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

В. Ф. Болюх, К. В. Коритченко, О. І. Кочерга

ЛІНІЙНІ ІМПУЛЬСНІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

Монографія

Харків
НТУ «ХПІ»
2022

УДК 621.313:536.2.24:539.2
Б79

Рецензенти:

В. Є. Плюгін, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри систем електропостачання та електроспоживання міст Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова.

Г. М. Сучков, д-р техн. наук, професор, професор кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Публікується за рішенням Вченої ради НТУ «ХПІ»,

протокол №5 від 01.07.2022 р.

Болюх В. Ф.

Б79 Лінійні імпульсні електромеханічні перетворювачі: Монографія / В. Ф. Болюх, К. В. Коритченко, О. І. Кочерга. – Харків: Планета-Принт, 2022. – 288 с. – Укр. мовою.

Розглянуто ударно-силові пристрої та електромеханічні прискорювачі. Описані експериментальні дослідження і практичне застосування перетворювачів для електромагнітної катапульти БПЛА, очищення технологічного обладнання від сипких матеріалів, пристроїв знищення інформації на цифрових накопичувачах, балістичного гравіметра для вимірювання прискорення вільного падіння, газодетонаційного прискорювача плазмового утворення в повітряному середовищі.

Призначено для спеціалістів в області імпульсної електромеханіки, студентів, аспірантів та наукових співробітників.

Іл. 189. Табл. 16. Бібліогр. 162 назв

УДК 621.313:536.2.24:539.2
Б79

ISBN 000-000-0000-00-0 © В. Ф. Болюх, К. В. Коритченко, О. І. Кочерга, 2022

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

БПЛА	–	безпілотний літальний апарат;
ВЕ	–	виконавчий елемент;
ВМГ	–	вибухомагнітний генератор;
ЕДЗ	–	електродинамічні зусилля;
ЕМЗ	–	електромагнітні зусилля;
ЕЯ	–	електропровідний якір;
ЄНЕ	–	ємнісний накопичувач енергії;
КЯ	–	котушковий якір;
ЛЕП	–	лінія електропередач; –
ЛІЕП	–	лінійний імпульсний електромеханічний перетворювач;
ЛІЕП-Е2	–	лінійний імпульсний електромеханічний перетворювач з двома електропровідниковими якорями;
ЛІЕП-Е-Ф	–	лінійний імпульсний електромеханічний перетворювач з електропровідниковим та феромагнітним якорями;
ЛІЕП-К	–	лінійний імпульсний електромеханічний перетворювач електродинамічного типу з котушковим якорем;
ЛІЕП-К-Е	–	лінійний імпульсний електромеханічний перетворювач з котушковим та електропровідниковим якорями;
ЛІЕП-К-Е2	–	лінійний імпульсний електромеханічний перетворювач з котушковим та двома електропровідниковими якорями;
ЛІЕП-К-Е-Ф	–	лінійний імпульсний електромеханічний перетворювач з котушковим, електропровідниковим та феромагнітним якорями;
ЛІЕП-К-Ф	–	лінійний імпульсний електромеханічний перетворювач з котушковим та феромагнітним якорями;
ЛІЕП-Ф	–	лінійний імпульсний електромеханічний перетворювач електромагнітного типу з феромагнітним якорем;
МІУ	–	магнітно-імпульсна установка;
НЕЯ	–	нерухомий електропровідний якір;

ОІ	–	обмотка індуктора;
ОЯ		обмотка якоря;
РЕЯ	–	рухомий електропровідний якір;
ФЕ	–	феромагнітний екран;
ФЯ	–	феромагнітний якір;
N_1	–	число витків обмотки індуктора;
Δz	–	переміщення;
Δz_0	–	початковий зазор;
$B_{ex\,m}$	–	амплітуда аксіальної складової магнітного поля розсіювання;
C_0	–	ємність ємнісного накопичувача енергії;
F_z	–	величина імпульсу електродинамічних зусиль;
f_z	–	електромагнітні зусилля;
f_{zm}	–	амплітуда електродинамічних зусиль;
j_{1m}	–	амплітуда густини струму в обмотці індуктора;
L_0	–	індуктивність кабелів живлення;
m_Σ	–	маса активних елементів;
m_e	–	маса виконавчого елементу;
p	–	індекс паралельного з'єднання котушкового якоря з обмоткою індуктора (parallel connection);
R_0	–	активний опір кабелів живлення;
s	–	індекс послідовного з'єднання котушкового якоря з обмоткою індуктора (serial connection);
U_0	–	напруга ємнісного накопичувача енергії;
v_c	–	середня швидкість;
V_m	–	максимальна швидкість;
v_z	–	миттєва швидкість;
α_j	–	j – ий ваговий коефіцієнт показника ЛІЕП;
η	–	ККД;
K^*	–	критерій ефективності ЛІЕП.

ВСТУП

Актуальність теми. Одним з перспективних напрямків розвитку електромеханіки є лінійні імпульсні електромеханічні перетворювачі, які забезпечують розгін виконавчого елементу на короткій активній ділянці до високої швидкості та забезпечують потужні силові імпульси при незначному його переміщенні [1 – 6]. Зазначимо, що при використанні лінійних електродвигунів традиційного типу (синхронних, асинхронних та постійного струму) проблематично забезпечити такі питомі показники, прискорення та ударні механічні навантаження.

В лінійних імпульсних електромеханічних перетворювачах відбувається безпосереднє перетворення електричної енергії імпульсного джерела, яке, як правило, включає ємнісний накопичувач енергії, в лінійне переміщення якоря з виконавчим елементом. Лінійні імпульсні електромеханічні перетворювачі характеризуються короткочасним робочим режимом порядка декількох мілісекунд і відносно тривалим часом накопичення енергії в імпульсному джерелі. Крім того, ці перетворювачі характеризуються значними імпульсними електромагнітними та механічними навантаженнями, які суттєво перевищують аналогічні показники традиційних лінійних електродвигунів з тривалим режимом роботи.

Лінійні імпульсні електромеханічні перетворювачі використовуються в багатьох сферах науки, техніки та безпеки. Серед технологічних застосувань можна зазначити ударно-конденсаторне зварювання, обробку металів, штамповку, клепально-збірні й формувальні операції та ін. Такі перетворювачі використовуються для різноманітних випробувальних систем на ударні навантаження, швидкодіючих електричних апаратів, знищення інформації при несанкціонованому доступі, клапанно-коммутаційної апаратури, сейсмічних джерел, очищення бункерів від залишків матеріалів та ліній електропередач від обледеніння, пускових установок та ін. [7 – 17].

Найбільш розповсюдженими є лінійні імпульсні електромеханічні перетворювачі індукційного типу з масивним або багатовитковим короткозамкненим електропровідним якорем, лінійні імпульсні електромеханічні перетворювачі електромагнітного типу з феромагнітним якорем та електромеханічні перетворювачі електродинамічного типу з багатовитковим котушковим якорем, який електрично з'єднаний з обмоткою індуктора. Зазначені перетворювачі, які відрізняються між собою в основному конструкціями якорів, мають свої недоліки і переваги, але в цілому їх ефективність досить низька.

Одним із перспективних напрямків по підвищенню ефективності є розробка електромеханічних перетворювачів мультиякірних конфігурацій, які б поєднували кращі властивості перетворювачів зазначених типів з одним якорем. Такі розробки з'явились останнім часом [18]. Але системні дослідження в цьому напрямку не проводились.

Інший перспективний шлях підвищення показників лінійних імпульсних електромеханічних перетворювачів полягає у формуванні імпульсу збудження обмотки індуктора за допомогою електронної системи імпульсного джерела енергії. Однак на даний час такі дослідження проведені лише для лінійних імпульсних електромеханічних перетворювачів індукційного типу [19]. А для перетворювачів електродинамічного типу проводились аналогічні дослідження шляхом послідовного та паралельного з'єднання його обмоток [20].

Таким чином, системний підхід та аналіз електромеханічних характеристик та показників лінійних імпульсних електромеханічних перетворювачів мультиякірних конфігурацій, в тому числі з формуванням імпульсу струму збудження обмотки індуктора, є актуальною задачею для підвищення їх ефективності роботи при силовому та швидкісному призначенні.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ТА СФЕР ВИКОРИСТАННЯ ЛІНІЙНИХ ІМПУЛЬСНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

1.1. Загальна характеристика ЛІЕП

Одним із перспективних пристроїв сучасної електромеханіки являються лінійні імпульсні електромеханічні перетворювачі (ЛІЕП), які забезпечують високу швидкість виконавчого елемента (ВЕ) на короткій активній ділянці та створюють потужні силові імпульси при незначних його переміщеннях. Особливістю ЛІЕП являється те, що вони працюють з коротким робочим циклом і ударним навантаженням, яке багаторазово перевищує навантаження традиційних лінійних електродвигунів.

За принципом дії можна виділити лінійні електромеханічні імпульсні перетворювачі електромагнітного, магнітоелектричного, рейкотронного, електродинамічного і індукційного типу [1 – 7].

ЛІЕП магнітоелектричного типу працюють на основі взаємодії постійного магніту з магнітним полем індуктора. Ці перетворювачі можуть містити постійні магніти, які встановлені як на індукторі, так і на рухомому якорі. Вони виконуються одно- і багатосекційними, з одно- і двостороннім охопленням постійного магніту [9]. Однак постійні магніти для збереження своїх характеристик намагнічування не дозволяють підвищувати струм в ОІ вище певного рівня, що обмежує питомі показники такого перетворювача.

ЛІЕП рейкотронного типу являє собою пару нерухомих лінійних електродів (рейок) прямокутної, ромбовидної або більш складної форми поперечного перерізу, обтиснутих діелектричними стінками, між якими розташований прискорювальний електропровідний якір [10, 11, 12]. При роботі даного ЛІЕП імпульсний струм, який протікає по частині рейкових електродів і якорю, обумовлює прискорення останнього. Однак великий струм між

електродами і якорем викликає ерозійні процеси на контактних ділянках, що вимагає регулярної заміни електродів і якоря. Подальше збільшення швидкості якоря і ефективності ЛІЕП рейкотронного типу передбачається здійснювати за допомогою використання додаткових магнітів, що охоплюють електроди і підсилюють магнітне поле в активній зоні [13], або за рахунок комбінації з іншими типами електромеханічних перетворювачів [14].

Робота ЛІЕП електромагнітного типу побудована на взаємодії магнітного поля, що збуджується обмоткою індуктора (ОІ) від ємнісного накопичувача енергії (ЄНЕ) з рухомим феромагнітним якорем (ФЯ) [8]. При збудженні ОІ струмом на якір діє сила притягування. Основу цих ЛІЕП утворюють електромагніти циліндричної форми (рис. 1.1).

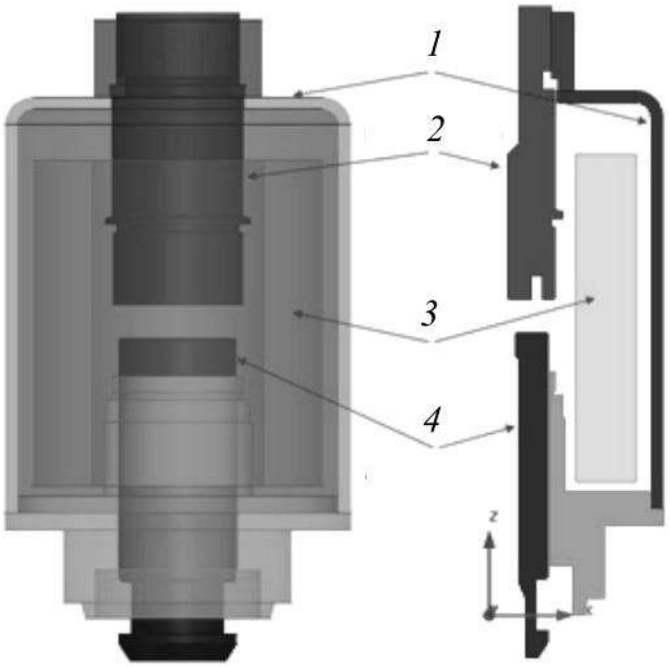
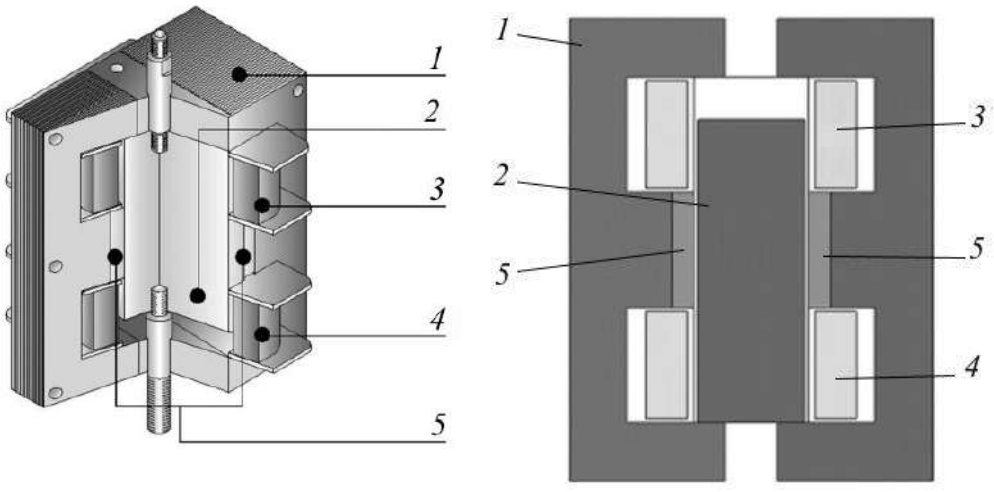


Рисунок 1.1 – Конструкція ЛІЕП електромагнітного типу: *1* – феромагнітне осердя (екран); *2* – полюсна деталь; *3* – ОІ; 4 – ФЯ

Існують ЛІЕП електромагнітного типу, які для створення додаткового магнітного потоку комплектуються постійними магнітами, що дозволяє утримувати феромагнітний якір в фіксованому положенні (рис. 1.2).

Перевагами ЛІЕП електромагнітного типу є проста конструкції, висока надійність, можливість регулювання швидкості та сили спрацювання.

