має багаторазово зменшений опір, але при навантаженні струмом її опір може істотно зрости через омичний нагрів та магніторезистивний ефект. Більш того, у кріорезистивній обмотці можуть виникати електротеплові процеси, що призводять до її термічного пошкодження навіть не зважаючи на наявність кріогенної рідини. Оскільки на характер такого процесу впливає у різній мірі ряд факторів (умови охолодження обмотки та її конструктивне виконання, магнітні зв'язки з іншими провідниковими елементами, тип джерела і його параметри, тривалість робочого циклу та ін.), то передбачити динаміку зміни і величину струму в КРОЗ досить складно. Ще менш очевидні процеси відбуваються у ЕППТ при швидкому переміщенні виконавчого елемента (ВЕ), оскільки від струму у первинній обмотці істотно залежить індукований струм у вторинному якорі, магнітний зв'язок між якими у процесі короткого робочого циклу швидко змінюється. Це робить актуальним наукову задачу по визначенню основних тенденцій та закономірностей, що відбуваються у кріогенному ЕППТ, на базі математичної моделі, яка враховує усі нелінійні взаємозв'язки та параметри. В цілому розробка комплексу науково-технічних заходів по створенню високоефективних ЕППТ з кріорезистивними обмотками, які охолоджуються рідким азотом, вирішується вперше і викликає науковий та практичний інтерес.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана в рамках науково-дослідних робіт Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», тематика яких безпосередньо пов'язана з:

- держбюджетною темою № М1502 «Дослідження статора експериментального кріотурбогенератора», № ДР 01.87.0051371 (1990 р.) (здобувач - виконавець);
- хоздоговірною темою № 15331 «Аналіз відомих технічних рішень і схем електродинамічних розгінних пристроїв, схеми підключення та розрахунки накопичувачів енергії для електродинамічних розгінних пристроїв» (1994 р.) (відповідальний виконавець);
- держбюджетною темою № М1510 «Підвищення ефективності електромеханічних систем при використанні надпровідникових та кріорезистивних обмоток», ДР № 0197U001924 (1997 р.) (відповідальний виконавець);
- держбюджетною темою № КН1511 «Розробка електродинамічного лінійного двигуна та пристроїв на його основі» (проект № 04.08/03074 Міністерства України з питань науки і технологій, договір № 2/1309-97, ДР № 0198U001063) (1997 р.) (відповідальний виконавець);
- держбюджетною темою № М1512 «Розробка і удосконалення електромеханічних та електродинамічних перетворювачів енергії з високими електромагнітними навантаженнями і кріогенним охолодженням», № ДР 0100U001696 (2000 р.) (відповідальний виконавець);
- хоздоговірною темою № 15812 «Розробка і дослідження високошвидкісного електродинамічного приводу», № ДР 0101U005983 (2001 р.) (науковий керівник);
- держбюджетною темою № М1513 «Теоретичні і експериментальні дослідження високоефективних електромеханічних імпульсних перетворювачів енергії» (2003 р.) (відповідальний виконавець).

**Мета і задачі дослідження.** Мета роботи - на базі узагальнення накопиченого досвіду в імпульсній електромеханіці та кріогенній техніці розробити комплекс науково-технічних заходів по створенню високоефективних електромеханічних імпульсних перетворювачів індукційного типу з кріорезистивними обмотками, що охолоджуються рідким азотом.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- проаналізувати й узагальнити основні властивості кріорезистивних обмоток, що працюють в електромагнітних та електромеханічних пристроях, а також основні різновиди електромеханічних імпульсних перетворювачів, що забезпечують лінійний рух;
- розробити методику розрахунку швидкодіючих процесів, які виникають при високих короткочасних навантаженнях кріорезистивних обмоток, а також при роботі електромеханічних перетворювачів індукційного типу з цими обмотками;
- визначити вплив кріогенного охолодження і основних геометричних параметрів на робочі показники силових та енергетичних ЕППТ, що збуджуються від джерела постійної напруги (ДПН) та ємнісного накопичувача (ЄН);
- визначити раціональні конфігурації основних елементів та встановити характер імпульсних сил при роботі ЕППТ;
- визначити конструктивні, параметричні та схемні шляхи удосконалення кріогенних ЕППТ; проаналізувати технічні аспекти цих перетворювачів;
- обґрунтувати концепції перспективних високоефективних кріогенних ЕППТ;
- на лабораторних моделях ЕППТ експериментально підтвердити достовірність розрахункової методики та основних технічних рішень.

*Об'єктом дослідження є кріорезистивні обмотки, що охолоджуються рідким азотом, та електромеханічні імпульсні перетворювачі індукційного типу з такими обмотками, що забезпечують лінійний рух.*

*Предметом дослідження є визначення впливу кріогенного охолодження на робочі характеристики і параметри ЕППТ традиційних та перспективних конструкцій.*

*Методи дослідження.* Теоретичні дослідження електромагнітних систем і електромеханічних перетворювачів з кріорезистивними обмотками базуються на чисельно-аналітичних математичних моделях, що враховують електричні, магнітні, теплові та механічні параметри з урахуванням їх нелінійних залежностей. Розрахунок основних перехідних процесів засновується на аналітичному рішенні системи диференціальних рівнянь з поданням виразів у рекурентному вигляді для наступного розрахунку на ЕОМ робочих характеристик і параметрів з урахуванням реальних умов функціонування перетворювачів.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

- обґрунтована доцільність і створена теоретична база для розробки високоефективних ЕППТ, що охолоджуються рідким азотом;
- розроблена методика розрахунку комплексу взаємопов'язаних електричних, магнітних, теплових і механічних процесів з урахуванням нелінійності основних параметрів у кріогенних електромагнітних системах та електромеханічних перетворювачах, що працюють з високими імпульсними навантаженнями;
- визначені та узагальнені основні закономірності роботи кріогенних ЕППТ;
- запропоновано структурно-геометричний і оптимізаційний підходи до аналізу ефективності ЕППТ;
- запропоновані й обґрунтовані концепції кріогенних ЕППТ з поліпшеними просторо-часовими характеристиками;
- отримані експериментальні дані, які підтверджують правомірність прийнятих математичних моделей і основних технічних рішень.

**Практичне значення одержаних результатів:**

- показана технічна здійсненність електромеханічних імпульсних перетворювачів індукційного типу з кріорезистивними обмотками, що охолоджуються рідким азотом;
- запропонована інженерна методика розрахунку основних робочих параметрів і характеристик кріогенних ЕППТ;
- встановлено вплив параметрів основних і додаткових елементів на робочі процеси кріогенних ЕППТ при збудженні від ДПН та ЄН;
- запропоновані конструктивні схеми односекційних кріогенних імпульсних перетворювачів індукційного типу та визначені їх параметри;
- обґрунтовані межі доцільності використання різних схем електронної системи керування ємнісним накопичувачем для кріогенних ЕППТ;
- запропоновані конструктивні схеми і визначені робочі параметри кріогенних багатосекційних ЕППТ з послідовним збудженням секцій статорної обмотки та з рухомими обмотками збудження.

Впровадження основних наукових і практичних результатів дисертаційної роботи знайшло відображення у 7 науково-дослідних держбюджетних і хоздоговірних роботах, які проводяться в НТУ «ХП» з 1990 р. по теперішній час. Результати досліджень на протязі 1987-1999 р.р. використані при викладанні дисертантом навчальної дисципліни «Кріогенні електричні машини і установки» для студентів старших курсів кафедри технічної кріофізики фізико-технічного факультету НТУ «ХП». Під керівництвом дисертанта було виконано ряд курсових і дипломних проєктів студентами, тематика яких пов'язана із розробкою високоефективних електромеханічних імпульсних перетворювачів індукційного типу, для охолодження яких використовується рідкий азот.

Результати роботи, що проводяться на протязі з 1997 р. по теперішній час, використані ТОВ Фірма «ТЕТРА, Ltd» (м. Харків) при створенні ряду перспективних імпульсних електромеханічних перетворювачів різноманітного призначення, що забезпечують швидкісний рух і ударно-силову взаємодію. Дисертант приймав безпосередню участь у цих роботах при дослідженнях, розрахунках, випробуваннях і патентуваннях перспективних електромеханічних перетворювачів, що функціонують при температурі навколишнього середовища. Результати ро-

боти впроваджені також науково-виробничою фірмою «ФЕРТА» (м. Харків) при розробці кріорезистивного магніту для системи ультразвукового контролю внутрішніх дефектів у ферромагнітних та електропровідних об'єктах.

**Особистий внесок здобувача.** Наукові положення та результати, які представлено у дисертаційній роботі, отримані здобувачем особисто. Здобувач розробив комплекс теоретичних і розрахункових заходів по імпульсному збудженню КРОЗ, що охолоджуються рідким азотом, а також запропонував використовувати такі обмотки у ЕППТ. Всі основні результати по розробці основних технічних рішень і розрахунку кріогенних ЕППТ виконані здобувачем. Спільно з співавторами проведено обговорення основних концепцій та варіантів, виконані конструкторські, технологічні і патентні роботи, виготовлені лабораторні моделі та проведені експериментальні дослідження електромеханічних перетворювачів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на: Республіканській науково-технічній конференції «Перспективи развития электромашиностроения на Украине», Харків, 1988 р.; Науково-технічному семінарі «Совершенствование судовых и автономных электромеханических систем», Севастополь, 1990 р.; II Всесоюзній конференції по теоретичній електротехніці, Вінниця, 1991 р.; VI Всесоюзній науково-технічній конференції "Динамические режимы работы электрических машин и электроприводов", Бішкек, 1991; Науково-технічній конференції «Проблемы электромашиностроения», Ленінград, 1991; IV науково-технічній конференції «Проблемы нелинейной электротехники», Київ, 1992; Науково-технічному семінарі «Электромеханические системы в промышленности и на транспорте», Севастополь, 1992; Міжнародному науково-технічному семінарі "Электромеханические системы с компьютерным управлением на автотранспортных средствах и в их роботизированном производстве", Суздаль, 1993; Міжнародних науково-технічних конференціях "Компьютер: наука, техника, технология, здоровье", Харків, 1993, 1994; Міжнародній науково-технічній конференції «Приборостроение-93 и новые информационные технологии», Миколаїв, 1993; Симпозіумі з міжнародною участю «Наука и предпринимательство», Львів, 1994; Науково-технічній конференції з міжнародною участю "Приборостроение-94", Новий Світ, Крим, 1994; Міжнародних науково-технічних конференціях "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я", Харків, 1995...2002; Науково-технічній конференції з міжнародною участю "Приборостроение-95", Львів, 1995; Конференції з міжнародною участю «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика», Алушта, Крим, 1996; The 1st International Modelling School, Alushta, Krym, 1996; Конференції з міжнародною участю «Електромеханіка. Теорія і практика», Львів-Славське, 1996; The 3<sup>rd</sup> Internat. scientific and technical conf. "Unconventional electromechanical and electrical systems", Alushta, The Crimea, 1997; The 5th IIR Internat. conf. "Cryogenics'98", Praha, Czech Republic, 1998; Міжнародній науково-технічній конференції «Силовая электроника та енергоефективність», Алушта, Крим, 1998; VI та VII Міжнародних конференціях «Проблеми сучасної електротехніки», Київ, 2000, 2002; Міжнародних симпозіумах «Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика», Харків, 2000...2002; VIII Міжнародній науково-практичній конференції «Совершенствование мощностных, экономических и экологических показателей ДВС», Владимир, 2001; Міжнародній науково-технічній конференції «Інформаційна техніка та електромеханіка на порозі XXI століття» (ІТЕМ-2001), Луганськ, 2001 р.