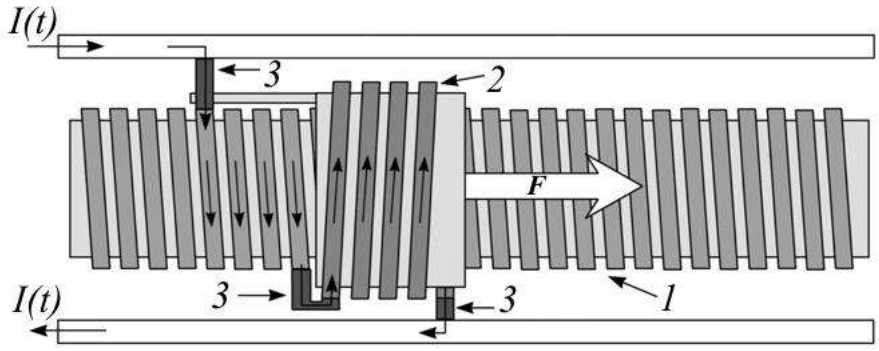


а *б*

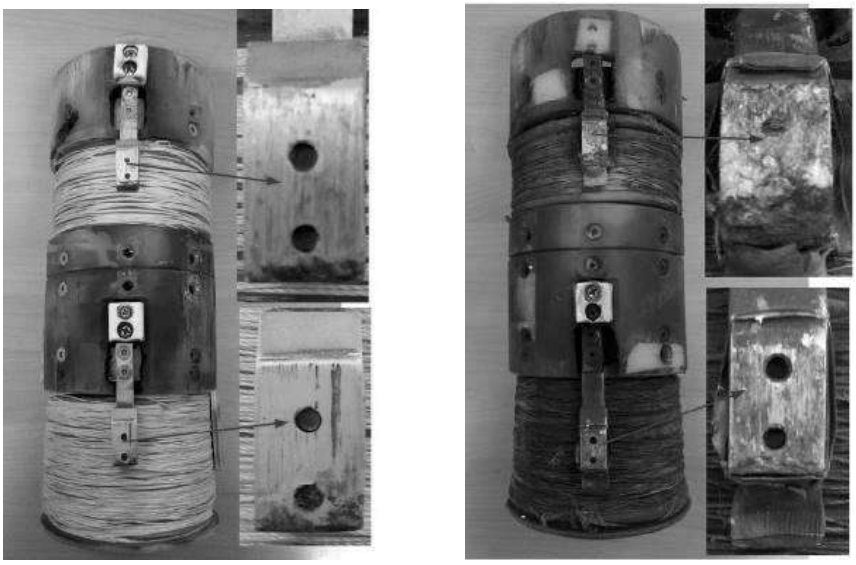
Рисунок 1.2 – Конструкція ЛІЕП електромагнітного типу з постійними магнітами : *1* – феромагнітне осердя; *2* – ФЯ; *3 – 4* – ОІ; *5* – постійний магніт

ЛІЕП електродинамічного типу працюють на основі взаємодії між магнітними полями, створеними рухомим котушковим якорем (КЯ) і нерухомою ОІ, які живляться одним і тим же струмом від ЄНЕ [15]. КЯ являє собою багатовиткову обмотку. При роботі під час руху КЯ щодо ОІ, змінюється їх взаємна індуктивність, що впливає на величину електродинамічної сили і призводить до зниження ефективності такого перетворювача. Багато в чому ця проблема усувається в коаксіально-спіральному перетворювачі, в якому ОІ та КЯ намотані по спіралі та електрично з'єднані за допомогою щіток [16]. В процесі руху можна забезпечити оптимальне розташування однієї обмотки щодо частини іншої обмотки, яка живиться струмом [17]. Так дослідниками Thom та Norwood було запропоновано декілька варіантів конструктивних схем ЛІЕП електродинамічного типу (рис. 1.3) [18]. Однак щіткова комутація великого імпульсного струму є серйозною проблемою такого перетворювача. Крім того, електродинамічні перетворювачі можуть забезпечувати значне

тягове зусилля тільки за певних розмірів КЯ і виконанні ОІ секційної в напрямку переміщення якоря [19].



а

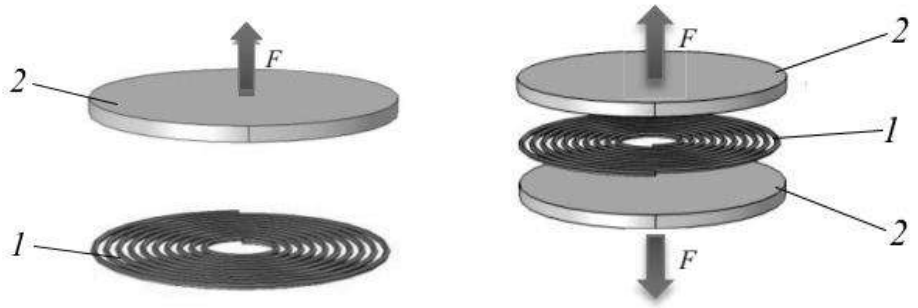


б *в*

Рисунок 1.3 – Конструктивна схема ЛІЕП електродинамічного типу (*а*) з охопленням обмоток: *1* – ОІ; *2* – КЯ; *3* – щітково-контактний вузол. Зовнішній вигляд щітково-контактного вузла ЛІЕП електродинамічного типу до (*б*) і після (*в*) роботи

Принцип дії ЛІЕП індукційного типу заснований на взаємодії магнітного поля, що збуджується струмом ОІ від ЄНЕ з індукованим струмом в короткозамкненій одновитковій або багатовитковій обмотці якоря [20, 21]. Короткозамкнена одновиткова обмотка якоря, є масивним електропровідним диском. При роботі в ЕЯ наводяться вихрові струми від індуктора, внаслідок чого між ними виникає електродинамічна сила відштовхування (рис. 1.4).

Найбільш розповсюджена традиційна конструкція ЛІЕП з одним масивним ЕЯ, яка забезпечує силову дію в одну сторону (рис. 1.4 *а*). Але відомий ЛІЕП з двома масивними ЕЯ, який забезпечують силову дію на дві протилежні сторони (рис 1.4 *б*) [22].



а *б*

Рисунок 1.4 – Одноякірна (*а*) та двоякірна (*б*) конфігурація ЛІЕП індукційного типу: *1* – ОЯ, *2* – ЕЯ

Перевагами ЛІЕП індукційного типу є: безконтактний рух якоря відносно індуктора, відсутність щітково-контактних і ерозійних процесів, прискорення якорів практично будь-яких форм і розмірів, висока надійність, особливо при виконанні ЕЯ масивним. Однак ККД цих пристроїв знаходиться на невисокому рівні, що потребує нестандартних схемних і конструктивних рішень щодо підвищення ефективності роботи.

В роботі [24] зазначається, що показник використання активних матеріалів на одиницю зусилля в ЛІЕП індукційного типу в 7–8 разів вище, ніж у перетворювачів електромагнітного типу, і в 1,6 разу вище, ніж у перетворювачів електродинамічного типу.

Відома конструкція ЛІЕП індукційного типу, в якому з метою підвищення ККД забезпечується узгодженість інерційних характеристик якоря, електричного кола ОІ та механічного навантаження [30]. Для цього циліндричний порожнистий якір заповнюється внутрішніми дисками, розділеними пружними елементами. Внутрішні диски можуть ковзати всередині якоря. Якір розганяється і стискає пружні елементи, по черзі залучаючи в рух інші диски, внаслідок чого маса рухомої частини зростає

дискретно. При ударі якоря об механічне навантаження процес розвивається у зворотному порядку: диски передають накопичену енергію по черзі.

На основі ЛІЕП індукційного типу розробляються багатосекційні прискорювачі, які в іноземній літературі називаються coil gun [31, 32]. У цих прискорювачах секції ОІ послідовно збуджуються зі швидкістю руху якоря при певному його положенні щодо відповідної секції ОІ, коли градієнт взаємної індуктивності між ними максимальний.

Дослідники з Массачусетського технологічного інституту і корпорації Electromagnetic Launch Research (США) використовували високовольтний ЄНЕ з параметрами C_0 = 300 мкФ, U_0 = 20 кВ [33]. Комутація секцій здійснювалася за допомогою оптоелектронної системи. Якір, проходячи вздовж направляючої, діє як заслін на шляху джерел світла, а фототранзистор, встановлений на іншому кінці волоконно-оптичного екранованого кабелю, реєструє переривання променю і видає сигнал на комутацію відповідної секції ОІ. При розгоні якоря масою m_2 = 40–120 г із зовнішнім діаметром D_{2ex} = 70 мм була досягнута швидкість v_z = 325 м/с. При цьому досягнуто ККД η =15 %.

Відома конструкція комбінованого ЛІЕП індукційно-рейкотронного типу, що забезпечує розгін якоря з ВЕ масою m_2 = 2,33 кг до швидкості v_z = 139,4 м/с [34]. При дослідженні багатосекційного ЛІЕП електромагнітного типу, що забезпечує зворотно-поступальний рух з підвищеною силою удару і високою частотою імпульсів, в секціях ОІ реєструвалися високі температури 600–800 К [35]. Для збереження робочого стану доводиться застосовувати спеціальну систему охолодження з використанням радіаторів, зовнішньої циркуляції повітря, додаткових охолодних середовищ.

Відомі конструкції ЛІЕП, що містять феромагнітні осердя, додаткові вторинні обмотки, феромагнітні або механічні елементи, які забезпечують посилення силового впливу та підвищення швидкісних показників [36, 37]. Однак в цілому ефективність ЛІЕП залишається на досить низькому рівні, їхній ККД не перевищує η = 10–15 %.

Одним із напрямків удосконалення ЛІЕП є створення мультиякірних ЛІЕП, які об’єднують якоря перетворювачів основних типів, а саме індукційного, електродинамічного, електромагнітного. В мультиякірному ЛІЕП дискової конфігурації феромагнітний якір розташовується з однієї сторони нерухомого індуктора, а електропровідний якір та котушковий якір з протилежної сторони. В такому випадку можливо забезпечити однонаправлену дію електродинамічних і електромагнітних сил на об’єкт впливу.

В роботі [40] описані варіанти конструктивних схем ЛІЕП, мультиякірних конфігурацій, які використовуються для розмикання контактів електричних апаратів (рис. 1.5). Конструктивна схема перетворювача складається з двох нерухомих ОІ та рухомих ЕЯ і ФЯ. Якоря з’єднанні між собою через систему тяг, які в свою чергу з’єднані з контактним вузлом електричного апарату.

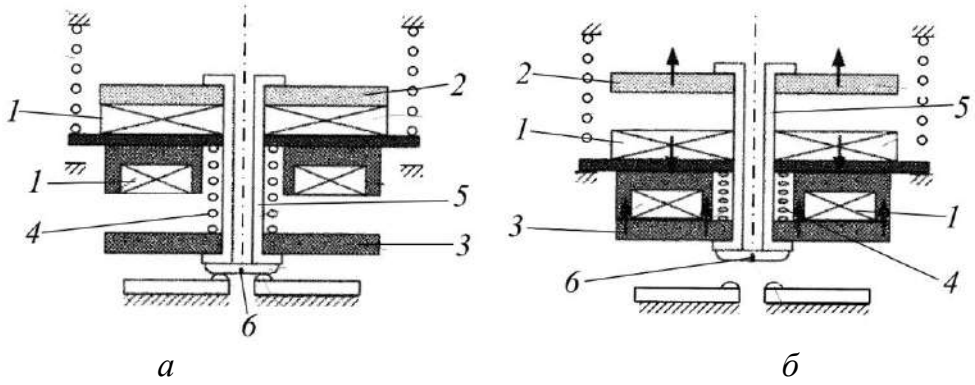


Рисунок 1.5 – Конструкція ЛІЕП мультиякірної конфігурації у вихідному стані (*а*) та в момент спрацювання (*б*): *1* – ОІ; *2* – ЕЯ; *3* – ФЯ; *4* – зворотна пружина; *5* – система тяг; *6* – контактний вузол

В роботі [41] представлено електродинамічний привід, який за рахунок підбору і узгодження параметрів джерела електричної енергії з параметрами конструктивних елементів ЛІЕП, забезпечує високий рівень ККД та необхідний імпульс механічної сили. Конструктивна схема перетворювача, яка представлена на рис. 1.6, складається з обмотки індуктора та двох електропровідних якорів.

Зазначимо, що одним із напрямків підвищення ефективності ЛІЕП, є застосування електронних схем живлення з використанням ЄНЕ, які формують різні форми імпульсів струму збудження ОІ. Так групою дослідників з FREEDM Systems Center North Carolina State University було виконано дослідження п’ятьох різних схем живлення ЛІЕП індукційного типу [42]. Вони показали істотний вплив форми імпульсів збудження на показники роботи ЛІЕП, що показує актуальність даного напрямку досліджень [43, 44].

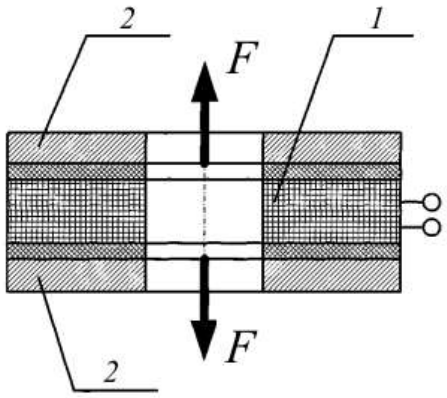


Рисунок 1.6 – Конструктивна схема ЛІЕП: *1* – ОІ; *2* – ЕЯ

1.2 Застосування ЛІЕП як ударно-силових пристроїв

Одним із ефективних застосувань ЛІЕП є ударно-конденсаторне зварювання. Для приєднання масивних стрижневих елементів до плоских листів з кольорових металів і їх сплавів доцільно використовувати імпульсні способи зварювання, що поєднує тепловий і силовий вплив на деталі, які зварюються. Одним з таких способів є ударно-конденсаторне зварювання [45 – 48]. На рис. 1.7 представлена принципова схема пристрою ударно-конденсаторного зварювання, який забезпечує значні механічні сили f_z при зварюванні стрижневої деталі з плоскою корпусною деталлю [45]. Генератор імпульсного струму включає трансформатор T_p, ЄНЕ *C*, комутаційний пристрій *Q*. При такому зварюванні можна з'єднувати деталі з матеріалів, які іншим способом практично не зварюються. Плоский індуктор забезпечує необхідні ЕДЗ на стрижневу деталь через штовхач. Штовхач являє собою циліндричну

конструкцію з дюралюмінію, в центрі якої є міцна сталева вставка. Одночасно струмом розряду $I_р$ здійснюється тепловий і силовий вплив на зону з'єднання.

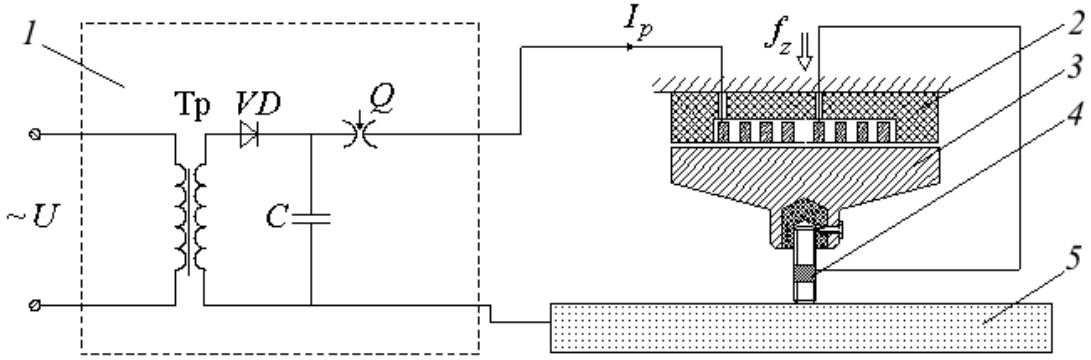


Рисунок 1.7 – Принципова схема пристрою ударно-конденсаторного зварювання: *1* – генератор імпульсного струму; *2* – дисковий індуктор; *3* – штовхач; *4* – зварювана деталь; *5* – корпусна деталь

В роботах [49] визначено особливості конструкції ЛІЕП індукційного типу при застосуванні його в технологічному комплексі для електродинамічної обробки зварних з’єднань. Встановлені взаємозв’язки конструктивних параметрів ЛІЕП з величиною електродинамічної сили та густиною струму при заданих величинах напруги ЄНЕ та тривалості розрядного процесу. Визначено доцільний розмір відбитку електрода при електродинамічній обробці зварних з’єднань з алюмінієвих сплавів. При проходженні струму через металеву заготівку та дії імпульсної електромагнітної сили ініціюються деформаційні процеси, взаємодія яких зі зварювальними напруженнями викликає залишкові пластичні деформації. Наслідком цієї взаємодії є зниження рівня залишкових напружень розтягу або їх перетворення у напруження стискання, що позитивно впливає на подовження ресурсу зварних з’єднань. Перевагами даної обробки є можливість здійснення локальної дії, що дозволить обробляти об’єкти будь-якої форми та розмірів при невеликих витратах енергії.