**Публікації.** Основні положення дисертації відображено у 60 публікаціях, серед яких 21 виконано без співавторів, у тому числі: 1 монографія, 30 статей у наукових журналах і 15 статей у збірниках наукових праць, 7 патентів на винаходи України та 1 патент на винахід Росії.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків по роботі, списку використаних джерел та 3 додатків. Повний обсяг дисертації складає 484 сторінки. Робота містить 22 ілюстрації до тексту, 160 ілюстрацій на 127 сторінках; 16

таблиць до тексту, 23 таблиці на 20 сторінках; списку використаних джерел із 429 найменувань на 44 сторінках; 3 додатка на 19 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації складає 298 сторінки.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність вибраної теми, сформульовано мету та основні задачі дисертаційної роботи, наведена загальна її характеристика.

У першому розділі виконано аналіз стану робіт в електромеханіці, що використовує криогенне охолодження, та розглянуті перспективні пристрої для застосування такого охолодження. На базі огляду науково-технічної та патентної літератури, аналізу і узагальнення досліджень, що проводяться у галузі криогенних електротехнічних пристроїв та машин, силових та енергетичних (розгінних) електромеханічних перетворювачів з високими навантаженнями, які функціонують при температурі навколишнього середовища і забезпечують лінійний рух, визначені основні невирішені проблеми та обґрунтовано напрям досліджень.

У другому розділі розглянута робота КРОЗ у короткочасному режимі при високих електромагнітних навантаженнях. Розроблена методика розрахунку, при якій перехідний процес розділяється на малі інтервали часу  $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ . По отриманим в момент часу  $t_{k+1}$  значенням струму  $i$  розраховуються розподілені по перетину обмотки температура  $T$  та індукція магнітного поля  $B$  (рис.1). По температурному навантаженню визначаються теплоємність  $c(T)$ , теплопровідність і коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_T(T)$ . Одержані значення використовуються для розрахунку зміненого питомого опору обмотки  $\rho(T, B)$ , що є вихідним для розрахунку струмів на наступному інтервалі часу  $\Delta t = t_{k+2} - t_{k+1}$ .

Встановлено, що у короткочасному режимі роботи у порівнянні з довготривалим, допустиме більш високе струмове навантаження КРОЗ. Критичну щільність струму, що відповідає переходу від бульбашкового до плівчастого режиму кипіння криогенної рідини з температурою  $T_0$ , можна оцінити виразом

$$j_k(t) = 2\pi^{-1} d_0^{-1} \left\{ (T_k - T_0) \rho(T_k) (D_{ex} + D_{in})^{-1} w^{-1} \left[ 0,5\pi\gamma t^{-1} c(T_k) H (D_{ex}^2 - D_{in}^2) + 2F_\alpha \alpha_T(T_k) \right] \right\}^{0,5}, \quad (1)$$

де  $T_k$  - критична температура зміни режиму кипіння;  $w$  - число витків обмотки діаметром  $d_0$  і щільністю  $\gamma$ ;  $D_{ex}$ ,  $D_{in}$  - зовнішній та внутрішній діаметри обмотки висотою  $H$ ;  $F_\alpha$  - поверхня охолодження обмотки.

При підключенні до ДПН з параметрами  $R_0$ ,  $L_0$ ,  $U_0$  струм та усереднене по перетину перевищення температури КРОЗ представляються у вигляді

$$i(t_{k+1}) = i_c + [i(t_k) - i_c] \exp(U_0 i_c^{-1} (L_0 + L) \Delta t); \quad (2)$$

$$\theta(t_{k+1}) = \iota + [\theta(t_k) - \iota] \exp\left\{ 4\alpha_T F_\alpha \Delta t \left[ \pi\gamma H (D_{ex}^2 - D_{in}^2) c(T) \right]^{-1} \right\}, \quad (3)$$

де  $i_c = U_0 [R_0 + R(T, B)]^{-1}$ ;  $\iota = R(T, B) i_c^2 (t_k) F_\alpha^{-1} \alpha_T^{-1}$ ;

$R(T, B)$ ,  $L$  - опір та індуктивність обмотки.

При збудженні КРОЗ від ЄН з параметрами  $C$ ,  $U_0$ , якщо величина опору  $R(T, B) < 2\sqrt{L/C}$ , рекурентне співвідношення для струму приймає вигляд

$$i(t_{k+1}) = -\omega^{-1} \exp(-0,5\Delta t R(T, B) L^{-1}) \left\{ \tilde{u} \sin(\omega\Delta t) + i(t_k) (LC)^{-0,5} \times \right. \\ \left. \times \sin[\omega\Delta t - \arctg(-2\omega L R^{-1}(T, B))] \right\}, \quad (4)$$

де  $\omega = [(LC)^{-1} - 0,25R^2(T, B)L^{-2}]^{0,5}$ ;  $K_{13} = M_{13}[(L_0 + L_1)L_3]^{-0,5}$   
 $u_c(t_k)$  - напруга на ЄН.

Якщо величина опору  $R(T, B) > 2\sqrt{L/C}$ , струм приймає вигляд

$$i(t_{k+1}) = \tilde{u} \cdot (y_1 - y_2) + i(t_k)(x_2 y_1 - x_1 y_2); \quad (5)$$

де  $\mathbf{U}_0$ ;  $R(T, B) < 2\sqrt{L/C}$ .

При підключенні до ДПН зменшення початкової температури  $T_0$  призводить до появи вираженого піку струму, амплітуда якого у 4...8 разів перевищує величину струму неохолодженої обмотки, причому чим нижчі початкова температура та індуктивність обмотки, тим більше амплітуда і менше тривалість імпульсу струму. Охолодження рідким азотом при використанні ЄН дозволяє змінити характер процесу збудження обмотки від аперіодичного до коливально-загасаючого зі збільшенням амплітуди струму у 2...3 рази, або при збереженні коливального характеру збільшити максимальне значення першого напівперіоду струму на 40...60 % із зростанням струму в наступні напівперіоди у 3...5 разів.

Визначено вплив геометричних параметрів обмоток та їх джерел на ефективність збудження. Встановлено, що при зниженні індуктивності обмотки за рахунок зменшення числа витків при збільшенні діаметра проводу  $d_0$  відбувається зменшення параметра

$$\alpha_I = \theta^{-1} \int_0^{t_p} j^2(t) dt, \text{ оскільки підвищення температури відбувається швидше, ніж ріст інтег-}$$

ралу струму за час навантаження  $t_p$ . При цьому параметр  $\beta_F = i_m w U_0^{-1}$ , що характеризує максимальну МРС при заданій напрузі джерела, при використанні ДПН підвищується, а при використанні ЄН - зменшується. На рис.2 показані відносні значення максимальної щільності струму  $j_m^*$  і параметра  $\alpha_I^*$ , отримані в охолодженій рідким азотом обмотці до відповідних значень «теплої» (неохолодженої) обмотки у залежності від діаметру  $d_0$  мідного проводу.

На основі отриманих рекуррентних співвідношень, що описують електричні і теплові процеси, виконані розрахунки і встановлені основні електродинамічні параметри кріогенних електромагнітних систем (силових ЕППТ), у яких обмотка збудження індуктивно взаємодіє з коаксіально розташованим якорем, виконаним у вигляді вторинної короткозамкненої обмотки (ВКО). Встановлено, що максимальна величина питомого імпульсу електродинамічної сили (ЕДС) при використанні, відповідно ДПН і ЄН

$$\gamma_f = \int_0^{t_p} f_z(t, z) dt \bigg/ \int_0^{t_p} u(i_1) i_1(t) dt; \quad \gamma_f = 0,5 C^{-1} U_0^{-2} \int_0^{t_p} f_z(t, z) dt, \quad (6)$$

де  $f_z(t, z) = i_1(t) \cdot i_2(t) \frac{dM_{12}}{dz}$  - аксіальна ЕДС;  $n=1, 2$  - індекси первинної і вторинної обмоток;  $M_{1,2}$  - взаємоіндуктивність між обмотками,

досягається при певних співвідношеннях геометричних параметрів обмоток. Для цього в електромагнітній системі необхідно вибирати первинну обмотку з параметрами  $\epsilon_{H1}=0,35...0,4$ , що намотана проводом діаметром  $d_0=0,8...0,9$  мм, а вторинну обмотку з параметрами  $\epsilon_{H2}=0,14...0,16$  при використанні ДПН і  $\epsilon_{H2}=0,1...0,12$  при використанні ЄН, де  $\epsilon_{H1,2} = H_{1,2} (D_{ex} - D_{in})^{-1}$ . Показано, що величина питомого імпульсу ЕДС при використанні ЄН приблизно на порядок вище, ніж при використанні ДПН.



На відміну від багатовиткової короткозамкненої обмотки у масивному електропровідному якорі струм по перетину розподілений нерівномірно. На основі розрахункової методики, згідно якої якір замінюється сукупністю елементарних струмових коаксіальних контурів, виконано аналіз впливу геометричних параметрів масивного якоря на характер розподілу індукованого струму і ЕДС. Визначено, що у дисковій електромагнітній системі найбільші щільності струму виникають на відстані приблизно 2/3 його перетину у радіальному напрямку, причому зовнішні ділянки отримують найбільше навантаження. В електромагнітній системі циліндричної конфігурації характер розподілу ЕДС у вторинному масивному циліндрі істотно залежить від аксіального зсуву відносно обмотки збудження.