Перспективним напрямком використання ЛІЕП є привід штампувальних машин. У Тольятинському політехнічному інституті (ТПІ, РФ) розроблено конструкцію пресу, що забезпечує кінетичну енергію якоря до 500–1000 Дж з

співвідношеннями кінетичної енергії якоря до його маси до 50 Дж/кг і зусилля до маси якоря до 5 кН/кг (рис. 1.8) [50]. За цими показниками ЛІЕП індукційного типу в декілька разів перевищує як електромагнітні перетворювачі, так і лінійні асинхронні двигуни із зворотно-поступальним рухом якоря.

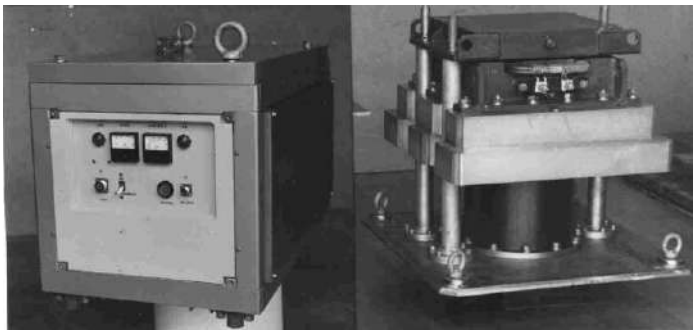
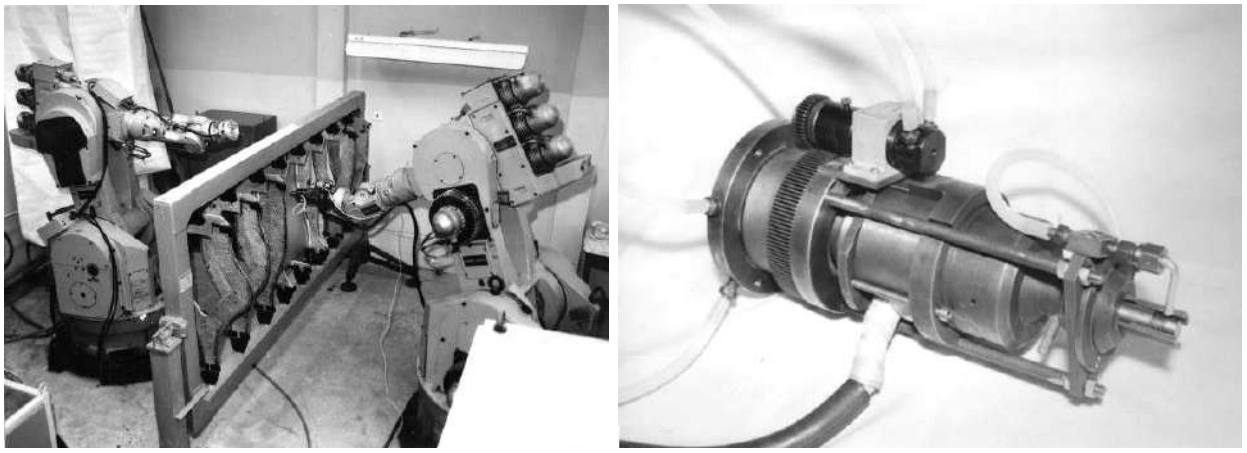


Рисунок 1.8 – Прес ТПІ на базі ЛІЕП індукційного типу

Результати експериментів при обробці металів ударним тиском показали доцільність їх застосування при виконанні розділових, формувальних операцій листового і об'ємного штампування дрібних і середніх за розміром деталей серійного і масового виробництва. Штампувальне обладнання, створене на основі ЛІЕП, за своїми питомо-енергетичними і техніко-економічними показниками краще механічних пресів.

ЛІЕП застосовуються для клепально-складальних робіт. Для реалізації ЛІЕП в клепальних інструментах та обладнанні в роботі [54] описано комплекс робіт по створенню приводу і розробці технології клепки. На їх базі були створені дослідні зразки магнітно-імпульсних молотків УМК-6АМ і УМК-8. Результати випробувань показали, що з’єднання, які виконані магнітно-імпульсними молотками, значно перевершують за якістю і ресурсом з'єднання, які виконані пневматичними молотами. Був випробуваний зразок робототехнічного клепального комплексу, що складається з складального пристосування зі збірною панеллю, двох роботів з встановленими на його «руках»: з одного боку, револьверній головкою а, з іншого боку, ЛІЕП індукційного типу (рис. 1.9). Використання ЛІЕП в клепально-складальному

виробництві дозволяє розширити технологічні можливості клепального ручного інструменту і стаціонарного обладнання, підвищити якість клепаних з'єднань, поліпшити умови праці працівників.



а *б*

Рисунок 1.9 – Загальний вигляд (*а*) і ЛІЕП індукційного типу (*б*) клепально-складального робототехнічного комплексу

ЛІЕП використовуються для магнітно-імпульсного компактування (ущільнення) порошків кераміки. Компактування є однією з головних технологічних операцій, що забезпечує отримання високоякісної кераміки з ультрадисперсних і середньодисперсних оксидних порошків шляхом формування виробів. При цьому необхідно домогтися щільності компакту, яка складає 70–90 % щільності безпористої структури. Цю умову складно виконати традиційними способами формування порошків [55]. На рис. 1.10 показана схема установки магнітно-імпульсного компак-вання порошків кераміки, що включає індуктор 1, концентратор 2, пуансон 3, прес-форму 4, порошок 5, основу 6. Індуктор магнітно-імпульсного преса є плоскою обмоткою з мідної шини, витки якої ізольовані і жорстко зафіксовані один від одного. Він під'єднаний в коло ЄНЕ С і комутатора К. ЄНЕ складається з 12 конденсаторів марки К41-Н7 ємністю 100 мкФ і напругою 5 кВ, з'єднаних паралельно.

При спрацьовуванні комутатора ЄНЕ розряджається на індуктор. Імпульсний струм створює інтенсивне магнітне поле, яке індукує в концентраторі струм (напрямки струмів зображені у вигляді точок і хрестів на

рис. 1.10). Взаємодія струмів індуктора і концентратора викликає ЕДЗ відштовхування, що створює тиск на концентратор. Оскільки останній механічно з'єднаний з пуансоном, то в пресс-формі створюється тиск пресування, який може досягати декількох гігапаскалів.

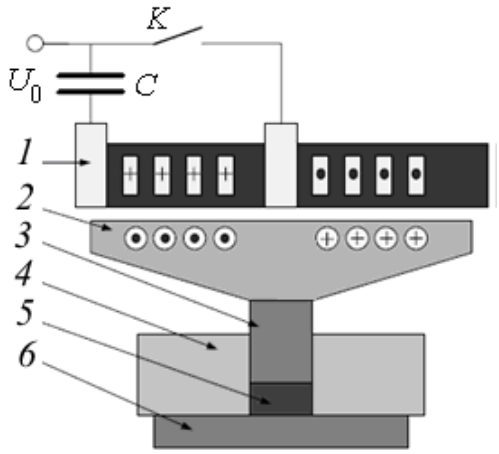


Рисунок 1.10 – Схема установки магнітно-імпульсного компактування порошків кераміки

Магнітно-імпульсне компактування, яке проводилося на магнітно-імпульсному пресі Інституту електрофізики УРО РАН (РФ), дозволяє формувати порошкові компакти з максимальною щільністю [56]. Порошок в прес-формі піддавався знегажуванню при тиску приблизно 1 Па і при температурі 450 °С. Після цього за допомогою магнітно-імпульсного преса на пуансон надходив імпульс тиску протягом 300 мкс, максимальна величина якого склала 1,4 ГПа. Магнітно-імпульсне компактування характеризується простотою обладнання, безпекою, високим ККД і забезпечує значний імпульсний тиск. Основною перевагою цього методу є те, що використання імпульсних тисків зі значною амплітудою дає змогу отримувати більш високу щільність компактування у порівнянні зі щільністю, що досягається статичним пресуванням.

Магнітно-імпульсні установки використовуються для очищення поверхонь обладнання від відкладень. Основною проблемою у галузях промисловості, які використовують, зберігають і переробляють сипучі

речовини, є зависання та, прилипання цих речовин в ємностях. Тому на підприємствах запроваджують системи очищення ємностей. Практика експлуатації магнітно-імпульсних установок (МІУ) свідчить про більш високу ефективність магнітно-імпульсного способу очищення в порівнянні з віброочищенням та пневмоочищенням [57]. На рис. 1.11 показана схема МІУ для очищення об’єктів.

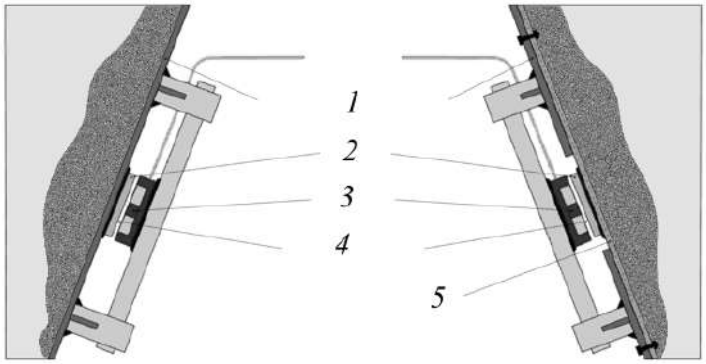


Рисунок 1.11 – Схема МІУ для очищення обладнання: *1* – очищаєма поверхня; *2* – ЕЯ; 3 – індуктор; *4* – повітряний проміжок; *5* – додаткова вібропластина

Установка магнітно-імпульсного очищення застосовується для отримання значного імпульсу механічної сили за рахунок перетворення електричної енергії ЄНЕ в механічну енергію коливання поверхні, що очищається [58, 59, 60]. МІУ містить високовольтне джерело постійної напруги, розрядний контур, що складається з ЄНЕ, шунтувального діода та електронного комутатора, плоский індуктор та ЕЯ. ЕЯ закріплений на поверхні, що очищається з протилежного від відкладень сторони і утворює зазор з індуктором. Індуктор закріплений на підставці, зафіксованій паралельно поверхні, що очищається. Магнітно-імпульсний спосіб дозволяє підвищити ефективність очистки бункерів та інших ємностей, що використовуються в агломераційному і ливарному виробництві, гірничодобувній та інших галузях промисловості.

На базі ЛІЕП побудовані сейсмічні джерела з широким діапазоном ударних імпульсів. Для проведення сейсморозвідки необхідні джерела ударного навантаження, які формують силові імпульси [62]. В роботі [64] описане

сейсмічне джерело на базі ЛІЕП електродинамічного типу, що містить вантаж, і жорстко з'єднаний з ним індуктор (рис. 1.12). В пазах індуктора розташовуються верхня і нижня обмотки, які підключенні до ЄНЕ. Індуктор спирається на плиту за допомогою пружних елементів. Якір через жорстко з'єднану плиту передає знакозмінні силові імпульси на ґрунт, збуджуючи в ньому сейсмічні хвилі. Частота і амплітуда силових хвиль визначається частотою і амплітудою імпульсів струму, що формуються в обмотках. В роботах [65, 66] розглянуті структура та параметри магнітного поля в цьому сейсмоджерелі.

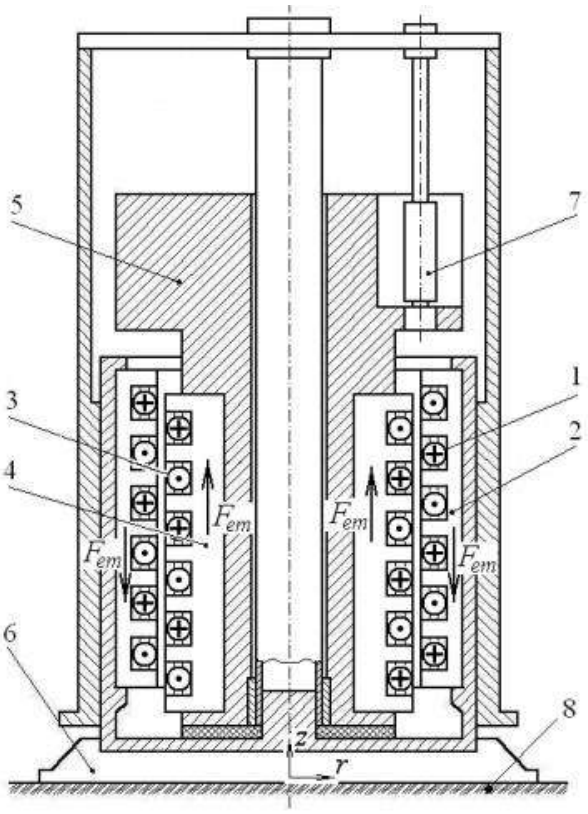


Рисунок 1.12 – Сейсмічне джерело на базі ЛІЕП електродинамічного типу:
1 – обмотка якоря; *2* – магнітопровід якоря; *3* – кільцева обмотка реактора; *4* – магнітопровід реактора; *5* – інертна маса; *6* – опорна плита; *7* – амортизатор; *8* – ґрунт

Встановлено, що основною особливістю розглянутого ЛІЕП є сильне насичення феромагнітних осердь. Значення магнітної індукції на окремих ділянках досягають 2,8–3,0 Тл, в спинках осердь 1,9–2,7 Тл, в зазорі 3,5 Тл. Розподіл магнітних потоків полюсних поділів по довжині ЛІЕП виявляється

нерівномірним. За межами осердь магнітне поле має досить велику величину до 0,5 Тл в окремих місцях на їх поверхні.

ЛІЕП використовуються для збудження пружних коливань у масивних конструкціях. В роботі [67] розглянуто ЛІЕП індукційного типу для збудження пружних коливань у масивних конструкціях. Виконано чисельний аналіз електромагнітних процесів в ЛІЕП для збудження пружних коливань у бетонних конструкціях для двох варіантів його конструктивного виконання без шихтованого магнітопроводу та з магнітопроводом, в пазах якого розташована багатовиткова ОІ. В розрахунках використовувалась коло-польова модель, що враховує залежність розрядного струму ЄНЕ від характеру дифузії магнітного поля в об'ємі струмопровідної пластини. Показано, що електромагнітна сила, яка діє на цю пластину протягом першої напівхвилі розрядного струму, змінюється у часі як функція, близька до дзвіноподібної. Наявність магнітопроводу при одних і тих самих параметрах розрядного кола, розмірах індуктора і пластини призводить до збільшення тривалості та амплітуди силового імпульсу приблизно на 30 %. У разі використання магнітопроводу відбувається перерозподіл електромагнітних сил так, що провідники ОІ розвантажуються від їхньої дії, а магнітопровід відчуває значне силове навантаження.

В роботі [68] описано комплексну модель з частотно-залежними параметрами для розрахунку робочих характеристик магнітоімпульсного вібратора. Особливістю моделі є залежність параметрів схеми заміщення вібратора від частоти, що забезпечує підвищення точності розрахунку в ширшому діапазоні її зміни. Аналіз отриманих даних свідчить про значну залежність параметрів вібратора від частоти. Так, активний опір зростає зі збільшенням частоти порівняно зі значенням опору постійному струму більш ніж у два рази. Має місце зменшення коефіцієнта електромагнітної сили та індуктивності обмотки. Для одержання залежностей параметрів від частоти використовувалися методи експериментального дослідження та чисельного розрахунку за допомогою пакета програм Comsol Multiphysics.

В роботі [69] запропонована модель для дослідження електромеханічних процесів у двомасовій віброударній установці з приводом на базі ЛІЕП, що ґрунтується на схемі заміщення із зосередженими параметрами. Електричні параметри моделі є залежними від робочої частоти. Також враховуються магнітні втрати в осерді. Виконано розрахунок характеристик двомасової електромеханічної установки залежно від параметрів ударного навантаження та робочої частоти. Проведено експериментальні дослідження електромеханічних характеристик ЛІЕП в віброударному режимі роботи.

В роботі [70] розглядаються електромеханічні процеси в ЛІЕП для вібратора механічних коливань. Розглянута схемна реалізація динамічних моделей, переважним способом розрахунку яких є можливість використання апарату структурного моделювання в Matlab Simulink. Виконано порівняння варіантів моделей між собою, що враховує ступінь насичення магнітопровода, нелінійність питомих втрат в сталі, несинусоїдальність зміни магнітного потоку, а також форму періодичного сигналу напруги на вході перетворювача. Зроблено висновок про доцільність використання динамічних моделей, що виключають похибки обчислення потужності втрат при наявності постійної складової магнітного потоку.

На базі ЛІЕП працюють протиобмерзальні електромеханічні системи. Видалення льоду і снігу з проводів і грозозахисних тросів ліній електропередач (ЛЕП) призводить до підвищення їх надійності в екстремальних погодних умовах, пов'язаних з інтенсивним обмерзанням проводів і грозозахисних тросів. На рис. 1.13 представлено пристрій для ударно-динамічного видалення льоду і снігу з проводів і грозозахисних тросів ЛЕП [72]. Пристрій включає ОІ 1, яка закріплена в корпусі 2 індукторній системі 3 і підключена до генератора імпульсних струмів. Вісь ОІ 1 і дроти 4 перетинаються під прямим кутом. В індукторну систему 3 введений ЕЯ 5, який за допомогою механізму 6 притиснутий до дроту 4.

Індукторна система за допомогою каретки 7, несучого 8 та опорного 9 роликів встановлюється на проводі 4 і утримується штангою 10, яка

розташована під кутом до проводу 4. У корпусі 2, починаючи з верхньої сторони 11, виконані два наскрізних паза 12 для проведення дроту 4. Штанга за допомогою шарніра 13 з'єднана одним кінцем з корпусом каретки, а іншим кінцем з індукторною системою 3. Після зняття напруги з ЛЕП за допомогою несучого ролика 8 каретку 7 закріплюють на очищаємому дроті, притискаючи до нього ЕЯ 5. Включають генератор імпульсних струмів, в результаті чого на ОІ 1 через задані проміжки часу подають імпульси електричного струму.

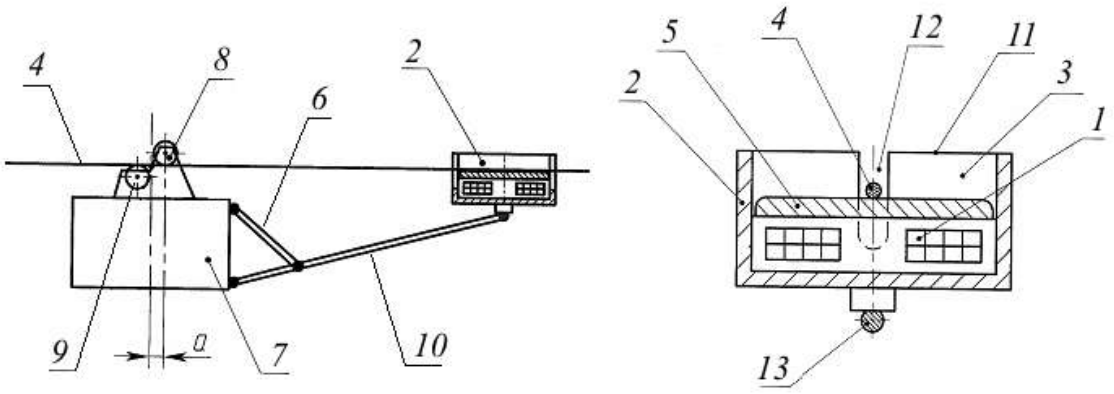


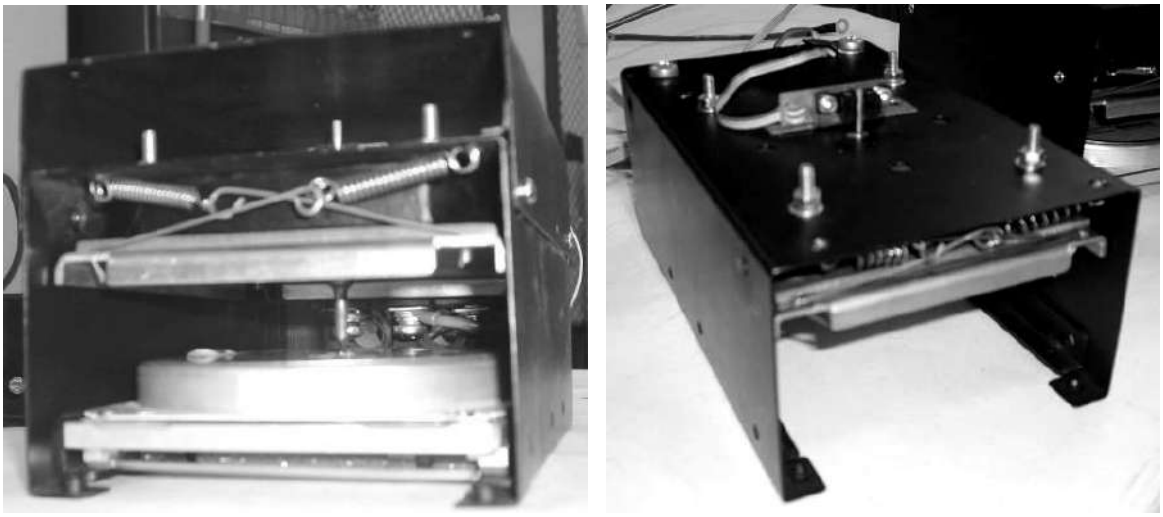
Рисунок 1.13 – Пристрій для ударно-динамічного видалення льоду і снігу з проводів і грозозахисних тросів ЛЕП

Взаємодія вихрових струмів в ЕЯ *5* з магнітним полем ОІ *1* призводить до виникнення електродинамічних сил, під дією яких якір і притиснутий до нього провід *4* з великим прискоренням переміщаються в напрямку, перпендикулярному осі проводу *4*, викликаючи руйнування і скидання налиплого льоду і снігу. Під дією протидіючих сил натягу проводу *4* якір *5* повертається у вихідне положення.

На базі ЛІЕП побудовані пристрої для знищення комп'ютерної інформації. На персональних комп'ютерах зберігаються значні обсяги інформації, які представляють високу комерційну або службову цінність. Тому комп'ютер повинен мати захист важливої інформації від несанкціонованого доступу сторонніми особами при безпосередньому зверненні до вінчестера або через Інтернет [73]. У практиці інформаційної безпеки для повного збереження інформації при несанкціонованому доступі рекомендується фізичне

пошкодження вінчестера, при якому ніяким чином не можна відновити збережену інформацію [74, 75].

В роботі [76] описано пристрій знищення інформації на вінчестері на базі ЛІЕП індукційного типу (рис. 1.14). Пристрій включає оптичний датчик положення бойка, розташований на корпусі пристрою, поворотні пружини з перехресними тягами, нерухому ОІ і ЕЯ у вигляді мідної пластини, з'єднаної з силовою пластиною.



а *б*

Рисунок 1.14 – Загальний вигляд пристрою для знищення інформації: вид спереду в робочому положенні з вінчестером (*а*), вид зверху без захисного кожуха і без вінчестера (*б*)

Як було встановлено в процесі випробувань, пробій стандартного вінчестера бойком відбувається після одного удару. У разі пробиття вінчестера з особливо міцним корпусом пристрій збуджує серію послідовних силових імпульсів для проникнення бойка на задану глибину. За висновком фахівців з відновлення вінчестерів на даний момент не існує технології, за допомогою якої можна було б відновити інформацію, коли в пластинах вінчестера є механічне пошкодження.

1.3 Застосування ЛІЕП в якості електромеханічних прискорювачів

ЛІЕП використовуються в випробувальних установках на ударні навантаження. Випробувальні установки на основі магнітно-імпульсних метальних пристроїв досить ефективні для вивчення поведінки матеріалів і виробів при ударних впливах в лабораторних умовах. Випробування виробів авіакосмічної техніки при зіткненні з різними об'єктами є одними з найбільш важливих. При випробуваннях виробів об'єкт випробувань закріплюється нерухомо, а масивне тіло, наприклад, пластина в якості імітатора перешкоди, прискорюється до необхідної швидкості [77] (рис. 1.15). Установка містить генератор імпульсного струму 1, зарядний пристрій 2, ЄНЕ 3, комутаційний пристрій 4, індуктор 5, тіло, яке прискорюють 6, об'єкт випробувань 7, систему ударних датчиків 8 і вимірювальну апаратуру 9.

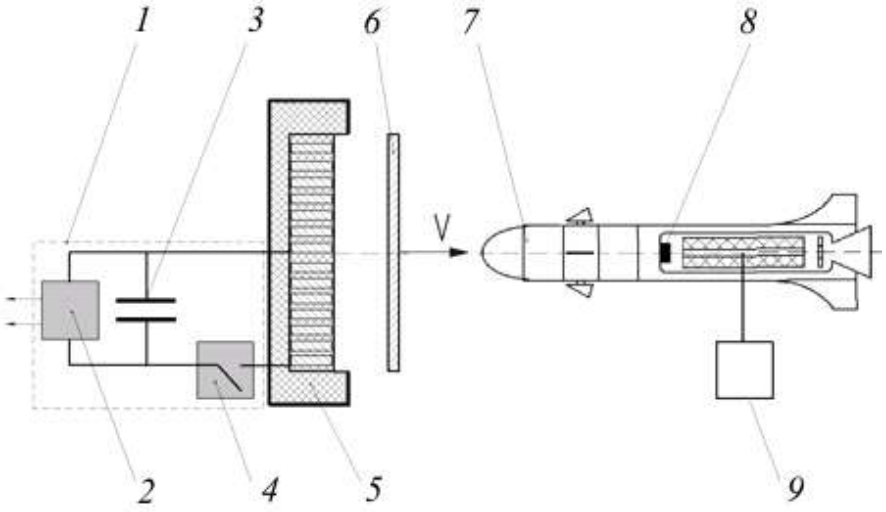
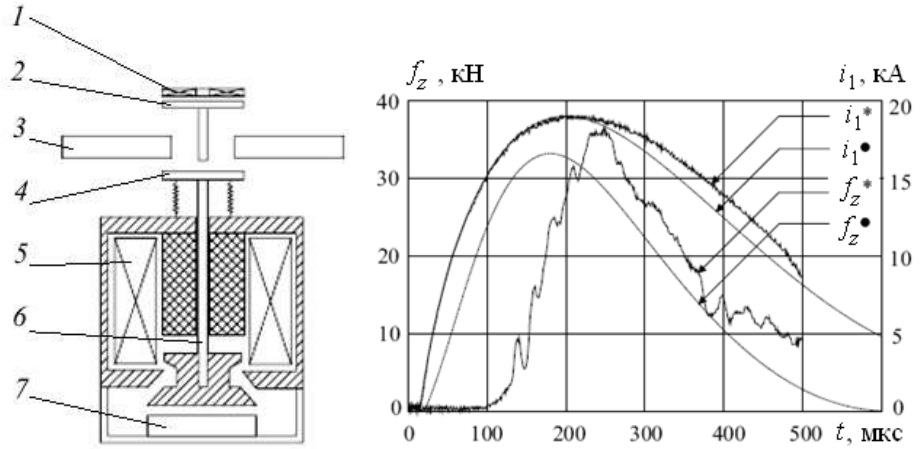


Рисунок 1.15 – Схема установки для випробувань виробів авіаційно-космічної техніки при зіткненні з об’єктом

На такому ж принципі побудована установка для випробувань устаткування на ударне навантаження при зіткненні з великогабаритними частинками різної форми і природи [78]. В якості частинок можуть бути елементи природного або штучного подрібнення, кульки, контейнери з різними наповнювачами та ін. У цьому випадку використовується плоский якір, що

дозволяє метати групи об'єктів складної форми, об'єкти з непровідного матеріалу та ін. Після прискорення до заданої швидкості якір відсікається спеціальним пристроєм, а частинки продовжують вільний рух до зустрічі з об'єктом випробувань. Така система випробувань може бути застосована, наприклад, при випробуваннях елементів бронетанкових конструкцій і засобів індивідуального бронезахисту на ударну міцність.

ЛІЕП широко застосовуються в електричних апаратах. Для роботи в мережах змінного і постійного струму автоматичні вимикачі повинні забезпечити відключення струму короткого замикання. Класичні механічні вимикачі не повністю забезпечують необхідну швидкодію вимкнення. Для забезпечення високої швидкодії використовують ЛІЕП, які забезпечують час відключення комутаційного апарату 2,5–3,0 с [79]. В роботі [80] описано комбінований ЛІЕП електромагнітного та індукційного типів, що забезпечує постійну силу величиною 500 Н. На рис. 1.16 а показаний привід автоматичного вимикача, що містить індуктор 1 та якір 2 ЛІЕП індукційного типу, упор 3, рухливий контакт 4, обмотку 5 та якір електромагніту 6, демпфер 7. На рис. 1.16 б показані теоретичні (жирні точки) і експериментальні (зірочки) значення струму індуктора i1 і сили відкриття контактів fz. Сила вимірювалась за допомогою п'єзоелектричного датчика, розташованого на рухомому контакті. При цьому механічна сила щодо струму запізнюється приблизно на 100 мкс. Спостерігаються також коливання сили з частотою рівною власній частоті коливань механічних елементів приводу. Цей гібридний вимикач був розроблений і випробуваний на струм 4,0 кА і напругу 1,5 кВ.



а *б*

Рисунок 1.16 – Схема комбінованого ЛІЕП електромагнітно-індукційного типу для автоматичного вимикача (*а*) та його електромеханічні характеристики (*б*)

В роботі [82] описана схема комутаційного апарату з індукційно-динамічним приводом і бістабільним магнітним фіксатором (рис. 1.17).

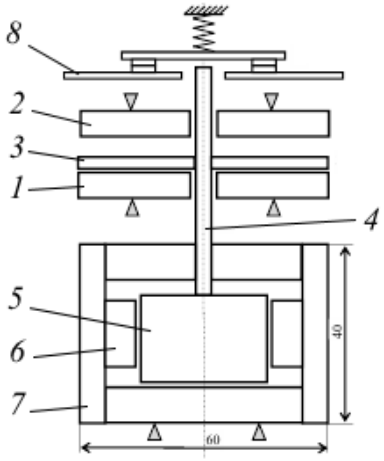


Рисунок 1.17 – Схема комутаційного апарату з індукційно-динамічним приводом і бістабільним магнітним фіксатором: *1*, *2* – котушки приводу; *3* – ЕЯ; *4* – немагнітний шток; *5* – якір фіксатора; *6* – постійні магніти; *7* – нерухома магнітна система; *8* – контактна система

В роботі [82] досліджена математична модель швидкодіючого індукційно-динамічного приводу вимикача з бістабільним фіксатором з двома котушками і постійними магнітами. Математична модель включає розрахунок магнітного поля, електричного кола з урахуванням зміни напруги на

конденсаторі і наведеної в котушках протидії ЕРС, динаміки руху якорів бістабільним фіксатором і приводу з урахуванням зміни маси нестаціонарного електромагнітного поля в неоднорідному нелінійному середовищі з урахуванням постійних магнітів і руху ЕЯ.