Електродинамічна взаємодія між активними елементами електромагнітної системи дискової конфігурації може бути збільшена при наявності двох ВКО, встановлених з протилежних сторін обмотки збудження. При підключенні системи до ДПН струми у первинній (індекс 1) та вторинних (індекси  $n = 2$  и  $3$ ) обмотках можна представити у вигляді

(7)

(8)

При розрахунках струмів в обмотках електромагнітної системи, що збуджується від ЄН, система рівнянь зводиться до диференційного рівняння

$$a_4 \frac{d^4 i_p}{dt^4} + a_3 \frac{d^3 i_p}{dt^3} + a_2 \frac{d^2 i_p}{dt^2} + a_1 \frac{di_p}{dt} + a_0 = 0. \quad (9)$$

Якщо дискримінант резольвенти його характеристичного рівняння менше нуля, то для струмів в обмотках рішення знаходиться у вигляді

$$i_p(t) = U_0 \cdot [A_{p1} \exp(x_1 t) + A_{p2} \exp(x_2 t) + A_{p3} \exp(x_3 t) + A_{p4} \exp(x_4 t)] / \delta, \quad (10)$$

де  $\delta = \alpha_1 + \beta_2 \cdot K_{13} + \beta_3 \cdot K_{12}$ .

Якщо ж зазначений дискримінант позитивний, то рішення знаходиться у вигляді

$$i_p(t) = U_0 \left\{ D_{p1} \exp(x_1 t) + D_{p2} \exp(x_2 t) + \exp(\sigma \cdot t) [D_{p3} \cos(\xi t) + D_{p4} \sin(\xi t)] \right\} / \delta, \quad (11)$$

де  $A_{pl}, D_{pl}$  - постійні, що визначаються з початкових умов.

Отримані аналітичні вирази для струмів використовуються при чисельних розрахунках на ЕОМ основних процесів у електромагнітній системі. На рис.3 показані максимальні значення щільності струму  $j_{mp}$ , перевищення температур  $\theta_{mp}$  і максимальні ЕДС  $f_{zm}$  між зовнішніми вторинними обмотками

$$f_z(t) = i_1(t) \left( i_2(t) \frac{dM_{12}}{dz} + i_3(t) \frac{dM_{13}}{dz} \right) - 2 \cdot i_2(t) \cdot i_3(t) \frac{dM_{23}}{dz}. \quad (12)$$

У порівнянні з базовим варіантом електромагнітної системи, що включає один якір, у запропонованій системі відбувається збільшення максимальних значень ЕДС на 20...60 %. Азотне охолодження підвищує усереднені значення ЕДС системи з двома ВКО при використанні ЄН у 3,5 разів, а при використанні ДПН - у 27 разів. При збудженні від ЄН тепловиділення та перевищення температур обмоток знижуються, а при використанні ДПН ці показники, особливо у вторинних обмотках - істотно зростають.

**У третьому розділі** виконано дослідження енергетичних ЕППТ, що забезпечують лінійний рух якоря з виконавчим елементом (ВЕ). Величину переміщення представляється у вигляді рекурентного співвідношення

$$\Delta Z(t_{k+1}) = \Delta Z(t_k) + V(t_k) \Delta t + \mathfrak{G} \cdot \Delta t^2 / (P + m_2), \quad (13)$$

де  $V(t_{k+1}) = V(t_k) + \mathfrak{G} \cdot \Delta t / (P + m_2)$  - швидкість якоря з ВЕ;

$$\mathfrak{S} = i_1(t_k) i_2(t_k) \frac{dM}{dz}(z) - K_P \Delta Z(t_k) - K_T V(t_k) - 0,125 \pi \gamma_a \beta_a D_{2m}^2 V^2(t_k);$$

$m_2, P$  - маса якоря і ВЕ;  $K_P$  - коефіцієнт пружності буферного елемента;  $K_T$  - коефіцієнт динамічного тертя;  $\gamma_a$  - щільність середовища;  $\beta_a$  - коефіцієнт аеродинамічного опору;  $D_{2m}$  - максимальний діаметр елементів, що прискорюються.

Рішення для струмів у статорній обмотці збудження (СОЗ) (індекс 1) та короткозамкненої обмотці якоря (КОЯ) (індекс 2) для ЕППТ з ДПН представляється у рекурентній формі

(14)

(15)

При підключенні до ЄН, якщо дискримінант рівняння

(16)

від'ємний, то всі його корені  $x_{1,2,3}$  дійсні і рішення для струмів представляється у рекурентному вигляді

(17)

Якщо ж зазначений дискримінант позитивний, то один з його коренів дійсний  $x_1 = d$ , а два інших - комплексно спряжені  $x_{2,3} = f \pm jg$ , і рішення для струмів приймає вигляд

(18)

Ефективність електромеханічного перетворювача оцінюється ККД

(19)

і параметром ефективності прискорення, відповідно при збудженні від ДПН і ЄН

(20)

Значення максимального ККД  $\eta_m$  і параметра  $K_i$  в залежності від навантаження, що прискорюється, для ЕППТ, які функціонують при кімнатній та азотній температурах, показані на рис.4. Встановлені геометричні параметри обмоток, які забезпечують максимальну ефективність ЕППТ для відповідного джерела живлення. Показано, що алюмінієва КОЯ може забезпечити більш високі показники у порівнянні з мідною тільки при малій масі ВЕ  $P$ . При використанні азотного охолодження для ЕППТ з ДПН за рахунок збільшення тривалості імпульсу індукованого струму в КОЯ, по крайній мірі у 2 рази зростає величина силового імпульсу з одночасним зниженням подальшої «паразитної» гальмівної електродинамічної сили. Внаслідок цього ККД перетворювача підвищується у 2...5 разів в залежності від маси ВЕ. Однакові механічні параметри у «криогенному» ЕППТ можна досягти при більш низьких напругах ДПН у порівнянні з неохолодженим «теплим» варіантом. А оскільки ефективна взаємодія обмоток у криогенному перетворювачі відбувається швидше, для нього можна використовувати більш короткий час збудження.

При використанні ЄН, криогенне охолодження за рахунок збільшення струмів в обмотках та зменшення «паразитної» ЕДС призведе до підвищення швидкості якоря у 1,5...3,0 рази при збільшенні ККД ЕППТ у 3...6 рази.

Для встановлення характеру розподілу ЕДС, що діють на тонку КОЯ, використано коло-польовий підхід, при якому струми в обмотках перетворювача визначаються за допомогою магніто пов'язаних кіл, а потім, через сумарне магнітне поле, знаходяться питомі електродинамічні сили. На рис.5 при максимумі електродинамічної сили показано розподіл індукції магнітного поля в активній зоні криогенного ЕППТ при використанні ЄН з енергією  $W_0=3,7$  кДж. Визначено, що для дискового перетворювача найбільшими є аксіальні сили, що діють на ближній до СОЗ шар якірної обмотки, а найменш навантаженим є протилежний віддалений шар. Для циліндричного перетворювача найбільшої величини приймають радіальні ЕДС, причому їх максимальна величина приходиться на задні ділянки якоря, що знаходяться всередині СОЗ.

При використанні масивного якоря замість багатовиткового у ньому виникає перерозподіл питомих ЕДС через нерівномірність розподілу індукованого струму. Аналіз співвідношень геометричних параметрів показує, що оптимальним по ККД і основним механічним показникам є дисковий перетворювач, у якого якір виконаний суцільним без внутрішнього отвору, а його радіальні розміри на 15...25 % перевищують відповідні параметри первинної обмотки. Для циліндричного перетворювача аксіальна висота масивного якоря повинна дорівнювати висоті обмотки збудження. Особливість аксіальних ЕДС по висоті масивного циліндру є в наявності вираженого максимуму, розташованого у передній його частині в напрямку руху, що також спостерігається і в аналогічному ЕППТ з КОЯ, а на задню частину якоря діють незначні гальмівні зусилля. Характер розподілу силових навантажень в основному визначається геометричними параметрами електромеханічного перетворювача, а саме співвідношеннями розмірів масивного якоря відносно статорної обмотки збудження.

Запропоновано структурно-геометричний аналіз ЕППТ, відповідно якому масивний якір може обхвачувати первинну обмотку з декількох сторін. На рис.6,а показано зміну максимального значення ККД ЕППТ  $\eta_m$  з параметром  $\varepsilon_{H1}=0,5$  в залежності від параметрів форми якоря  $\beta_{1,2} = h_{1,2}^{-1}(D_{ex2} - D_{in2})$ , де  $h_{1,2}$  - аксіальна висота внутрішньої і зовнішньої циліндричних обичайок якоря.

Найбільшу ефективність виявляє електромеханічний перетворювач, у якого крім основної дискової частини є зовнішня циліндрична обичайка, висота якої складає приблизно 0,4 від довжини радіальної частини. Дискова і циліндрична конфігурації СОЗ при використанні комбінованого якоря не є найкращими, хоча перша значно ефективніша за другу (рис.6,б). Перевагу має форма первинної обмотки з геометричним параметром  $\varepsilon_{H1}=0,8$ .

Проведена оцінка часу відновлення температурного стану  $t_h$  кріогенних ЕППТ. Показано, що при перевищенні параметром  $\alpha_l$  критичного значення виникає різке збільшення часу  $t_h$ , що пов'язано з переходом у пливчастий режим кипіння рідкого азоту. В енергетичних ЕППТ час пасивного періоду визначається часом охолодження обмотки збудження, а у силових перетворювачах - якірної обмотки. Для зменшення часу відновлення  $t_h$  рекомендується використовувати короткі робочі імпульси збудження, а також формування каналів для охолодження обмоток, що особливо важливо при переході у пливчастий режим кипіння азоту після активного робочого періоду.

**У четвертому розділі** розглянуті шляхи удосконалення кріогенних ЕППТ. Встановлено вплив на характеристики перетворювача дискової конфігурації статорної короткозамкненої обмотки (СКО), що розташована коаксіально з обмоткою збудження протилежно рухомому якорю. За допомогою математичного моделювання з'ясовано, що СКО значної висоти зменшує ефективність, а при малій висоті - підвищує, виконуючи функцію елемента форсування динамічних показників. В кріогенному дисковому перетворювачі при наявності СКО, висота якої не перевищує 4...8 % висоти обмотки збудження, забезпечується підвищення електромеханічних показників до 40 %. При цьому сама первинна обмотка може бути виконана з радіальними каналами, загальна ширина яких складає  $1,2...1,5 \cdot H_1^*$ , де  $H_1^*$  - висота компактної обмотки збудження, що за рахунок збільшення поверхні охолодження забезпечує також підвищення критичних струмових навантажень.

Уведення СКО з висотою  $H_3$  в електромагнітну систему циліндричного ЕППТ істотно впливає на ефективність перетворення енергії у залежності від її розташування (рис.7). Найбільша гальмівна дія виникає при осьовому зсуві СКО на відстань  $Z_3^* = 2\Delta Z_{13} / (H_1 + H_3) = -0,66$ . Зазначену дію можна пояснити тим, що оскільки струми у вторинних обмотках мають однакову полярність з незначним фазовим зсувом на початку роботи, а СКО розташована проти напрямку руху якоря, то між ними виникає сила, що гальмує якір. Якщо СКО зсунути вперед в напрямку руху якоря на величину  $Z_3^*=0,66$ , то ефективність ЕППТ підвищується. Це можна пояснити тим, що полярність струмів у вторинних обмотках

на початку роботи однакова, і через зсув СКО відносно центру КОЯ в сторону руху, забезпечується додаткове її прискорення.

Якщо ж СКО перемістити на відстань  $Z_3^* = 1,32$ , то в ній відбувається зміна полярності струму. Цей факт можна пояснити тим, що утворюється більш сильний магнітний зв'язок СКО з якірної, ніж з первинною обмоткою, а через це індукційна дія КОЯ переважає. Але тому, що струми вторинних обмоток знаходяться у протифазі, а СКО розташована спереду в напрямку руху КОЯ, то на останню діє гальмівна електродинамічна сила. Таким чином, СКО при певному розташуванні може забезпечити підвищення електромеханічних показників криогенного ЕППТ.

Широкі можливості по покращенню робочих показників криогенних ЕППТ при збереженні апробованої конструкції відкриває електронна система керування (СК) ємнісного накопичувача. Зазначена система дозволяє забезпечити: повний розряд ЄН, збудження одно- і дво-напівперіодним імпульсами, збудження аперіодичним імпульсом за допомогою шунтуючого зворотнього діоду.

Розглянута робота електромеханічного перетворювача при використанні СК ЄН зі зворотнім діодом VD2. Встановлено, що розгін легкого ВЕ ( $P=1$  кг) доцільно здійснювати при малій ємності  $C$  і високій напрузі  $U_0$  джерела, при яких формується короткий та інтенсивний електродинамічний імпульс відштовхування. Збільшення ємності при цьому не виправдано, тому що зростає фазовий зсув між струмами обмоток, якір швидко виходить з зони сильної магнітної взаємодії і енергія джерела витрачається на нагрів, насамперед СОЗ. При застосуванні СК з повним розрядом ЄН і розгоні важкого ( $P=10$  кг) ВЕ мала ємність джерела при будь-якій напрузі, коли формується короткі силові імпульси, не ефективна (рис.8,а). В цьому випадку доцільно використовувати СК з аперіодичним імпульсом для криогенного ЕППТ, коли в найбільшій мірі усуваються пульсації ЕДЗ та їх «паразитна» складова (рис.8,б). В цілому ж за рахунок вибору параметрів ЄН з аперіодичним імпульсом збудження можна підвищити ККД електромеханічного перетворювача на 15...50 %.

Показано, що використання електронної СК ЄН для ЕППТ, в якій формуються однополярні імпульси при природному закриванню керуючого тиристора у первинному колі, забезпечує покращення енергетичних показників у порівнянні з повним розрядом накопичувача: температура нагріву СОЗ знижується на 30...40 % при роботі в умовах навколишнього середовища і в 2...3 рази - при азотному охолодженні; ККД при цьому підвищується, відповідно на 30...40 % і 50...80 %. При включенні в коло якірної обмотки діоду, що формує однополярний імпульс індукованого струму, забезпечується додаткове покращення енергетичних показників за рахунок зниження нагріву КОЯ на 20...30 % і механічних показників за рахунок усунення «паразитної» гальмівної електродинамічної сили. При цьому швидкість  $V$  і переміщення  $\Delta Z$  КОЯ з ВЕ зростають на 10...50 %, причому в більшій мірі в умовах кімнатної температури, а ККД - більш ніж у 2 рази.

Виконана оцінка ефективності використання феромагнітних елементів у магнітному колі ЕППТ при врахуванні його нелінійності та насичення. Для визначення індукції магнітного поля на кожному кроці використовується метод скінчених елементів з врахуванням відповідних граничних умов. Показно, що феромагнітні елементи дозволяють підвищити ряд показників «теплого» перетворювача, але їх вплив не значний, а усі питомі показники істотно погіршуються. Якщо ж врахувати ускладнення конструкції криостата, збільшення ваги та ін., то можна зробити висновок про недоцільність застосування феромагнітних елементів у магнітному колі високоефективних криогенних ЕППТ.

Запропонована концепція ЕППТ циліндричної конфігурації з квазістаціонарним якорем, у якого в процесі роботи активна зона  $H_2^*$  з індукованим струмом відносно обмотки збудження 1 розташована на відстані  $\Delta z_0$  просторового максимуму градієнта взаємної індуктивності і залишається деякий час нерухомою (рис.9). Для цього циліндричний масивний якір 2 виконується з розрізами 3, в частині яких розміщуються нерухомі напрямні електропровідні

елементи 4, що замикають суміжні частини якоря. Забезпечити гарний контакт з малим опором між розрізаними частинами рухомого якоря і статорними напрямними елементами при малій силі гальмування дозволяє конструкція ЕППТ, в якій напрямні елементи 4 виконуються у вигляді замкнених ланцюгів, які вільно обертаються навколо пари коліс з нерухомими осями.

Замінюючи активну зону якоря сукупністю  $1...k$  концентричних контурів малого перетину, що взаємодіють зі статорною обмоткою збудження (індекс 0), електричні процеси в ЕППТ з квазістаціонарним якорем можна описати системою рівнянь

(21)

розрахунок якої здійснюється чисельно з використанням методу Рунге-Кутта четвертого порядку.

Як видно з енергетичних діаграм (рис.10), крім істотного підвищення кінетичної енергії, в криогенному перетворювачі з квазістаціонарним якорем, що збуджується двонапівперіодними імпульсами, відбувається значне зниження втрат у первинній обмотці, а за рахунок більш раціональної роботи зберігається значна частина енергії у ЄН наприкінці робочого циклу.

Цей перетворювач, що реалізує покращенні просторово-часові характеристики, забезпечує надійне переміщення якоря відносно обмотки збудження при малому зазорі. За рахунок застосування квазістаціонарного якоря вдається підвищити механічні показники ЕППТ на 40...80 %, а ККД - у 2,5...3,0 рази. Для досягнення підвищеного ККД в криогенному ЕППТ можна використовувати понижені напруги ЄН у порівнянні з «теплим» варіантом.

На основі аналізу технічних факторів показано, що криогенний електромеханічний перетворювач у технічному плані не сильно відрізняється від свого «теплого» аналога. В ньому змінюється зовнішній корпус, який виконується у вигляді азотного криостата, що виготовлений з немагнітного слабо провідного матеріалу. Циліндричний корпус ЕППТ може складатись, наприклад з двох шарів тонкої нержавіючої сталі або склопластику, простір між якими заповнений спученим пінопластом. В такій конструкції при забезпеченні надійної зовнішньої теплоізоляції нема потреби у використанні вакуумної відкачки, що значно зменшує поточні витрати і спрощує експлуатацію перетворювача. Заміна традиційного холодоагенту (води, трансформаторного масла і ін.) сприяє підвищенню надійності перетворювача за рахунок покращення ізоляційних характеристик, зменшення гідравлічних опорів і напруги джерела, застосування розімкненої системи охолодження.

Виконано параметричний синтез вискоефективних ЕППТ. Для цього всі параметри поділені на групи: геометричні, конструктивні, навантажувальні, теплові, енергетичні, параметри системи керування та ін. На визначені основні та додаткові параметри накладаються параметричні і функціональні обмеження. При цьому цільова функція, яку необхідно мінізувати при параметричному синтезі, має вигляд

$$f = \sum_{j=1}^J \alpha_j f_j ; \quad \sum_{j=1}^J \alpha_j = 1, \quad (22)$$

где  $J$  – кількість функціональних параметрів  $f_j$ , які змінюються у діапазоні  $[0,1]$ ;  $\alpha_j$  - показник важливості відповідного параметру.

Стратегія пошуку мінімуму функції  $m$  змінних у пошуковому просторі заключається у спільному використанні генетичних алгоритмів, які відносяться до глобальних методів оптимального проектування нового покоління, та локального методу. Генетичні алгоритми оперують сукупністю можливих рішень (популяцією), оброблюючи набір параметрів ЕППТ, що

структурований певним чином, а наступні покоління популяції генеруються за допомогою генетичних операторів кросовера та мутації. В якості методу локальної оптимізації використовується метод деформованого багатогранника, який використовує оператори відображення, розтягнення, стискання та редукції для багатогранника, вершини якого представляють собою вектор параметрів  $\mathbf{x}=(x_1, \dots, x_m)$ . Це дозволяє багатограннику адаптуватись до локального рельєфу цільової функції, забезпечуючи сходження алгоритму у локальному мінімумі.

Задача синтезу сформульована наступним чином

$$f_1 = \frac{\sum_{n=1}^2 \int_0^{t_p} i_n^2(t) R_n(T_n) dt}{0,5 \cdot (m_2 + P) \cdot V_p^2 + \sum_{n=1}^2 \int_0^{t_p} i_n^2(t) R_n(T_n) dt} \rightarrow \min_{\mathbf{x} \in \mathfrak{R}^N}; \quad \mathfrak{R}^N \in \{a_i, b_i\}, i=1, \dots, N;$$

де вектор змінних проектування

$\mathbf{x} = (H_1, H_2, \Delta z_0, d_0, K_{w1}, K_{w2}, U_0)$  - для циліндричного ЕППТ,

$\mathbf{x} = (H_1, H_2, D_{in1}, D_{in2}, d_0, K_{w1}, K_{w2}, U_0)$  - для дискового ЕППТ;

$a_i$  и  $b_i$ , - границі області пошукового простору  $\mathfrak{R}^N$ ,  $i=1, \dots, N$ ;

$K_{w1,2}$  - число шарів обмотки;  $\Delta z_0$  - початковий відносний зсув обмоток, при заданих критеріальних обмеженнях

$$f_2(\mathbf{x}) = f_{2\min}^*; \quad \theta_1 = \theta_{1\min}^*; \quad \theta_2 = \theta_{2\min}^*,$$

$$\text{де } f_2 = 1 - C^{-1} U_0^{-2} (m_2 + P)^{-1} \left( \int_0^{t_p} f_z(t) dt \right)^2.$$

Для рішення задачі використовується ієрархічний підхід, що дозволяє оброблювати критерії з визначеними фізичними значеннями і контролювати процес оптимізації. У порядку зменшення пріоритету розташовуються критерії

$$U_1(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^6 (\max \{0; a_i - x_i\} + \max \{0; x_i - b_i\}); \quad U_2(\mathbf{x}) = |f_2(\mathbf{x}) - f_{2\min}^*|;$$

$$U_3(\mathbf{x}) = \min \{\theta_1(\mathbf{x}) - \theta_{1\min}^*\}; \quad U_4(\mathbf{x}) = \min \{\theta_2(\mathbf{x}) - \theta_{2\min}^*\}; \quad U_5(\mathbf{x}) = f_1(\mathbf{x}). \quad (25)$$

У таблиці подані синтезовані параметри електромеханічних перетворювачів, що при збудженні однополярним імпульсом від ЄН з  $W_0=5$  кДж забезпечують прискорення ВЕ масою 1 кг.