На базі ЛІЕП побудовані електромеханічні прискорювачі масивних об’єктів. В рамках європейського проекту під назвою GABRIEL (Sibilski 2014) були проведені інноваційні дослідження систем електромагнітного пуску для великих літаків [84]. Крім того стартові пускові установки використовуються і для багатьох класів БПЛА від мікропланів до великих військових безпілотників [85]. В роботі [86] описано дослідження ЛІЕП електромагнітного типу для пускової установки БПЛА. Перетворювач складається з декількох послідовно розташованих ОІ і циліндричного якоря, який рухається всередині цих обмоток (рис. 1.18). Якір може бути виготовлено з феромагнітного матеріалу або використовувати постійний магніт.

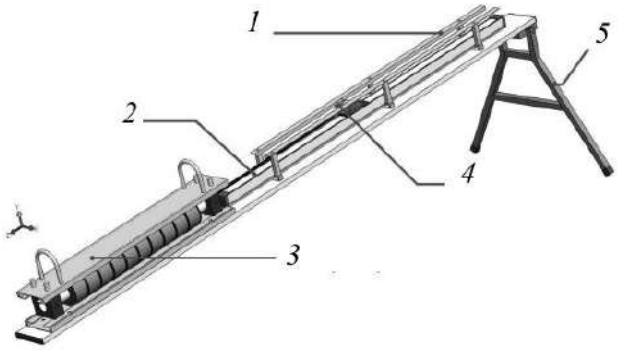


Рисунок 1.18 – Конструкція електромеханічної катапульти для БПЛА:
1 – направляючий апарат; *2* – виконавчий шток; *3* – ЛІЕП; *4* –механізм кріплення БПЛА; *5* – опорна стійка

На основі електромеханічних прискорювачів розробляються системи активного захисту броньованих пристроїв від ворожих об'єктів на підльоті (рис. 1.19) [90].

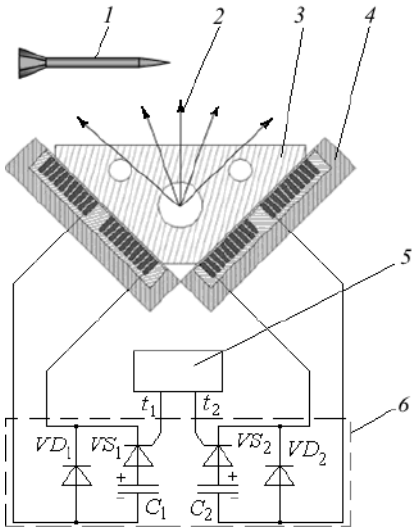


Рисунок 1.19 – Схема активного захисту броньованого об'єкта на основі електромеханічної катапульти

На рис. 1.19 показаний рухомий ворожий об'єкт *1*, напрямок польоту *2* пускового елемента *3*, який електродинамічно відштовхується від нерухомого індуктора *4*. Система містить два індуктора, які розташовані під кутом 90º один до одного, і один електропровідний якір-снаряд. Залежно від часу подачі сигналу τ_1 та τ_2 з блоку управління на керовані ключі VS_1 та VS_2 забезпечується різний час збудження відповідного індуктора, внаслідок чого можна змінювати напрямок польоту якоря-снаряда.

Таким чином, на даний момент в якості ударно-силових та прискорювальних пристроїв найбільш широко використовуються ЛІЕП індукційного, електромагнітного та електродинамічного типу. Серед ефективних застосувань ЛІЕП можна зазначити: ударно-конденсаторне зварювання, штамповка, клепально-складальні роботи, магнітно-імпульсне компактування порошків кераміки, електричні апарати, установки для очищення поверхонь обладнання від відкладень і розвантаження сипучих вантажів з ємностей, сейсмічні джерела, пристрої для збудження пружних коливань у масивних конструкціях, ударні протиобмерзальні системи, пристрої для знищення комп'ютерної інформації, випробувальні установки на ударні навантаження, пускові систекми для БПЛА, електромеханічні прискорювачі оборонного призначення та ін.

РОЗДІЛ 2
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЛІНІЙНОГО ІМПУЛЬСНОГО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Відомо, що при розрахунку ЛІЕП використовується польові, колові та коло-польові методи [91]. Колові методи враховують зосереджені параметри (індуктивність *L*, активний опір *R*, взаємну індуктивність *M* та ін.) активних елементів нерухомої обмотки індуктора (ОІ), яка збуджується від імпульсного джерела з ємнісним накопичувачем енергії (ЄНЕ) та рухомого якоря, який діє на виконавчий елемент (ВЕ) [92]. Колові методи дозволяють оперативно розрахувати параметри ЛІЕП при визначеному характері протікання струмів, наприклад в ЛІЕП електродинамічного типу з котушковим якорем (КЯ).

Польові методи дозволяють розраховувати параметри ЛІЕП з використанням електропровідного (ЕЯ) і феромагнітного якоря (ФЯ) та феромагнітного екрану (ФЕ) [93]. Зазначимо, що в масивному ЕЯ струм індукуються суттєво нерівномірно по об’єму, а в ФЯ та ФЕ індукція магнітного поля нелійно залежить від відповідних струмів. Польові методи потребують значно більшого часу для розрахунку, ніж колові методи. Ця проблема поглиблюється в ЛІЕП, де мають місце швидкоплинні робочі процеси тривалістю декілька мілісекунд. Для вирішення цієї проблеми використовується коло-польові методи розрахунку [94]. Ці методи дозволяють використовувати переваги колових методів (оперативність) і польових методів (врахування нерівномірності індукованого струму в масивному ЕЯ, нелінійні залежності індукції від напруженості магнітного поля *B(H)*, активного опору від температури *R(T)* та ін.).

Зв’язаність процесів і складність визначення характеристик ЛІЕП з одним або декількома якорями різного типу (електропровідний у вигляді масивного диску, котушковий багатовитковий та феромагнітний) обумовлюється наявністю різних взаємопов’язаних явищ електромагнітних, теплових та механічних, які в свою чергу залежать від процесів в зовнішньому

електричному колі з імпульсним джерелом енергії. Імпульсне джерело живлення, яке включає ЄНЕ та напівпровідникові прилади, обумовлює протікання струму в обмотці індуктора та в котушковому якорі. Під дією магнітного поля ОІ в ЕЯ індукуються вихровий струм, який нерівномірно розподілений по його об’єму. А під дією цього магнітного поля на ФЯ нього діють електромагнітні зусилля f_z (ЕМЗ) тяжіння. Взаємодія струмів ОІ зі струмами КЯ або ЕЯ призводить до виникнення електродинамічних зусиль f_z (ЕДЗ) відштовхування.

В ЛІЕП під дією ЕМЗ тяжіння, або ЕДЗ відштовхування під час робочого процесу відповідний якір здійснює переміщення Δz зі швидкістю v_z вздовж осі z, внаслідок чого змінюється магнітний зв'язок між ОІ та якорем. При цьому струм i викликає нагрів відповідних активних елементів, що змінює їх активний опір. На рис. 2.1 приведена схема взаємозв’язків фізичних процесів в ЛІЕП з урахуванням зовнішніх зв’язків.

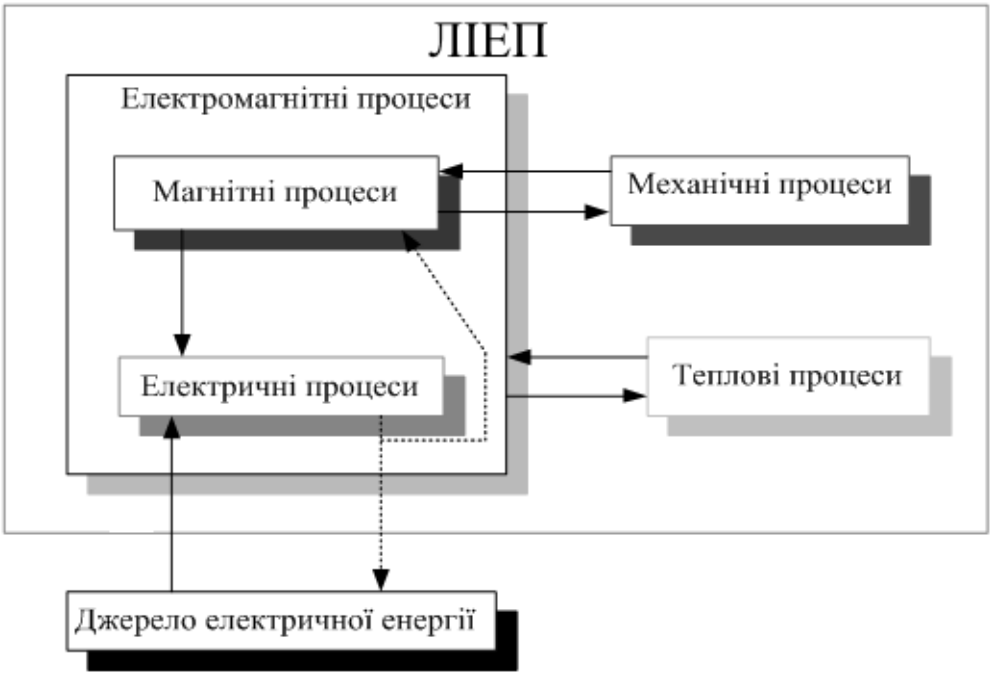


Рисунок 2.1 – Схема взаємозв’язків фізичних процесів в ЛІЕП

Схема відображає коло-польовий зв'язок і виявляє необхідність урахування ряду характеристик фізичних полів, основним з яких являється

електромагнітне поле, і складових елементів, параметри яких залежать від процесів в зовнішньому електричному колі. Таке представлення взаємодії відображає складні зв'язки зовнішнього електричного кола з фізичними полями і процесами у ЛІЕП.

Розглянемо ЛІЕП мультиякірної конфігурації, який включає нерухому ОІ, яка збуджується від ЄНЕ з параметрами напруги U_0 та ємності C_0, рухомі КЯ, ЕЯ та нерухомий ФЕ. На рис. 2.2 зображена схема ЛІЕП мультиякірної конфігурації. На рис. 2.2 показано L_0 – індуктивність кабелів живлення; R_0 – опір кабелів живлення; i_1 – миттєве значення струму ОІ; f_1 – миттєве значення електродинамічної сили, що діє на КЯ; f_2 – миттєве значення електродинамічної сили, що діє на ЕЯ. Точками та хрестиками позначено напрямок протікання струмів в певний момент часу.

Запропонована концепція ЛІЕП може використовуватись в двох режимах: силовому та швидкісному (енергетичному). ЛІЕП силового призначення забезпечує значні силові механічні імпульси по об'єкту впливу при незначному переміщенні якорів. ЛІЕП швидкісного призначення забезпечує значну швидкість якорів на короткій ділянці розгону [95]. На рис. 2.3 представлена конструкція ЛІЕП мультиякірної конфігурації з зазначенням основних геометричних параметрів. Рисунок відображає взаємне розташування елементів конструкції перетворювача.

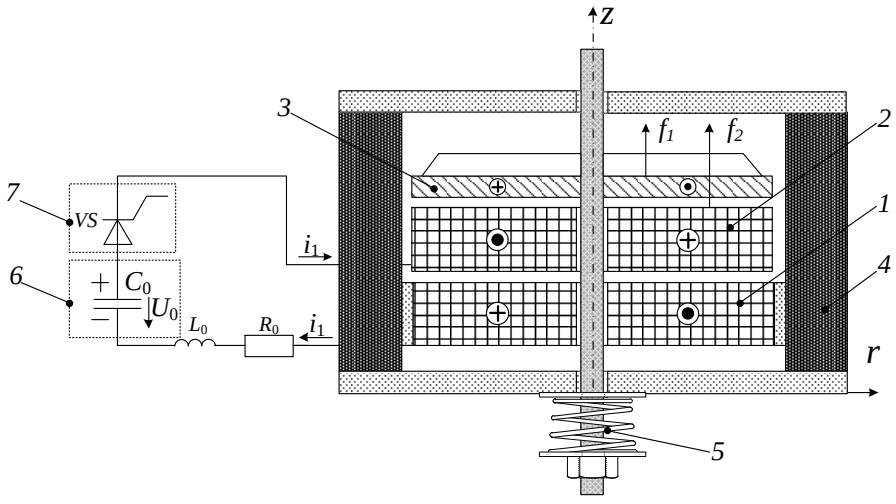


Рисунок 2.2 – Схема ЛІЕП мультиякірної конфігурації: *1* – нерухома ОІ; *2* – КЯ; *3* – ЕЯ; *4* – ФЕ; *5* – зворотня пружина; *6* – ЄНЕ; *7* – напівпровідниковий ключ

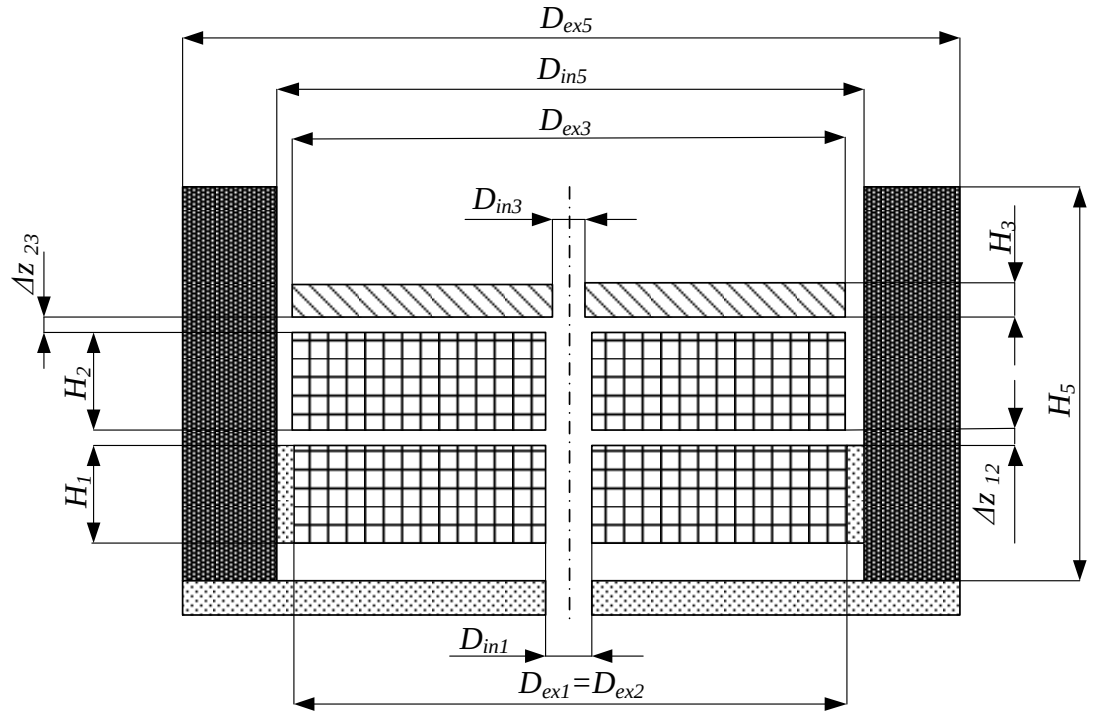


Рисунок 2.3 – Конструктивна схема ЛІЕП мультиякірної конфігурації з позначенням геометричних параметрів

Основними геометричними параметри ЛІЕП мультиякірної конфігурації є: D_{ex1} – зовнішній діаметр ОІ; D_{in1} – внутрішній діаметр ОІ; H_1 – висота ОІ; N_1 – кількість витків ОІ; D_{ex3} – зовнішній діаметр ЕЯ; D_{in3} – внутрішній діаметр ЕЯ; H_3 – висота ЕЯ; m_3 – маса ЕЯ; D_{ex2} – зовнішній діаметр КЯ; D_{in2} – внутрішній діаметр КЯ; H_2 – висота КЯ; N_2 – кількість витків КЯ; m_2 – маса КЯ; D_{ex4} – зовнішній діаметр ФЯ; D_{in4} – внутрішній діаметр ФЯ; H_4 – висота ФЯ; m_4 – маса ФЯ; D_{ex5} – зовнішній діаметр ФЕ; D_{in5} – внутрішній діаметр ФЕ; H_5 – висота ФЕ.

2.1 Постановка задачі та основні припущення

Розглянемо ЛІЕП мультиякірної конфігурації, що включає ОІ, яка збуджується від ЄНЕ, КЯ, ЕЯ, та ФЕ (рис. 2.2). Вважаємо відомими геометричні параметри ЛІЕП мультиякірної конфігурації (рис. 2.3), електричні та магнітні властивості матеріалів (γ – електропровідність та μ – магнітну

проникливість). Вважаємо, що ЛІЕП має дискову конфігурацію, причому рух якорів здійснюється строго по осі z.

Конструктивні елементи ЛІЕП мультиякірної конфігурації мають вигляд торів або циліндрів, що розташовані на одній вісі. Струми в котушках мають лише меридіанний напрям. Активними елементами ЛІЕП є ОІ, КЯ, ЕЯ, ФЯ та ФЕ. Реальний індуктор з обмоткою у вигляді плоскої гвинтової лінії заміщується ідеалізованою обмоткою з співвісними витками. Питома провідність матеріалів γ, магнітна проникливість μ не залежить від координати φ циліндричної системи координат $\{r, \varphi, z\}$, вісь z суміщена з віссю симетрії ЛІЕП (рис. 2.2). Струмами зміщення в діелектрику, що оточує провідники можна знехтувати.

Розрахунок поля, в такому разі, достатньо виконати в меридіанній площині $\varphi = \text{const}$, тому що в інших площинах воно буде ідентичним. На рис. 2.4 зображено меридіанний переріз системи з відповідними позначеннями областей елементів Ω_i та границями Γ_i.

Моделювання нестаціонарного електромеханічного процесу в ЛІЕП мультиякірної конфігурації умовно розділяється на дві задачі:

1. Розв’язання електромагнітної задачі, в якій здійснюється розрахунок електромагнітного поля в ЛІЕП в полярній системі координат $\{r, z, \varphi\}$ при заданому взаємному положенні та швидкості активних елементів. При цьому здійснюється розрахунок електромагнітної сили, що діє на рухомий якір.

2. Розв’язання рівнянь руху, в якій здійснюється розрахунок характеристик механічного процесу при заданому значенні електромагнітної компоненти сили, що діє рухомий якір.

2.1.1 Розрахунок електромагнітних процесів ЛІЕП мультиякірної конфігурації

Внаслідок осьової симетрії ЛІЕП мультиякірної конфігурації, задача розрахунку електромагнітних процесів вирішувалася в осесиметричній

постановці, а саме в циліндричній системі координат для векторного магнітного потенціалу $\vec{A}$, який має φ-компоненту. Для розрахункової області (рис. 2.4) запишемо диференціальні рівняння та необхідні граничні і початкові умови [96].

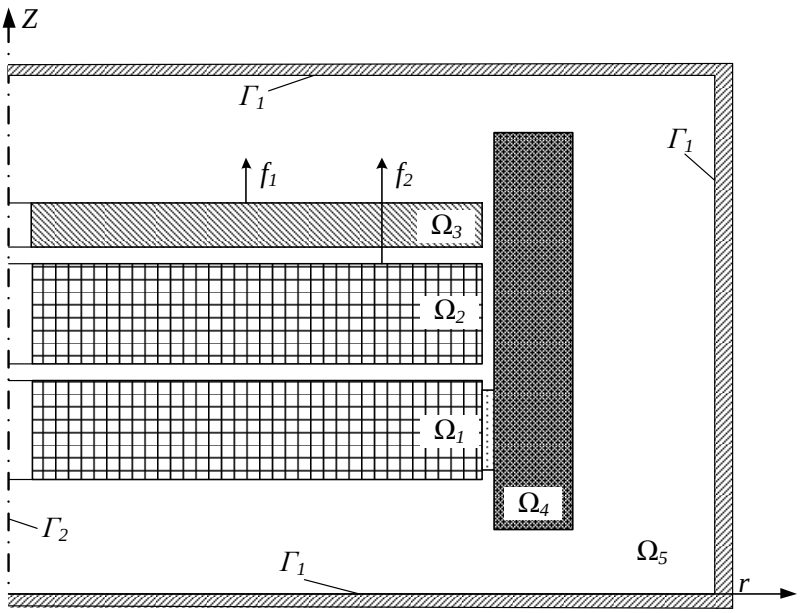


Рисунок 2.4 – Меридіанний переріз ЛІЕП мультиякірної конфігурації:
Ω_1 – область ОІ; Ω_2 – область КЯ; Ω_3 – область ЕЯ; Ω_4 – область ФЕ;
Ω_5 –область повітряного середовища; Γ_1 – внутрішня розрахункова границя; Γ_2 – границя вісі симетрії

Для області Ω_1 запишемо диференційне рівняння, що описує однорідне провідне нерухоме середовище, яким являється обмотка індуктора ЛІЕП:

$$\gamma_1 \frac{\partial \vec{A}_1}{\partial t} + \nabla \times \left(\frac{1}{\mu_1} \cdot \nabla \times \vec{A}_1\right) = \vec{j}_{1ext}, \qquad (2.1)$$

де $\vec{A}_1$ – вектор-потенціал магнітного поля області ОІ; $\vec{j}_{1ext}$ – вектор густини зовнішнього струму ОІ; γ_1 – питома провідність матеріалу ОІ; $\mu_1 = \mu_0$ – магнітна стала.

Диференційне рівняння (2.1) спроектуємо на координатні осі циліндричної системи і отримаємо диференційне рівняння відносно φ-ї складової векторного магнітного потенціалу $A_{1\varphi}$.

$$\gamma_1 \frac{\partial A_{1\varphi}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{1}{\mu_1} \cdot \frac{\partial A_{1\varphi}}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{\mu_1 \cdot r} \cdot \frac{\partial (rA_{1\varphi})}{\partial r}\right) = -j_{1\varphi}(t), \qquad (2.2)$$

де $j_{1\varphi}(t)$ – миттєве значення тангенціальної складової густини зовнішнього струму ОІ; $A_{1\varphi}$ – миттєве значення тангенціальної складової векторного магнітного потенціалу.

Тангенціальну складову густини зовнішнього струму в ОІ $j_{1\varphi}(t)$ розраховуємо за виразом:

$$j_{1\varphi}(t) = \frac{i_1(t) \cdot N_1}{S_1} \cdot k_{31}, \qquad (2.3)$$

де $i_1(t)$ – миттєве значення струму ОІ; N_1 – кількість витків ОІ; S_1 – перетин котушки індуктора; k_{31} – коефіцієнт заповнення ОІ.

Диференційне рівняння (2.2) доповнюється граничними умовами на поверхні:

$$\frac{1}{\mu_0} \mathrm{rot}\vec{A}_1 \times \vec{n} = \frac{1}{\mu_0} \mathrm{rot}\vec{A}_5 \times \vec{n}, \qquad (2.3)$$

$$\mathrm{rot}\vec{A}_1 \cdot \vec{n} = \mathrm{rot}\vec{A}_5 \cdot \vec{n}, \qquad (2.4)$$

де $\vec{A}_1$ – векторний потенціал магнітного поля області ОІ; $\vec{n}$ – одиничний вектор нормалі; $\vec{A}_5$ – векторний потенціал магнітного поля області повітряного середовища.

Початковими умовами:

$$A_{1\varphi}(0) = 0, \tag{2.5}$$

де $A_{1\varphi}(0)$ – початкове значення тангенціальної складової векторного магнітного потенціалу області ОІ.

Для області Ω_2 запишемо диференційне рівняння, що описує однорідне провідне рухоме середовище, яким являється рухомий котушковий якір ЛІЕП:

$$\gamma_2 \frac{\partial \vec{A}_2}{\partial t} + \nabla \times (\frac{1}{\mu_2} \cdot \nabla \times \vec{A}_2) - \gamma_2 \cdot \vec{v}_2 \times \left(\nabla \times \vec{A}_2\right) = \vec{j}_{2ext}, \tag{2.6}$$

де $\vec{A}_2$ – вектор-потенціал магнітного поля області КЯ; $\vec{j}_{2ext}$ – вектор густини зовнішнього струму КЯ; γ_2 – питома провідність матеріалу КЯ; $\mu_2 = \mu_0$ – магнітна стала; $\vec{v}_2(t)$ – вектор швидкості КЯ.

Отримане диференційне рівняння (2.6) спроектуємо на координатні осі циліндричної системи, отримаємо диференційне рівняння відносно тангенціальної складової векторного магнітного потенціалу $A_{2\varphi}$.

$$\gamma_2 \frac{\partial A_{2\varphi}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(\frac{1}{\mu_2} \cdot \frac{\partial A_{2\varphi}}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial r}(\frac{1}{\mu_2 \cdot r} \cdot \frac{\partial (rA_{2\varphi})}{\partial r}) - v_{2z}(t) \cdot \frac{\gamma_2}{\mu_2} \cdot \frac{\partial A_{2\varphi}}{\partial z} = -j_{2\varphi}(t) \tag{2.7}$$

де $A_{2\varphi}$ – миттєве значення тангенціальної складової векторного магнітного потенціалу; $j_{2\varphi}(t)$ – миттєве значення тангенціальної складової густини зовнішнього струму котушкового якоря; $v_{2z}(t)$ – миттєва швидкість котушкового якоря.

Тангенціальну складову густини струмів в КЯ $j_{2\varphi}(t)$ розраховуємо за виразом:

$$j_{2\varphi}(t) = \frac{i_2(t) \cdot N_2}{S_2} \cdot k_{32}, \tag{2.8}$$

де $i_2(t)$ – миттєве значення струму КЯ; N_2 – кількість витків КЯ; S_2 – перетин котушкового якоря; k_{32} – коефіцієнт заповнення КЯ.

Диференційне рівняння (2.7) доповнюється граничними умовами на поверхні:

$$\frac{1}{\mu_0} \mathrm{rot}\vec{A}_2 \times \vec{n} = \frac{1}{\mu_0} \mathrm{rot}\vec{A}_5 \times \vec{n}, \tag{2.9}$$

$$\mathrm{rot}\vec{A}_2 \cdot \vec{n} = \mathrm{rot}\vec{A}_5 \cdot \vec{n}, \tag{2.10}$$

де $\vec{A}_2$ – вектор-потенціал магнітного поля області КЯ; $\vec{n}$ – одиничний вектор нормалі; $\vec{A}_5$ – вектор-потенціал магнітного поля області повітряного середовища.

Початковими умовами:

$$A_{2\varphi}(0) = 0, \tag{2.11}$$

де $A_{2\varphi}(0)$ – початкове значення тангенціальної складової векторного магнітного потенціалу області КЯ.

Для області Ω_3 запишемо диференційне рівняння, що описує однорідне провідне рухоме середовище, яким являється рухомий ЕЯ ЛІЕП:

$$\gamma_3 \frac{\partial \vec{A}_3}{\partial t} + \nabla \times (\frac{1}{\mu_3} \cdot \nabla \times \vec{A}_3) - \gamma_3 \cdot \vec{v}_3 \times \left(\nabla \times \vec{A}_3\right) = 0, \tag{2.12}$$

де $\vec{A}_3$ – вектор-потенціал магнітного поля області ЕЯ; γ_3 – питома провідність матеріалу ЕЯ; $\mu_3 = \mu_0$ – магнітна стала; $\vec{v}_3(t)$ – вектор швидкості ЕЯ.

Отримане диференційне рівняння (2.12) спроектуємо на координатні осі циліндричної системи, отримаємо диференційне рівняння відносно тангенціальної складової векторного магнітного потенціалу $A_{3\varphi}$:

$$\gamma_3 \frac{\partial A_{3\varphi}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{1}{\mu_3} \cdot \frac{\partial A_{3\varphi}}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{\mu_3 \cdot r} \cdot \frac{\partial (rA_{3\varphi})}{\partial r}\right) - v_{z3}(t) \cdot \frac{\gamma_3}{\mu_3} \cdot \frac{\partial A_{3\varphi}}{\partial z} = 0, \qquad (2.13)$$

де $A_{3\varphi}$ – миттєве значення тангенціальної складової векторного магнітного потенціалу; γ_3 – питома провідність матеріалу електропровідного якоря; $v_3(t)$ – миттєва швидкість електропровідного якоря.

Диференційне рівняння (2.13) доповнюється граничними умовами на поверхні:

$$\frac{1}{\mu_0} \operatorname{rot}\vec{A}_3 \times \vec{n} = \frac{1}{\mu_0} \operatorname{rot}\vec{A}_5 \times \vec{n}, \qquad (2.14)$$

$$\operatorname{rot}\vec{A}_3 \cdot \vec{n} = \operatorname{rot}\vec{A}_5 \cdot \vec{n}, \qquad (2.15)$$

де $\vec{A}_3$ – вектор-потенціал магнітного поля області ЕЯ; $\vec{n}$ – одиничний вектор нормалі; $\vec{A}_5$ – векторний потенціал магнітного поля області повітряного середовища,

та початковими умовами:

$$A_{3\varphi}(0) = 0, \qquad (2.16)$$

де $A_{3\varphi}(0)$ – початкове значення тангенціальної складової векторного магнітного потенціалу області ЕЯ.

Для області Ω_4 запишемо диференційне рівняння, що описує нерухомий феромагнітний екран ЛІЕП:

$$\gamma_4 \frac{\partial \vec{A}_4}{\partial t} + \nabla \times (\frac{1}{\mu_4} \cdot \nabla \times \vec{A}_4) = 0, \qquad (2.17)$$

де $\vec{A}_4$ – вектор-потенціал магнітного поля області ФЕ; γ_4 – питома провідність матеріалу ФЕ; μ_4 – магнітна проникність феромагнетика.

Отримане диференційне рівняння (2.17) спроектуємо на координатні осі циліндричної системи, отримаємо диференційне рівняння відносно тангенціальної складової векторного магнітного потенціалу $A_{4\varphi}$:

$$\gamma_4 \frac{\partial A_{4\varphi}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(\frac{1}{\mu_4} \cdot \frac{\partial A_{4\varphi}}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial r}(\frac{1}{\mu_4 \cdot r} \cdot \frac{\partial (rA_{4\varphi})}{\partial r}) = 0, \qquad (2.18)$$

де $A_{4\varphi}$ – миттєве значення тангенціальної складової векторного магнітного потенціалу; γ_4 –питома провідність феромагнітного екрану.