Таблиця

Параметри високоефективних електромеханічних перетворювачів

Форма ЕППТ	$T_0$ , К	$D_{ex}$ , мм	$d_0$ , мм	$\varepsilon_H^*$ , в.о.	$C$ , мкФ	$V_p$ , м/с	$\theta_1$ , К	$\eta_p$ , %	$K_i$ , %	$w'$ , Дж/кг
дискова	297	264	2,9	0,33	212	21,5	0,4	45,3	30,4	75,3
	77	114	1,9	0,87	172	52,8	4,5	86,9	52,4	1787,4
циліндрична	297	134	2,8	0,37	451	9,8	0,8	13,7	5,3	21,2
	77	57	1,3	0,63	139	22,7	4,9	48,1	7,7	317,0

де  $\varepsilon_H^* = \varepsilon_{H2} / \varepsilon_{H1}$ ;  $w'$  - питома енергія удару.

Таким чином, криогенні перетворювачі у порівнянні з «теплыми» пристроями забезпечують істотні переваги по масогабаритним та питомим показникам, розвивають більш високу швидкість при підвищених значеннях ККД  $\eta_p$  (у 1,9...2,1 рази для дискових та 3,5...5,4 рази для циліндричних перетворювачів) і параметру ефективності прискорення  $K_i$  (у 1,4...1,8 рази). Узагальнені основні параметричні співвідношення та встановлені закономірності робочих ха-

рактик високоефективних перетворювачів з різними параметрами, типові з яких показані на рис.11.

Запропонована інженерна методика розрахунку робочих параметрів та характеристик кріогенних ЕППТ, яка включає вибір основних геометричних та електромагнітних параметрів, спрощені параметричні залежності, структурну схему розрахункового алгоритму та оцінку похибок для результатів розрахунків на ЕОМ.

**У п'ятому розділі** досліджені багатосекційні ЕППТ з кріорезистивними обмотками. Розглянута робота перетворювача циліндричної конфігурації, що складається з трьох однакових секцій статорної обмотки, які послідовно збуджуються від ємнісних накопичувачів при оптимальному положенні якірної обмотки, що прискорюється, відносно відповідної секції. За допомогою СК ЄН реалізується імпульсний режим протікання струмів в обмотках перетворювача.

Розглянута концепція зменшення (К-3-1), збільшення (К-3-2), пікового (К-3-3) та рівномірного (К-3-4) розподілу ємностей по секціям джерела при збереженні сумарної величини такої ж, як у базового односекційного ЕППТ К-1. Показано, що при використанні кріогенного охолодження навіть при зменшенні енергії ЄН у два рази ЕППТ розвиває більш високу кінетичну енергію. В цьому випадку довжина імпульсів ЕДС зменшується, а їх амплітуда підвищується у порівнянні з «теплим» варіантом ЕППТ при повній енергії ЄН (рис.12,а). Динаміка ККД багатосекційних прискорювачів має досить складний характер, зумовлений як ростом, так і наступним зменшенням, через більшу тривалість імпульсу струму в секціях СОЗ у порівнянні з КОЯ (рис.12,б). Встановлено, що розподілена у просторі і часі подача енергії до секцій статорної обмотки, що має місце у багатосекційному ЕППТ, забезпечує підвищення його вихідної швидкості на 45...55 % при кімнатній і на 25...30 % при азотній температурах, збільшує ККД, відповідно більш, ніж у 2,2 та 1,6 рази у порівнянні з зосередженим і одночасним живленням, як це відбувається у односекційному перетворювачі. При однаковій напрузі необхідно забезпечити зменшений або рівномірний розподіл ємностей по секціям в напрямку руху, при яких здійснюється послідовне зниження величин силових електродинамічних імпульсів, що прискорюють якірну обмотку.

Запропонована концепція кріогенного ЕППТ дискової конфігурації з рухомою обмоткою збудження (ОЗ) 1 і двома коаксіально розташованими короткозамкненими обмотками, одна з яких 3 нерухома взаємодіє з упором, а інша 2 забезпечує прискорення ВЕ (рис.13). Електромеханічні процеси у такому перетворювачі можна описати системою нелінійних рівнянь

$$(26) - (30).$$

В результаті математичного моделювання з використанням отриманих аналітичних виразів для електромагнітних, теплових і механічних параметрів встановлені основні фактори, що впливають на ефективність запропонованого ЕППТ. На рис.14,а представлені механічні характеристики кріогенного ЕППТ з повним розрядом ЄН, у якого струм в якірній обмотці, що прискорюється, зростає швидше, ніж у статорній обмотці. Внаслідок цього спочатку на ОЗ діє сила  $f_{z1}$ , яка притискує її до СКО, і рух ОЗ починається пізніше за КОЯ, на яку діє сила  $f_{z2}$ .

Основні показники ЕППТ з рухомою ОЗ у порівнянні з базовим варіантом без СКО ( $\epsilon_3=0$ ) істотно підвищуються: Величина ЕДС зростає на 60...65 %, що призводить до збільшення швидкості на 20...25 % і ККД - на 80...90 % (рис.14,б). Не зважаючи на різний характер струмів в обмотках ЕППТ при використанні ДПН або ЄН, в обох варіантах спостерігаються

загальні закономірності впливу геометричних параметрів, наприклад, рекомендується виготовляти короткозамкнені обмотки з геометричними параметрами  $\varepsilon_{H2,3}=0,02\dots0,03$ , при яких забезпечується максимальна ефективність ЕПТТ.

Через магнітне поле (рис.15) встановлений характер питомих електродинамічних сил у обмотках цього ЕПТТ. Показано, що у вторинних обмотках переважають протилежно направлені аксіальні сили відштовхування, а в первинній обмотці окрім не скомпенсованих аксіальних електродинамічних сил, що викликають її стискання та переміщення, є значні порівняно з аксіальними радіальні сили.

Були проведені експериментальні дослідження модельних обмоток збудження, стаціонарних електромагнітних систем і ЕПТТ. В якості джерела використовувався ємнісний накопичувач, що включав батарею конденсаторів К42И-7 ємністю 100 мкФ, заряджаємих до 5 кВ, і конденсатори К75-40б ємністю 100 мкФ, заряджаємих до 2 кВ. В електронній СК ЄН використовувались тиристри ТБ171-200 і діоди В42-160, які дозволяли реалізовувати різні схеми збудження первинної обмотки (повний розряд, одно- і двонапівперіодний та аперіодичний імпульс).

Експериментальні дослідження здійснювались на модельних установках з горизонтальним і вертикальним переміщенням якоря з різними навантаженнями при наявності і відсутності рідкого азоту. Були виготовлені і випробувані дослідні моделі практично всіх розглянутих вище конструкцій ЕПТТ при збудженні від ЄН. Обмотки модельних перетворювачів були виконані монолітними шляхом вакуумного просочення спеціальним епоксидним компаундом. У процесі випробувань при різних параметрах ЄН, масах ВЕ, при наявності феромагнітних елементів, при використанні мідного і алюмінієвого масивних та короткозамкнених якорів різної форми та ін. вимірювались: струм у ОЗ і струм у короткозамкненій обмотці малорухомого якоря за допомогою токових шунтів і осцилографа з пам'яттю; опори і індуктивності обмоток за допомогою електронного вимірювального моста; температура малорухомих обмоток по величині зміни опору до і відразу після токового імпульсу; швидкість якоря з ВЕ на визначених відстанях від ОЗ за допомогою двох розташованих в напрямку руху контактних датчиків, що послідовно замикаються; амплітуда електродинамічної сили за допомогою сейсmodатчика.

На основі аналізу отриманих результатів встановлено, що похибки між виміряними і розрахованими параметрами для вторинних обмоток вище, ніж для первинної і досягають до 10 % для амплітуди індукованого струму і до 25 % для перевищень температур; похибки для амплітуди аксіальних електродинамічних сил знаходяться у межах 12...26 %. В цілому ж розбіжність між експериментальними і розрахунковими параметрами і характеристиками для електричних величин знаходиться у межах до 5...12 %, а для механічних - до 15...25 %, що дозволяє стверджувати про достовірність запропонованих математичних моделей і основних технічних рішень.

Проведено розрахунок робочих параметрів відомих конструкцій ЕПТТ різного призначення з використанням розробленої чисельно-аналітичної методики. На базі порівняльного аналізу вихідних та розрахованих результатів підтверджена достовірність запропонованої методики. Розрахунковим шляхом показана перспектива використання в цих перетворювачах кріогенного охолодження з оцінкою ККД, питомих величин енергії удару, імпульсу сили та ударної потужності, а також витрати рідкого азоту.

## ВИСНОВКИ

В дисертації приведено теоретичне узагальнення і нове вирішення наукової проблеми, що полягає у розробці комплексу науково-технічних заходів по створенню вискоефективних електромеханічних імпульсних перетворювачів індукційного типу з кріорезистивними обмотками, які охолоджуються рідким азотом. На базі узагальнення основних властивостей кріоре-



зистивних обмоток розроблена загальна методика розрахунку та встановлені особливості роботи цих обмоток у короткочасному режимі з високими електромагнітними навантаженнями. На основі чисельно-аналітичної моделі, що враховує комплекс взаємопов'язаних електричних, магнітних, теплових та механічних процесів, здійснено узагальнення основних робочих параметрів кріогенних електромеханічних перетворювачів. Обґрунтована доцільність кріогенного охолодження цих перетворювачів та показана технічна їх здійсненність з зазначенням конструктивних, параметричних і схемних шляхів удосконалення.