Диференційне рівняння (2.18) доповнюється граничними умовами на поверхні:

$$\frac{1}{\mu_4} \mathrm{rot}\vec{A}_4 \times \vec{n} = \frac{1}{\mu_5} \mathrm{rot}\vec{A}_5 \times \vec{n}, \qquad (2.19)$$

$$\mathrm{rot}\vec{A}_4 \cdot \vec{n} = \mathrm{rot}\vec{A}_5 \cdot \vec{n}, \qquad (2.20)$$

де $\vec{A}_4$ – вектор-потенціал магнітного поля області ФЕ; $\vec{n}$ – одиничний вектор, вектор нормалі; $\vec{A}_5$ – векторний потенціал магнітного поля області повітряного середовища,

та початковими умовами:

$$A_{4\varphi}(0) = 0, \tag{2.21}$$

де $A_{4\varphi}(0)$ – початкове значення тангенціальної складової векторного магнітного потенціалу області ФЯ.

Для області Ω_5 запишемо диференційне рівняння, що описує середовище (повітряний простір) в якому розміщено індуктор, котушковий якір, феромагнітний екран та електропровідний якір ЛІЕП мультиякірної конфігурації:

$$\gamma_5 \frac{\partial \vec{A}_5}{\partial t} + \nabla \times (\frac{1}{\mu_5} \cdot \nabla \times \vec{A}_5) = 0, \tag{2.22}$$

де $\vec{A}_5$ – вектор-потенціал магнітного поля області повітряного середовища; $\mu_5 = \mu_0$ – магнітна стала.

Отримане диференційне рівняння (2.22) спроектуємо на координатні осі циліндричної системи, отримаємо диференційне рівняння відносно тангенціальної складової векторного магнітного потенціалу $A_{5\varphi}$:

$$\frac{\partial}{\partial z}(\frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\partial A_{5\varphi}}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial r}(\frac{1}{\mu_0 \cdot r} \cdot \frac{\partial (rA_{5\varphi})}{\partial r}) = 0 \ . \tag{2.23}$$

Диференційне рівняння (2.23) доповнюється початковими умовами:

$$A_{5\varphi}(0) = 0 \tag{2.24}$$

де $A_{5\varphi}(0)$ – початкове значення тангенціальної складової векторного магнітного потенціалу області повітряного середовища.

Запишемо граничні умови на внутрішній розрахунковій границі розрахункової області Γ_1, які забезпечують магнітну ізоляцію:

$$\vec{A} = 0\,. \tag{2.25}$$

Граничні умови на осі симетрії Γ_2 розрахункової області:

$$\vec{n} \cdot \vec{A} = 0\,. \tag{2.26}$$

Розрахунок складових вектора та модуля індукції магнітного поля $\vec{B}$ виконаємо за наступними виразами:

$$B_r = -\frac{\partial A_\varphi}{\partial z} \tag{2.28}$$

$$B_z = \frac{1}{r}\frac{\partial (rA_\varphi)}{\partial r} \tag{2.29}$$

$$B = \sqrt{B_r^2 + B_z^2} \tag{2.30}$$

Для розрахунку сили, що діє на відповідний якір ЛІЕП, використаємо підхід заснований на тензорі натягу Максвелла, величина якого описується виразом:

$$\vec{f} = \oint_S 2\pi r \vec{T} ds = \oint_S 2\pi r (\vec{n} T_r + \vec{\tau} T_z) ds\,, \tag{2.31}$$

Компоненти та модуль сили розрахуємо за виразами:

$$f_r = \oint_S 2\pi r T_r ds = \frac{1}{\mu_0}\oint_S \pi r (B_r^2 - B_z^2) ds\,, \tag{2.32}$$

$$f_z = \oint_S 2\pi r T_z ds = \frac{1}{\mu_0}\oint_S 2\pi r (B_r \cdot B_z) ds\,, \tag{2.33}$$

$$f = \sqrt{f_r^2 + f_z^2} \tag{2.34}$$

2.1.2 Електрична схема ЛІЕП мультиякірної конфігурації

Для електричної схеми ЛІЕП мультиякірної конфігурації, яка включає КЯ і ЕЯ розглянемо два варіанти з'єднання котушкового якоря з котушкою індуктора: послідовне та паралельне. Схема ЛІЕП з послідовним з'єднанням ОІ з рухомим КЯ зображена на рис. 2.5.

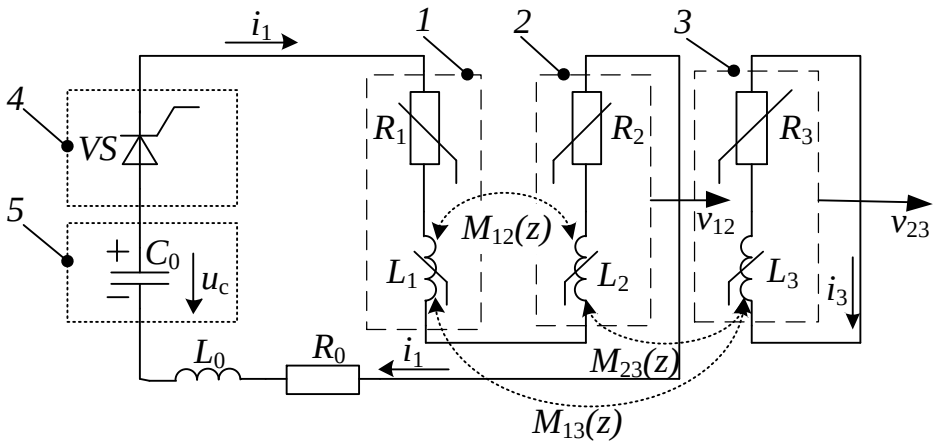


Рисунок 2.5 – Електрична схема ЛІЕП мультиякірної конфігурації при послідовному з'єднанні обмотки індуктора з рухомим котушковим якорем та електропровідним якорем: *1* – ОІ; *2* – КЯ; *3* – ЕЯ; *4* – напівпровідниковий ключ; 5 – ЄНЕ

На рис. 2.5 позначено: i_1 – миттєве значення струму ОІ; R_1 – опір ОІ; R_2 – опір обмотки КЯ; R_3 – опір ЕЯ; L_1 – індуктивність ОІ; L_2 – індуктивність КЯ; L_3 – індуктивність ЕЯ; i_2 – миттєве значення струму КЯ; i_3 – миттєве значення струму ЕЯ; $M_{12}(z)$ – взаємна індуктивність ОІ та КЯ; $M_{23}(z)$ – взаємна індуктивність КЯ та ЕЯ; $M_{13}(z)$ – взаємна індуктивність ОІ та ЕЯ; L_0 – індуктивність кабелів живлення; R_0 – опір кабелів живлення; v_{12} – швидкість КЯ відносно ОІ; v_{23} – швидкість ЕЯ відносно КЯ.

Для електричної схеми на рис. 2.5 за другим законом Кірхгофа запишемо систему рівнянь, яка описує електричний стан схеми [97]:

$$\begin{cases} \dfrac{d\psi_1}{dt} + \dfrac{d\psi_2}{dt} + L_0 \dfrac{di_1}{dt} + i_1(R_0 + R_1 + R_2) + u_c = 0 \\ \dfrac{d\psi_3}{dt} + i_3 R_3 = 0 \\ \dfrac{du_c}{dt} = \dfrac{i_1}{C_0} \end{cases} \tag{2.35}$$

де Ψ_1 – магнітне потокозчеплення ОІ; Ψ_2 – магнітне потокозчеплення КЯ; Ψ_3 – магнітне потокозчеплення ЕЯ; L_0 – індуктивність кабелів живлення; R_0 – опір кабелів живлення; $R_1 \equiv R_1(T_1)$ – опір ОІ; $R_2 \equiv R_2(T_2)$ – опір КЯ; $R_3 \equiv R_3(T_3)$ – опір ЕЯ; i_1 – миттєве значення струму ОІ; $i_2 = i_1$ – миттєве значення струму КЯ; i_3 – миттєве значення струму ЕЯ; u_c – миттєве значення напруги ЄНЕ; C_0 – ємність ЄНЕ.

Магнітні потокозчеплення для ОІ та ЕЯ ЛІЕП мультиякірної конфігурації при послідовному з'єднанні обмотки індуктора з рухомим котушковим якорем запишемо наступним чином:

$$\frac{d\psi_1(i_1, i_3, z_2, z_3)}{dt} = \frac{\partial\psi_1}{\partial z_2}\frac{dz_2}{dt} + \frac{\partial\psi_1}{\partial z_3}\frac{dz_3}{dt} + \frac{\partial\psi_1}{\partial i_1}\frac{di_1}{dt} + \frac{\partial\psi_1}{\partial i_3}\frac{di_3}{dt}, \tag{2.36}$$

$$\frac{d\psi_3(i_1, i_3, z_2, z_3)}{dt} = \frac{\partial\psi_3}{\partial z_2}\frac{dz_2}{dt} + \frac{\partial\psi_3}{\partial z_3}\frac{dz_3}{dt} + \frac{\partial\psi_3}{\partial i_1}\frac{di_1}{dt} + \frac{\partial\psi_3}{\partial i_3}\frac{di_3}{dt}, \tag{2.37}$$

де z_2 – переміщення КЯ; z_3 – переміщення ЕЯ.

З виразів (2.36 – 2.37) виділимо диференціальні власні та взаємні індуктивності активних елементів:

$$L_1 = \frac{\partial\psi_1}{\partial i_1};\ M_{13} = \frac{\partial\psi_1}{\partial i_3};\ L_3 = \frac{\partial\psi_3}{\partial i_3}. \tag{2.38}$$

Також з виразів (2.36 – 2.37) виділимо коефіцієнти, які можливо назвати умовно індуктивностями руху:

$$L_{v12}=\frac{\partial\psi_1}{\partial z_2};\ L_{v13}=\frac{\partial\psi_1}{\partial z_3};\ L_{v32}=\frac{\partial\psi_3}{\partial z_2};\ L_{v33}=\frac{\partial\psi_3}{\partial z_3}. \qquad (2.39)$$

З урахуванням цих виразів запишемо ЕРС руху:

$$e_{v12}=L_{v12}v_{z2};\ e_{v13}=L_{v13}v_{z3};\ e_{v32}=L_{v32}v_{z2};\ e_{v33}=L_{v33}v_{z3}. \qquad (2.40)$$

Врахуємо падіння напруги на активних елементах ЛІЕП:

$$u_{L_0}=L_0\frac{di_1}{dt};\ u_{R_0}=i_1R_0;\ u_{R_1}=i_1R_1;\ u_{R_2}=i_1R_2;\ u_{R_3}=i_3R_3, \qquad (2.41)$$

Для ОІ, КЯ та ЕЯ ЛІЕП мультиякірної конфігурації розрахунок магнітних потокозчеплень виконуємо за виразами:

$$\psi_1=N_1\Phi_1=N_1\cdot\int_{S_1}\vec{B}_1d\vec{s}=N_1\cdot\int_{S_1}\mathrm{rot}\vec{A}_1d\vec{s}=2\pi\frac{N_1}{S_1}\cdot\int_{S_1}rA_{1\varphi}drdz, \qquad (2.42)$$

$$\psi_2=N_2\Phi_2=N_2\cdot\int_{S_2}\vec{B}_2d\vec{s}=N_2\cdot\int_{S_2}\mathrm{rot}\vec{A}_2d\vec{s}=2\pi\frac{N_2}{S_2}\cdot\int_{S_2}rA_{2\varphi}drdz, \qquad (2.43)$$

$$\psi_3=N_3\Phi_3=N_3\cdot\int_{S_3}\vec{B}_3d\vec{s}=N_3\cdot\int_{S_3}\mathrm{rot}\vec{A}_3d\vec{s}=2\pi\frac{N_3}{S_3}\cdot\int_{S_3}rA_{3\varphi}drdz, \qquad (2.44)$$

де N_1 – кількість витків ОІ; N_2 – кількість витків КЯ; N_3 – кількість витків ЕЯ; Φ_1 – магнітний потік ОІ; Φ_2 – магнітний потік КЯ; Φ_3 – магнітний потік ЕЯ.

Отримані вирази для потокозчеплень (2.42 – 2.44) підставимо в систему рівнянь (2.35) та отримаємо систему рівнянь, яка описує електричні та магнітні зв’язки між активними елементами ЛІЕП (рис. 2.5):

$$\begin{cases} 2\pi\dfrac{N_1}{S_1}\cdot\int\limits_{S_1}\dfrac{drA_{1\varphi}}{dt}drdz+2\pi\dfrac{N_2}{S_2}\cdot\int\limits_{S_2}\dfrac{drA_{2\varphi}}{dt}drdz+L_0\dfrac{di_1}{dt}+i_1(R_1+R_2)+u_c=0 \\ 2\pi\dfrac{N_3}{S_3}\cdot\int\limits_{S_3}\dfrac{drA_{3\varphi}}{dt}drdz+i_3R_3=0 \\ \dfrac{du_c}{dt}=\dfrac{i_1}{C_0} \end{cases} \qquad (2.45)$$

Система диференціальних рівнянь (2.45) доповнюється початковими умовами:

$$i_1(0)=0;\ i_2(0)=0;\ i_3(0)=0;A_{1\varphi}(0)=0;\ A_{2\varphi}(0)=0;\ A_{3\varphi}(0)=0. \qquad (2.46)$$

Розглянемо ЛІЕП мультиякірної конфігурації, який включає КЯ і ЕЯ при паралельному з’єднанні нерухомої ОІ з рухомим КЯ (рис. 2.6):

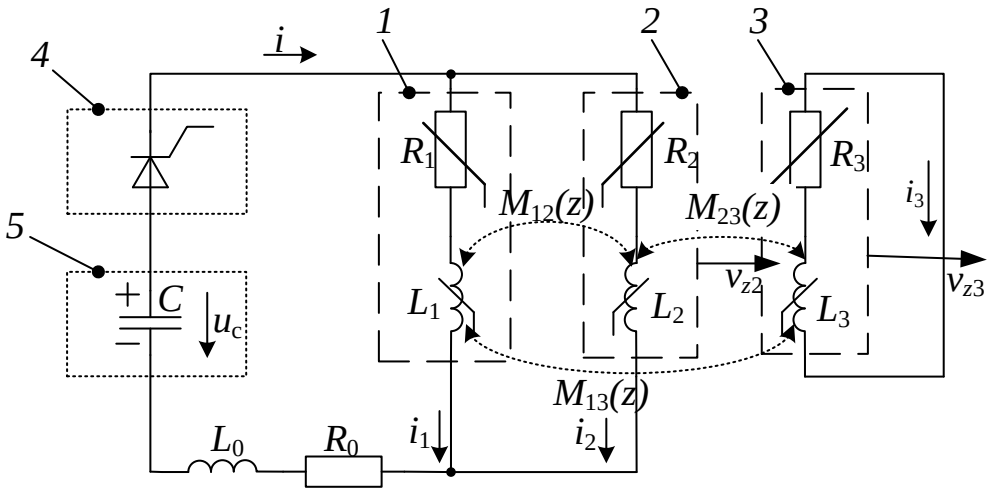


Рисунок 2.6 – Електрична схема ЛІЕП мультиякірної конфігурації при паралельному з’єднанні ОІ індуктора з рухомим КЯ: *1* – ОІ; *2* – КЯ; *3* – ЕЯ; *4* – напівпровідниковий ключ; *5* – ЄНЕ

Для електричної схеми (рис. 2.6) за законами Кірхгофа запишемо систему рівнянь, яка описує електричний стан ЛІЕП мультиякірної конфігурації при паралельному з’єднанні ОІ індуктора з рухомим КЯ:

$$\begin{cases} \dfrac{d\psi_1}{dt} + L_0 \dfrac{di}{dt} + R_0 i + i_1 R_1 + u_C = 0 \\ \dfrac{d\psi_2}{dt} + L_0 \dfrac{di}{dt} + R_0 i + i_2 R_2 + u_C = 0 \\ \dfrac{d\psi_3}{dt} + i_3 R_3 = 0 \\ \dfrac{du_c}{dt} = \dfrac{i}{C_0} \\ i = i_1 + i_2 \end{cases} \tag{2.47}$$

де i – миттєве значення струму ЄНЕ.