1. На даний час існує стійка тенденція збільшення фінансування і розширення робіт по створенню кріогенних електромеханічних перетворювачів, в яких використовуються складні і коштовні надпровідникові обмотки, а більш прості і дешеві кріорезистивні обмотки в основному використовуються лише у стаціонарних електрофізичних установках, призначених для створення сильних імпульсних магнітних полів. При цьому існує клас електромеханічних перетворювачів індукційного типу з імпульсним характером роботи, які забезпечують лінійне переміщення якоря і функціонують при температурі навколишнього середовища з відносно низькою ефективністю.
2. Розроблена чисельно-аналітична методика розрахунку комплексу взаємо пов'язаних електричних, магнітних, теплових та механічних процесів з урахуванням нелінійних параметрів, що виникають при збудженні кріогенних електромагнітних систем і електромеханічних перетворювачів, яка основана на приставленні рішень диференціальних рівнянь у рекурентному вигляді та наступному розрахунку на ЕОМ робочих параметрів і характеристик.
3. Встановлено, що при збудженні кріорезистивних обмоток від джерела постійної напруги в початковий момент струм приймає форму імпульсу, амплітуда якого у 4...8 разів перевищує струм при кімнатній температурі. Охолодження рідким азотом дозволяє змінити характер процесу збудження обмотки від ємнісного накопичувача з аперіодичного в коливально-загасаючий із збільшенням амплітуди струму у 2...3 рази, або при збереженні коливального характеру збільшити максимальне значення струму на 30...50 % з підвищенням амплітуди наступних на півперіодів у 3...5 разів.
4. Встановлено, що при збудженні електромеханічного перетворювача від джерела постійної напруги за рахунок азотного охолодження виникає істотне збільшення тривалості імпульсу індукованого струму у якірній обмотці, внаслідок чого зростає імпульс силової дії, що забезпечує підвищення ККД перетворювача у 2...5 разів і більшу у залежності від навантаження. Використання кріогенного охолодження для електромеханічного перетворювача з ємнісним збудженням також забезпечує збільшення струмів у обмотках та зменшення гальмівної складової електродинамічної сили, підвищуючи швидкість у 1,5...3,0 рази і ККД у 3...6 разів.
5. Визначений характер розподілу електродинамічних зусиль у багатовитковому та масивному якорях електромеханічного перетворювача та показано, що в основному він визначається геометричними параметрами перетворювача і мало залежить від джерела збудження.
6. На основі структурно-геометричного аналізу електромеханічних перетворювачів встановлено, що найбільш ефективні комбіновані конфігурації масивного якоря, що має як дискову (основну), так і циліндричні (допоміжні) ділянки, що частково обхвачують обмотку збудження.
7. Запропонована й обґрунтована концепція електромеханічного перетворювача індукційного типу з форсировочною статорною короткозамкненою обмоткою. Встановлено, що у кріогенному перетворювачі дискової форми, якщо висота цієї обмотки не перевищує 4...8 % від висоти первинної обмотки, забезпечується підвищення основних електромеханічних показників до 25 %. При цьому обмотка збудження може бути виконана з радіальними каналами для охолодження, висота яких у аксіальному напрямку складає 1,2...1,5 висоти обмотки у компактному виконанні. У перетворювачі циліндричної форми форсировочна обмотка,

- що встановлена біля кінця обмотки збудження у напрямку руху, підвищує швидкість якоря і ККД до 10...20 %.
8. Визначені шляхи підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів за допомогою системи керування ємнісним накопичувачем. Показано, що використання електронної системи керування, що формує однополярні імпульси у обмотці збудження, забезпечує зниження її температури на 30...40 % у перетворювачі, що функціонує при кімнатній температурі, та в 2...3 рази – при азотному охолодженні; ККД при цьому підвищується, відповідно, на 30...40 % та 50...80 %. При забезпеченні однополярного імпульсу у якірній обмотці її нагрів зменшується на 20...30 %, швидкість збільшується на 10...50 %, а ККД перетворювача підвищується більш ніж у 2 рази.
  9. Запропонована й обґрунтована концепція електромеханічного перетворювача з квазістаціонарним якорем та рухомими ланцюговими напрямними елементами, що реалізує поліпшені просторо-часові характеристики, забезпечуючи підвищення механічних показників на 40...80 %, а ККД – у 2,5...3,0 рази.
  10. На базі вибору основних і додаткових параметрів, параметричних та функціональних обмежень з використанням глобальної і локальної методик оптимізації, заснованих на сполученні генетичних алгоритмів і методу деформованого багатогранника, виконано параметричний синтез високоефективних перетворювачів. Показано, що при збудженні однополярним імпульсом від ємнісного накопичувача перетворювач дискової конфігурації забезпечує більш високі показники (ККД до 90 % при азотному охолодженні), ніж циліндричної форми (ККД до 60 % при азотному охолодженні). Встановлені основні параметричні співвідношення високоефективних перетворювачів і особливості їх робочих характеристик.
  11. Встановлено, що розподілений і послідовний підвод енергії до секцій статорної обмотки електромеханічного перетворювача циліндричної форми забезпечує підвищення швидкості на 45...55 % при кімнатній і на 25...30 % при азотній температурах, ККД – у 1,6...2,0 рази та зменшення сумарних витрат на 30...40 % у порівнянні з зосередженим підводом енергії, що має місце у односекційному перетворювачі з тією ж енергією джерела. Послідовне збудження секцій статорної обмотки при однаковій напрузі ємнісного накопичувача необхідно здійснювати при рівномірному або зменшеному розподілу ємностей по секціям у напрямку руху.
  12. Запропонована й обґрунтована концепція кріогенного перетворювача дискової форми з рухомою обмоткою збудження, яка передає додатковий імпульс якірній обмотці при відштовхуванні від статорної короткозамкнутої обмотки, що забезпечує підвищення швидкості на 20...25 % і ККД – на 80...90 %.
  13. На лабораторних моделях обмоток збудження, стаціонарних електромагнітних систем і електромеханічних перетворювачів з ємнісним збудженням, що функціонують при кімнатній та азотній температурах, отримано задовільне узгодження між експериментальними і розрахунковими електричними (з похибками до 5...12 %) та механічними (з похибками до 15...25 %) характеристиками і параметрами. На базі аналізу параметрів відомих конструкцій електромеханічних перетворювачів показано, що розроблена чисельно-аналітична розрахункова модель задовільно описує їх характеристики.

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Болюх В.Ф., Данько В.Г. Электромеханические импульсные преобразователи с криорезистивными обмотками. - Харьков: Изд. ХНАДУ, 2001. - 215 с.  
*Здобувач розробив математичні моделі та виконав розрахунки електромеханічних перетворювачів на ЕОМ.*
2. Болюх В.Ф., Данько В.Г. Работа криорезистивной обмотки возбуждения в кратковременном режиме // Техническая электродинамика. - 1990. - № 5. - С. 36-41.

*Здобувач розробив математичну модель та виконав розрахунки криорезистивних обмоток збудження.*

3. Омеляненко В.И., Сергеев С.А., Болюх В.Ф. Импульсный режим работы криорезистивной обмотки возбуждения линейного электромеханического преобразователя энергии // Вестник Харьковского политехнического института. - Харьков: Основа. - 1990. - № 279. - Вып.15. - С. 86-90.

*Здобувач прийняв участь у проведенні експериментальних досліджень, виконав аналіз розрахункових та експериментальних результатів криорезистивної обмотки.*

4. Болюх В.Ф., Данько В.Г. Влияние индуктивно связанного контура на работу криорезистивной обмотки возбуждения в кратковременном динамическом режиме // Техническая электродинамика. - 1992. - № 1. - С. 15-24.

*Здобувач отримав основні вирази і співвідношення, виконав розрахунки на ЕОМ електромагнітної системи з криогенним охолодженням.*

5. Болюх В.Ф. Динамическое возбуждение криорезистивных обмоток электромеханических устройств ударного действия от емкостного накопителя энергии // Техническая электродинамика. - 1992. - № 4. - С. 61- 68.
6. Болюх В.Ф. Электродинамическое взаимодействие криорезистивной обмотки возбуждения с индуктивно связанным контуром // Техническая электродинамика. - 1993. - № 1. - С. 6-12.
7. Болюх В.Ф. Возбуждение криорезистивной обмотки от емкостного накопителя при наличии магнитосвязанного контура // Электричество. - М. - 1993. - № 9. - С. 30-34.
8. Болюх В.Ф. Электромеханическое взаимодействие короткозамкнутого контура и криорезистивной обмотки, возбуждаемой от емкостного накопителя // Электричество. - М. - 1994. - № 8. - С. 40-46.
9. Болюх В.Ф., Данько В.Г., Эль Юссеф И.М. Влияние криогенного охлаждения на характеристики линейного электродвигателя ударного действия // Вестник науки и техники. - Харьков: ХДНТ. - 1997. - Вып. № 1. - С. 18-23.

*Здобувач узагальнив результати досліджень лінійного електродвигуна.*

10. Болюх В.Ф., Эль Юссеф И.М. Линейный индукционный электродвигатель ударного действия // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. - Харьков: ХГПУ. - 1997. - Вып.8. - С.133-138.

*Здобувач обґрунтував концепцію криогенного лінійного електродвигуна.*

11. Болюх В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Щукин И.С. К вопросу разработки линейных электродвигателей ударного действия // Сборник научных трудов Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. - 1998. - Вып. 6. - Ч. 2. - С. 215-219.

*Здобувач отримав основні вирази і співвідношення, виконав розрахунки на ЕОМ.*

12. Болюх В.Ф., Эль Юссеф И.М. Влияние охлаждения жидким азотом на эффективность линейного индукционного ударного двигателя // Технічна електродинаміка. - 1998. - № 2. - С. 52-57.

*Здобувач отримав основні вирази і співвідношення, виконав розрахунки на ЕОМ лінійного електродвигуна.*

13. Болюх В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Щукин И.С. Математическое моделирование электродинамического двигателя ударного действия // Технічна електродинаміка. Спеціальний випуск № 2. – Київ: ІЕД НАНУ. - 1998. - Т. 2. - С. 147-152.

*Здобувач розробив математичну модель та виконав розрахунки електродвигуна.*

14. Болюх В.Ф., Сьянов Д.В. К расчету параметров импульсного двигателя сложной конфигурации // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. - 1998. - Вып. 27. - С.12-16.

*Здобувач розробив математичну модель та виконав розрахунки електродвигуна.*

15. Болюх В.Ф. Электродинамические процессы в линейном импульсно-индукционном двигателе с подвижной криорезистивной обмоткой возбуждения // Электротехника. - М. - 1999. - № 2. - С. 3-10.
16. Болюх В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Щукин И.С. Концепция многосекционного индукционно-динамического двигателя // Сборник научных трудов Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. - 1999. - Вып. 7. - Ч. 3. - С. 89-95.  
*Здобувач сформулював основну технічну ідею та розробив принципову конструкцію багатосекційного електродвигуна.*
17. Болюх В.Ф. К вопросу выбора параметров линейного индукционного двигателя ударного действия с криогенным охлаждением // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. - 1999. - Вып. № 30. - С. 72-75.
18. Болюх В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Щукин И.С. Исследование электродинамических процессов в индукционно-динамическом двигателе с двойным якорем // Технічна електродинаміка. - Київ: ІЕД НАНУ. - 1999. - Тематичний випуск: Моделювання електронних, енергетичних та технологічних систем. - Ч. 2. – С. 17-22.  
*Здобувач розробив математичні моделі та виконав розрахунки електродвигуна з комбінованим якорем.*
19. Болюх В.Ф. Влияние криогенного охлаждения на работу индукционно-динамического двигателя с двойным якорем // Электротехника. - М. - 1999. - № 12. - С. 21-27.
20. Болюх В.Ф. Электрофизические проблемы использования сверхпроводниковых и криорезистивных обмоток в электромеханическом преобразовании энергии // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. - 1999. - Вып. № 44. - С. 50-53.
21. Болюх В.Ф. Влияние короткозамкнутой катушки на работу линейного импульсно-индукционного криогенного двигателя // Известия вузов. Электромеханика. - Новочеркасск. - 2000. - № 2. - С. 45-53.
22. Болюх В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Щукин И.С. Влияние возбуждения на характеристики линейного ударного электродвигателя индукционного типа // Технічна електродинаміка. - Київ: ІЕД НАНУ. - 2000. - Тематичний випуск: Проблеми сучасної електротехніки. - Ч. 4. - С. 42-47.  
*Здобувач розробив методику проведення експериментальних досліджень, виконав аналіз розрахункових та експериментальних результатів при різних системах збудження електродвигуна.*
23. Болюх В.Ф. Влияние индуктивно-связанного контура на характеристики линейного импульсно-индукционного криогенного двигателя // Электротехника. - М. - 2000. - № 5. - С. 1-6.
24. Болюх В.Ф. Электромеханический импульсно-индукционный ускоритель с криогенным охлаждением // Электротехника. - М. - 2000. - № 8. - С. 45-52.
25. Болюх В.Ф. Индукционный двигатель с криорезистивной обмоткой, возбуждаемой емкостным накопителем // Электричество. - М. - 2000. - № 9. - С. 38-44.
26. Болюх В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Щукин И.С. Анализ и пути совершенствования конструкций линейных электродвигателей ударного действия // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. - 2000. - Вып. № 84. - С. 25-30.  
*Здобувач сформулював ідею лінійного електродвигуна із статорною короткозамкнутою обмоткою.*
27. Болюх В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Щукин И.С. Расчет распределенных электродинамических сил в якорю индукционно-динамического двигателя // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. - 2000. - Вып. № 102. - С. 13-20.

*Здобувач розробив математичну модель та виконав розрахунки розподілених електродинамічних сил у якорі електродвигуна на ЕОМ.*

28. Болюх В.Ф. Исследование индукционно-динамического двигателя // Электротехника. - М. - 2000. - № 10. - С. 28-35.

29. Болюх В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Щукин И.С. Исследование электромеханического цилиндрического ускорителя индукционного типа с импульсным возбуждением // Технічна електродинаміка. - Київ: ІЕД НАНУ. - 2000. - Тематичний випуск: Силова електроніка та енергоефективність. - Ч. 1. - С. 39-44.

*Здобувач виконав аналіз розрахункових та експериментальних результатів прискорювача з імпульсним збудженням.*

30. Болюх В.Ф. Исследование электродинамических процессов криогенного линейного индукционно-динамического двигателя при импульсном возбуждении // Известия вузов. Электромеханика. - Новочеркасск. - 2001. - № 1. - С. 45-53.

31. Болюх В.Ф. Динамическое возбуждение криорезистивной обмотки от источника постоянного тока при наличии индуктивно связанных контуров // Известия вузов. Электромеханика. - Новочеркасск. - 2001. - № 3. - С. 29-37.

32. Болюх В.Ф. Переходные процессы в электромагнитной системе возбуждения с криорезистивными нелинейностями и магнитными связями // Известия АН России. Энергетика. - М. - 2001. - № 5. - С. 103-113.

33. Болюх В.Ф., Данько В.Г., Любимова Л.А. Электромагнитные процессы в заторможенном электромеханическом импульсном преобразователе индукционного типа // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». - 2001. - № 5. - С. 21-28.

*Здобувач поставив задачу та узагальнив результати досліджень.*

34. Болюх В.Ф. Электродинамическое взаимодействие короткозамкнутых катушек с криорезистивной обмоткой, возбуждаемой от источника постоянного тока // Электричество. - М. - 2001. - № 7. - С. 59-66.

35. Болюх В.Ф., Лучук В.Ф., Любимова Л.А., Марков А.М., Щукин И.С. Исследование индукционно-динамического преобразователя с массивным якорем // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». - 2001. - № 16. - С. 17-22.

*Здобувач сформулював задачу та узагальнив результати досліджень.*

36. Болюх В.Ф. Влияние длительности токов обмотки возбуждения и якоря на эффективность индукционно-динамического электродвигателя // Электротехника. - М. - 2001. - № 11. - С. 27-31.

37. Болюх В.Ф. Влияние индуктивно связанных контуров на характер возбуждения криорезистивной обмотки от емкостного накопителя энергии // Электричество. - М. - 2002. - № 1. - С. 44-50.

38. Болюх В.Ф. Импульсные электродвигатели ударного действия – новый класс криогенных электромеханических устройств // Електротехніка і електромеханіка. – 2002. - № 1. - С. 11-16.

39. Болюх В.Ф., Данько В.Г., Любимова Л.А. Электромеханический импульсный преобразователь с квазистационарным якорем // Електротехніка і електромеханіка. – 2002. - № 2. - С. 24-30.

*Здобувач поставив задачу та узагальнив результати досліджень.*

40. Болюх В.Ф., Данько В.Г., Любимова Л.А. Структурный анализ индукционно-динамических двигателей при импульсном возбуждении // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». - 2002. - Т. 4, № 9. - С. 14-20.

*Здобувач поставив задачу та узагальнив результати досліджень.*

41. Болюх В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Щукин И.С. Влияние конфигурации магнитной системы на работу индукционно-динамического двигателя // Електротехніка і електромеханіка. - 2002. - № 3. - С. 7-14.

*Здобувач виконав розрахунки електродвигуна з феромагнітними елементами.*

42. Болюх В.Ф., Данько В.Г., Любимова Л.А. Сравнительный анализ импульсных электромеханических преобразователей электродинамического и индукционного типа // Технічна електродинаміка. - Київ: ІЕД НАНУ. - 2002. - Тематичний випуск: Проблеми сучасної електротехніки. - Ч. 3. - С. 70-75.

*Здобувач провів узагальнення результатів досліджень.*

43. Данько В.Г., Болюх В.Ф. Совершенствование некоторых видов криогенных электромеханических устройств // Вісник Східноукраїнського національного університету. - 2002. - № 4. - С. 75-84.

*Здобувач обґрунтував концепцію криогенного силового електромеханічного перетворювача.*

44. Болюх В.Ф., Данько В.Г., Лысенко Л.И. Эффективность работы и параметры многосекционного индукционного ускорителя с криогенным охлаждением // Електротехніка і електромеханіка. - 2003. - № 1. - С. 14-22.

*Здобувач обґрунтував концепцію криогенного електромеханічного прискорювача з багато секційною обмоткою.*

45. Болюх В.Ф., Данько В.Г. Применение криогенного охлаждения для обмоток электромеханических устройств кратковременного действия // Электромагнитные, тепловые, вентиляционные и виброакустические процессы в энергоустановках. - Харьков: ХАИ. - 1991. - С. 52-57.

*Здобувач отримав основні вирази і співвідношення, виконав розрахунки кріорезистивних обмоток на ЕОМ.*

46. Болюх В.Ф., Данько В.Г. Эффективность импульсного электромеханического перетворювача з криогенним охолодженням // Технічна електродинаміка. - Київ: ІЕД НАНУ. - 2000. - Тематичний випуск: Проблеми сучасної електротехніки. - Ч. 4. - С. 54-59.

*Здобувач обґрунтував концепцію криогенного електромеханічного перетворювача удосконаленої конструкції.*

47. Пат. 2091971 РФ, МКИ Н02К 41/025. Линейный индукционный электродвигатель ударного действия / В.Ф. Болюх, А.М. Марков, В.Ф. Лучук, И.С. Щукін (Украина). - № 95116191/07; Заявлено 19.09.95; Опубл. 27.09.97, Бюл. № 27. - 12 с.

*Здобувач сформулював технічну ідею електродвигуна з рухомими обмотками збудження.*

48. Пат. 23536А Україна, МПК Н02К 41/025. Лінійний індукційний електродвигун ударної дії / В.Ф. Болюх (Україна), І.М. Ель Юссеф (Ліван). - № 97062961; Заявлено 23.06.97; Надрук. 31.08.98, Бюл. № 4. - 7 с.

*Здобувач сформулював технічну ідею електродвигуна з комбінованим масивним якорем.*

49. Пат. 23537А Україна, МПК Н02К 41/025. Лінійний електродвигун ударної дії / В.Ф. Болюх, О.М. Марков, В.Ф. Лучук, І.С. Щукін (Україна). - № 97062960; Заявлено 23.06.97. Надрук. 31.08.98, Бюл. № 4. - 9 с.

*Здобувач сформулював основну технічну ідею та розробив конструкцію багато секційного електродвигуна з феромагнітними елементами.*

50. Пат. 38934А Україна, МПК Н02К 33/00, Н02К 41/025. Імпульсний електромеханічний прискорювач індукційного типу / В.Ф. Болюх (Україна). - № 2000116731; Заявлено 28.11.00; Надрук. 15.05.01, Бюл. № 4. - 5 с.

51. Пат. 39634А Україна, МПК Н02К 33/00. Електромеханічний імпульсний перетворювач індукційного типу / В.Ф. Болюх, Є.В. Болюх (Україна). - № 2000116521; Заявлено 20.11.00; Надрук. 15.06.01, Бюл. № 5. - 5 с.

*Здобувач сформулював основну технічну ідею та розробив принципову конструкцію електродвигуна.*

52. Пат. 40337А Україна, МПК Н02К 33/02, Н02К 41/025. Індукційно-динамічний електродвигун / В.Ф. Болюх, Л.О. Любимова (Україна). - № 2000127197; Заявлено 14.12.00; Надрук. 16.07.01, Бюл. № 6. - 7 с.

*Здобувач сформулював основну технічну ідею електродвигуна з комбінованим масивним якорем.*

53. Пат. 40889А Україна, МПК H02K 41/025. Лінійний індукційно-динамічний кріогенний електродвигун / В.Ф. Болюх, Є.В. Болюх, Д.Ю. Под'ячий (Україна). - № 2000105708; Заявлено 09.10.00 р; Надрук. 15.08.01, Бюл. № 7. - 5 с.

*Здобувач обґрунтував концепцію кріогенного електромеханічного перетворювача циліндричної форми.*

54. Пат. 56568А Україна, МПК H02K 33/00. H02K 41/025. Кріогенний імпульсний електромеханічний перетворювач індукційного типу / В.Ф. Болюх, Л.О. Любимова (Україна). - № 2002076134; Заявлено 23.07.02 р.; Надрук. 15.05.03, Бюл. № 5. - 6 с.

*Здобувач обґрунтував концепцію кріогенного електромеханічного перетворювача із квазістаціонарним якорем.*

55. Bolyukh V.F. Excitation of a cryoresistive winding from a capacitive accumulator with a magnetically coupled circuit // Electrical Technology. – 1993. - № 3. - P. 93-102.

56. Данько В.Г., Болюх В.Ф., Милых В.И. Разработка некоторых видов нетрадиционных электромеханических преобразователей энергии // Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International scientific and technical conference «Unconventional electromechanical and electrical systems». - Alushta, The Crimea. Szczecin, 1997. - Vol. 2. - P. 201-212.

*Здобувач обґрунтував концепцію кріогенного електромеханічного перетворювача лінійного руху.*

57. Danko V.G., Bolukh V.F., El Youssef I.M. A study of a linear impulse cryogenic motor // Proceedings of the fifth IIR International conference "Cryogenics'98". Praha, Czech Republic. - 1998. - P. 22-25.

*Здобувач виконав аналіз та узагальнення розрахункових і експериментальних результатів.*

58. Bolyukh V.F. The induction motor with a cryoresistive winding excited by a capacitive store // Electrical Technology Russia. - 2000. - № 3. - P. 117-128.

59. Bolyukh V.F. Electrodynamics interaction of the short-circuited coils with a cryoresistive winding excited from a DC source // Electrical Technology Russia. - 2001. - № 3. - P. 34-47.

60. Bolyukh V.F. The influence of inductively coupled circuits on the excitation of a cryoresistive winding from a capacitive energy store // Electrical Technology Russia. - 2002. - № 1. - P. 38-51.

## АНОТАЦІЇ

**Болюх В.Ф. Науково-технічні основи створення електромеханічних імпульсних перетворювачів індукційного типу з кріорезистивними обмотками.** - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.01 - електричні машини і апарати. - Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, 2003.

Дисертація присвячена проблемі створення електромеханічних імпульсних перетворювачів індукційного типу з кріорезистивними обмотками, що охолоджуються рідким азотом. Розроблена методика розрахунку кріогенних ЕППТ, яка враховує комплекс взаємопов'язаних електричних, магнітних, теплових та механічних процесів з урахуванням нелінійності основних параметрів. Визначені основні закономірності функціонування силових та енергетичних ЕППТ, що забезпечують лінійний рух якоря при збудженні від ємнісного накопичувача та джерела постійної напруги. Запропоновані структурно-геометричний, схемний і конструктивний підходи удосконалення одно- та багатосекційних ЕППТ з обґрунтуванням їх параметрів. Отримано експериментальні дані, які підтверджують достовірність прийнятих математичних моделей і технічних рішень. Основні результати досліджень використані при виконанні 7 держбюджетних і хоздоговірних науково-дослідних робіт, у науково-виробничих фірмах та в навчальному процесі.

*Ключові слова:* електромеханічний імпульсний перетворювач індукційного типу, кріорезистивна обмотка, кріогенне охолодження, рідкий азот, математична модель, експериментальні дослідження, конструкція перетворювача.

**Болюх В.Ф. Научно-технические основы создания электромеханических импульсных преобразователей индукционного типа с криворезистивными обмотками.** - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.01 - электрические машины и аппараты. - Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, 2003.

Диссертация посвящена проблеме создания электромеханических импульсных преобразователей индукционного типа (ЭИПИТ) с криворезистивными обмотками, охлаждаемыми жидким азотом. Разработана численно-аналитическая методика расчета комплекса взаимосвязанных электрических, магнитных, тепловых и механических процессов, возникающих в криворезистивных ЭИПИТ при возбуждении от источника постоянного напряжения (ИПН) и емкостного накопителя (ЕН), основанная на аналитическом решении дифференциальных уравнений, представлении их в рекуррентном виде и последующем расчете на ЭВМ с учетом нелинейных параметров. Установлено, что при возбуждении криворезистивных обмоток от ИПН ток приобретает форму импульса, амплитуда которого в 4...8 раз превышает ток при комнатной температуре. При использовании ЕН охлаждение жидким азотом позволяет изменить характер процесса возбуждения обмотки из апериодического в колебательно затухающий с увеличением амплитуды тока в 2...3 раза, либо при сохранении колебательного характера увеличить максимальное значение тока на 30...50 % с возрастанием амплитуды последующих полупериодов в 3...5 раз.

Установлено влияние криворезистивного охлаждения на характеристики силовых и энергетических ЭИПИТ. При возбуждении от ИПН за счет азотного охлаждения КПД преобразователя повышается в 2...5 раз в зависимости от приложенной нагрузки, позволяя использовать более короткие времена возбуждения. При емкостном возбуждении возрастает амплитуда токов в обмотках и уменьшается «паразитная» электродинамическая сила, повышая скорость в 1,5...3,0 раза и КПД в 3...6 раз. Показано, что характер распределения электродинамических усилий в многовитковом и массивном якорях ЭИПИТ в основном определяется геометрическими параметрами преобразователя. На основе структурно-геометрического анализа ЭИПИТ установлено, что наиболее предпочтительны комбинированные конфигурации массивного якоря, содержащие как дисковые, так и цилиндрические участки, частично охватывающие обмотку возбуждения. Установлено, что в криворезистивном ЭИПИТ дисковой формы стационарная короткозамкнутая обмотка, расположенная на нерабочей стороне, позволяет повысить электромеханические показатели до 25 %. В цилиндрическом преобразователе указанная обмотка в зависимости от расположения обеспечивает повышение КПД до 20 %. Использование электронной системы управления ЕН, реализующей однополярные импульсы в СОВ, обеспечивает снижение ее температуры нагрева в криворезистивном ЭИПИТ в 2...3 раза; КПД при этом повышается на 50...80 %. При обеспечении однополярного импульса в КОЯ ее нагрев снижается на 20...30 %, скорость увеличивается на 10...50 %, а КПД преобразователя повышается более, чем в 2 раза.

Обоснована концепция ЭИПИТ с квазистационарным якорем и подвижными направляющими цепными элементами, реализующая улучшенные пространственно-временные характеристики, за счет чего механические показатели повышаются на 40...80 %, а КПД - в 2,5...3,0 раза. Определены основные параметры, функциональные и параметрические ограничения, которые при использовании оптимизационных методик позволяют повысить КПД криворезистивного ЭИПИТ до 75...80 %.



Установлено, что рассредоточенный и последовательный подвод энергии к статорной обмотке многосекционного ЭИПИТ с импульсным возбуждением обеспечивает повышение скорости на 45...55 % при комнатной и на 25...30 % при азотной температурах, КПД - в 1,6...2,0 раза и снижение суммарных потерь на 30...40 % по сравнению с сосредоточенным подводом энергии, что имеет место в односекционном преобразователе с той же энергией источника. Криогенное охлаждение улучшает показатели многосекционного ускорителя даже при двукратном снижении энергии источника. Обоснована концепция криогенного ЭИПИТ дисковой конфигурации с подвижной обмоткой возбуждения, сообщаемой дополнительный импульс якорю при отталкивании от статорной короткозамкнутой обмотки. По сравнению с традиционным в этом преобразователе максимальные ЭДУ увеличиваются на 60...65 %, что приводит к повышению скорости на 20...25 % и КПД на 80...90 %. С использованием цепно-полевого подхода определен характер распределения ЭДУ, действующих на обмотки этого ЭИПИТ.

На лабораторных моделях с емкостным возбуждением, функционирующих при комнатной и азотной температурах, получено удовлетворительное согласие между экспериментальными и расчетными электрическими (с погрешностями до 5...12 %) и механическими (с погрешностями до 15...25 %) характеристиками. Основные результаты исследований использованы при выполнении 7 госбюджетных и хоздоговорных научно-исследовательских работ, в научно-производственных фирмах и в учебном процессе.

*Ключевые слова:* электромеханический импульсный преобразователь индукционного типа, криорезистивная обмотка, криогенное охлаждение, жидкий азот, математическая модель, экспериментальные исследования, конструкция преобразователя.

**Bolukh V.F. Scientific foundations of development of electromechanical impulse induction converters with cryoresistive windings. – Manuscript.**

Thesis for a Doctor's degree in Engineering Sciences by specialty 05.09.01 – Electrical Machines and Apparatus. – National Technical University “Kharkov Polytechnic Institute”, Kharkov, 2003.

The dissertation deals with designing electromechanical impulse induction converters (EIC) with liquid-nitrogen-cooled cryoresistive windings. On the basis of generalization of accumulated data in impulse electromechanics, a technique for designing cryogenic EICs has been developed which takes into account interrelated electrical, magnetic, thermal, and mechanical complex processes with nonlinear critical parameters. The basic mechanisms of power and energy EIC functioning which result in linear motion of the armature when the converter is excited from a capacitive accumulator or a constant-voltage source have been revealed. Structure-geometry, circuit, and design approaches for perfecting single- and multi-stage EICs with valid parameters have been suggested. Experimental data have been obtained to validate developed mathematical models and engineering solutions. The main research results have been utilized and implemented at execution of seven state and commercial research projects, in research enterprises, and for students' training.

*Key words:* electromechanical impulse induction converter, cryoresistive excitation winding, cryogenic cooling, liquid nitrogen, mathematical model, experimental research, constructions of electromechanical converter.