Магнітні потокозчеплення для ЛІЕП мультиякірної конфігурації, при паралельному з'єднанні ОІ та КЯ запишемо наступним чином:

$$\frac{d\psi_1(i_1, i_2, i_3, z_2, z_3)}{dt} = \frac{\partial\psi_1}{\partial z_2}\frac{dz_2}{dt} + \frac{\partial\psi_1}{\partial z_3}\frac{dz_3}{dt} + \frac{\partial\psi_1}{\partial i_1}\frac{di_1}{dt} + \frac{\partial\psi_1}{\partial i_2}\frac{di_2}{dt} + \frac{\partial\psi_1}{\partial i_3}\frac{di_3}{dt}, \tag{2.48}$$

$$\frac{d\psi_2(i_1, i_2, i_3, z_2, z_3)}{dt} = \frac{\partial\psi_2}{\partial z_2}\frac{dz_2}{dt} + \frac{\partial\psi_2}{\partial z_3}\frac{dz_3}{dt} + \frac{\partial\psi_2}{\partial i_1}\frac{di_1}{dt} + \frac{\partial\psi_2}{\partial i_2}\frac{di_2}{dt} + \frac{\partial\psi_2}{\partial i_3}\frac{di_3}{dt}, \tag{2.49}$$

$$\frac{d\psi_3(i_1, i_2, i_3, z_2, z_3)}{dt} = \frac{\partial\psi_3}{\partial z_2}\frac{dz_2}{dt} + \frac{\partial\psi_3}{\partial z_3}\frac{dz_3}{dt} + \frac{\partial\psi_3}{\partial i_1}\frac{di_1}{dt} + \frac{\partial\psi_3}{\partial i_2}\frac{di_2}{dt} + \frac{\partial\psi_3}{\partial i_3}\frac{di_3}{dt}, \tag{2.50}$$

З виразів (2.48 – 2.50) виділимо диференціальні власні та взаємні індуктивності котушок:

$$L_1 = \frac{\partial\psi_1}{\partial i_1};\ L_2 = \frac{\partial\psi_2}{\partial i_2};\ L_3 = \frac{\partial\psi_3}{\partial i_3};\ M_{12} = \frac{\partial\psi_1}{\partial i_2};\ M_{13} = \frac{\partial\psi_1}{\partial i_3};$$

$$M_{21} = \frac{\partial\psi_2}{\partial i_1};\ M_{23} = \frac{\partial\psi_2}{\partial i_3};\ M_{31} = \frac{\partial\psi_3}{\partial i_1};\ M_{32} = \frac{\partial\psi_3}{\partial i_2}. \tag{2.51}$$

А також коефіцієнти які можливо назвати умовно індуктивностями руху:

$$L_{v12} = \frac{\partial\psi_1}{\partial z_2};\ L_{v13} = \frac{\partial\psi_1}{\partial z_3};\ L_{v22} = \frac{\partial\psi_2}{\partial z_2};\ L_{v23} = \frac{\partial\psi_2}{\partial z_3};$$

$$L_{v32} = \frac{\partial \psi_3}{\partial z_2};\ L_{v33} = \frac{\partial \psi_3}{\partial z_3}. \tag{2.52}$$

З урахуванням чого ЕРС руху запишемо наступним чином:

$$e_{v12} = L_{v12} v_{z2};\ e_{v13} = L_{v13} v_{z3};\ e_{v22} = L_{v22} v_{z2};\ e_{v22} = L_{v22} v_{z2};$$
$$e_{v23} = L_{v23} v_{z3};\ e_{v32} = L_{v32} v_{z2};\ e_{v33} = L_{v33} v_{z3}. \tag{2.53}$$

Також врахуємо падіння напруги на елементах електричного кола:

$$u_{L_0} = L_0 \frac{d(i_1 + i_2)}{dt};\ u_{R_0} = (i_1 + i_2) R_0;\ u_{R_1} = i_1 R_1;$$
$$u_{R_2} = i_2 R_2;\ u_{R_3} = i_3 R_3. \tag{2.54}$$

Отримані вирази для потокозчеплень (2.48 – 2.50) підставимо в систему рівнянь (2.47) та отримаємо систему рівнянь, яка описує електричні та магнітні зв’язки між елементами електричної схеми рис. 2.6.

$$\begin{cases} 2\pi \frac{N_1}{S_1} \cdot \int\limits_{S_1} \frac{dA_{1\varphi}}{dt} drdz + L_0 \frac{di}{dt} + R_0 i + i_1 R_1 + u_C = 0 \\ 2\pi \frac{N_2}{S_2} \cdot \int\limits_{S_2} \frac{dA_{2\varphi}}{dt} drdz + L_0 \frac{di}{dt} + R_0 i + i_2 R_2 + u_C = 0 \\ 2\pi \frac{N_3}{S_3} \cdot \int\limits_{S_3} \frac{dA_{3\varphi}}{dt} drdz + i_3 R_3 = 0 \\ \frac{du_c}{dt} = \frac{i}{C_0} \\ i = i_1 + i_2 \end{cases} \tag{2.55}$$

Система диференціальних рівнянь (2.55) доповнюється початковими умовами:

$$i\ (0)=0;\ i_1(0)=0;\ i_2(0)=0;\ i_3(0)=0;\ u_c(0)=U_0;$$

$$A_{1\varphi}(0)=0;\ A_{2\varphi}(0)=0;\ A_{3\varphi}(0)=0. \qquad (2.56)$$

2.1.3 Розрахунок механічних та теплових процесів ЛІЕП

Для розрахунку механічних процесів ЛІЕП мультиякірної конфігурації запишемо систему рівнянь, яка описує механічні зв'язки між рухомими елементами конструкції.

$$\begin{cases} (m_3+m_e)\dfrac{dv_3(t)}{dt} = f_3(t) - K_{mp}\cdot v_3(t) \\ \dfrac{dz_3(t)}{dt} = v_3(t) \\ (m_3+m_2+m_e)\dfrac{dv_2(t)}{dt} = f_2(t) - K_{mp}\cdot(v_3(t)+v_2(t)) - K_B\cdot(v_3(t)+v_2(t))^2 - K_P\cdot(z_3(t)+z_2(t)) \\ \dfrac{dz_3(t)}{dt} = v_3(t) \end{cases} \qquad (2.57)$$

де m_2 – маса КЯ; m_3 – маса ЕЯ; m_e – маса виконавчого елементу; $v_3(t)$ – миттєва швидкість ЕЯ; $v_2(t)$ – миттєва швидкість КЯ; $z_3(t)$ – миттєве переміщення ЕЯ; $z_2(t)$ – миттєве переміщення КЯ; $f_2(t)$ – миттєве значення електродинамічної сили КЯ; $f_3(t)$ – миттєве значення електродинамічної сили ЕЯ; K_{mp} – коефіцієнт динамічного тертя; K_B – коефіцієнт аеродинамічного опру; K_P – коефіцієнт пружності зворотнього елементу (пружини).

Систему рівнянь (2.57) доповнюють початкові умови:

$$v_3(0)=0;\ v_2(0)=0;\ z_3(0)=0;\ z_2(0)=0, \qquad (2.58)$$

Для визначення температури активних елементів обмотки індуктора, котушкового якоря та електропровідного якоря, що мають осьову симетрію, використовується польова модель. Польова модель в циліндричній системі координат дозволяє на кожному часовому кроці врахувати просторовий розподіл температур T_n в n-их активних елементах ЛІЕП. Теплові процеси в активних елементах ЛІЕП можна описати за допомогою рівняння:

$$c_n(T)\cdot\gamma_n\frac{\partial T_n}{\partial t}=\lambda_n(T)(\frac{\partial^2 T_n}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial T_n}{\partial r}+\frac{\partial^2 T_n}{\partial z^2})+j_n^2(t)\cdot k_n\cdot\rho_n(T), \qquad (2.59)$$

де n = 1, 2, 3 – індекси обмотки індуктора, котушкового якоря, електропровідного якоря; $c_n(T)$ – усереднена питома теплоємність n-го активного елементу; γ_n – усереднена щільність матеріалу n-го активного елементу; $j_n(t)$ – густина струму n-го активного елементу; $\lambda_n(T)$ – коефіцієнт теплопровідності n-го активного елементу; k_n – коефіцієнт заповнення ОІ або КЯ; $\rho_n(T)$ – питомий опір n-го активного елементу.

На охолоджуваних поверхнях ξ активних елементів система рівнянь (2.59) доповнюється граничними умовами третього роду, що описують процес тепловіддачі:

$$-\frac{\partial T_\xi}{\partial n}=\frac{\alpha}{\lambda_n}(T_\xi-T_0) \qquad (2.60)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі; n – нормаль до поверхні.

На осі симетрії ЛІЕП система рівнянь (2.59) доповнюється граничними умовами другого роду:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_\xi=0. \qquad (2.61)$$

2.2 Реалізація комп’ютерної моделі ЛІЕП

Для реалізації математичної моделі використовується система диференціальних рівнянь в часткових похідних щодо просторових і часових змінних. Для цього застосовано програмний пакет Comsol Multiphysics 5.3, який дозволяє розраховувати взаємопов'язані польові задачі, які одночасно протікають і описують різні фізичні процеси в ЛІЕП [98].

Структурно Comsol Multiphysics складається з ряду програмних модулів (електромагнетизм, тепломасоперенос, структурна механіка та інші), в яких запрограмовані диференціальні рівняння в часткових похідних і містяться постійні величини, характерні для відповідних фізичних процесів. Для вирішення диференціальних рівнянь передбачений вибір чисельних методів математичного аналізу і метод кінцевих елементів. Коефіцієнти диференціальних рівнянь в часткових похідних задаються у вигляді фізичних величин, наприклад, електропровідність, щільність струму, магнітна проникність, щільність і теплопровідність матеріалів і т.п. в залежності від відповідного розділу фізичної моделі. Для вирішення систем алгебраїчних рівнянь використовуються як прямі методи (SPOOLES – sparse object oriented linear equations solver; PARDISO – parallel sparse direct solver; MUMPS), так і ітераційні методи (GMRES – generalized minimum residual iterative method; FGMRES flexible generalized minimum residual method; BiCGStad Biconjugate gradient stabilized iterative method; Conjugate gradients method) [99]. На рис. 2.7 представлений загальний алгоритм моделювання процесів в ЛІЕП.

Виділимо основні фізичні процеси, що виникають при роботі ЛІЕП. Це електричні, електромагнітні, теплові та механічні, а також газодинамічні процеси, які проявляються при швидкому переміщенні якоря в умовах навколишнього середовища. Для зазначених процесів складені відповідні математичні моделі у вигляді системи диференціальних рівнянь в часткових похідних на основі фундаментальних законів відповідних процесів для електромагнітних процесів рівняння Максвелла. Для вирішення системи диференціальних рівнянь застосовано один або кілька прямих або ітераційних методів розв'язання залежно від особливостей поставленого завдання.

Математична модель ЛІЕП реалізується з використанням методу скінченних елементів при обліку всіх взаємозв'язків між фізичними процесами. При цьому здійснюється обмін даних між процесами, виділення розрахункових областей для кожної фізичної задачі за умови узгодженості сіткового розбиття для всіх задач. Чисельні розрахунки враховують вихідні дані, наприклад,

характеристики матеріалів і нелінійні залежності для фізичних задач. За результатами розрахунку виконується оцінка похибки отриманих результатів з наступним уточненням вихідних даних і взаємозв'язків між фізичними завданнями. Якщо похибки перевищують задані величини, здійснюється повторний розрахунок з уточненими даними.

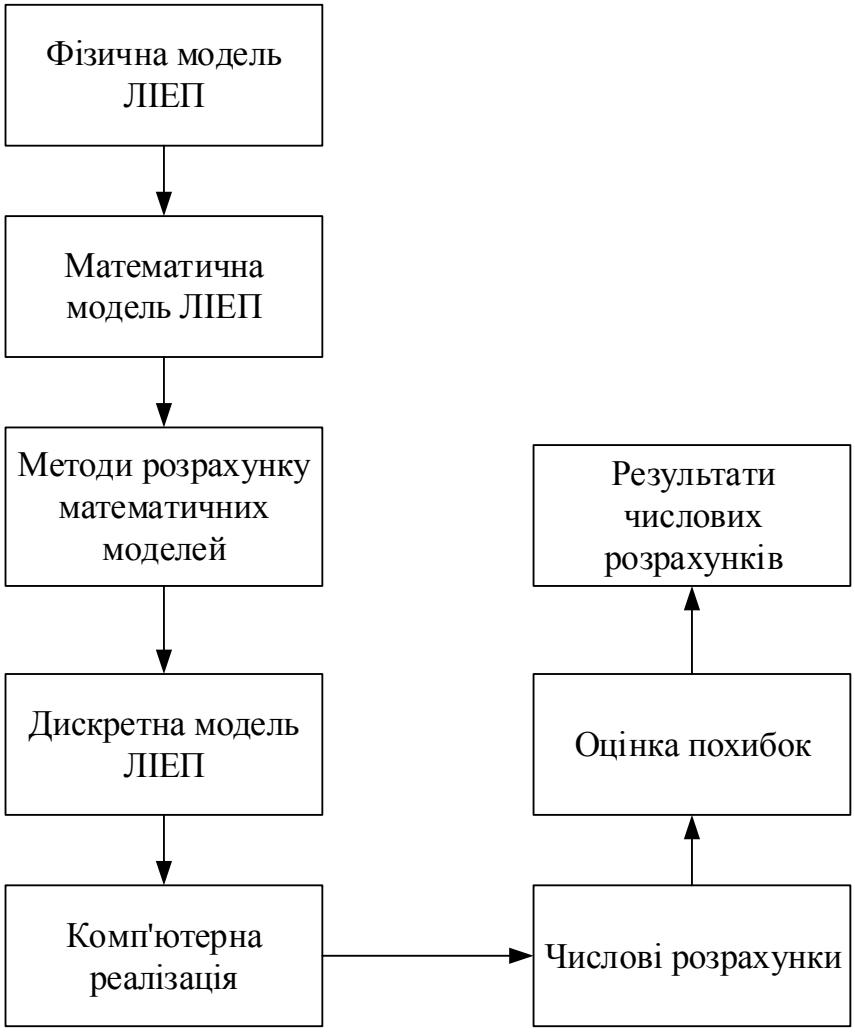


Рисунок 2.7 – Загальний алгоритм моделювання процесів ЛІЕП

На рис. 2.8 представлена блок-схема і етапи реалізації мультифізичного моделювання ЛІЕП в програмному пакеті COMSOL Multiphysics 5.3.

Моделювання виконується в наступній послідовності:

– вибираються необхідні модулі фізики («Magnetic fields (mf)», «Electrical circuit (cir)», «Heat transfer in solid (ht)», «Fluid structure interaction (fsi)»), розмірності задачі (2-D), тип моделі (time-dependent) і методи розрахунку;

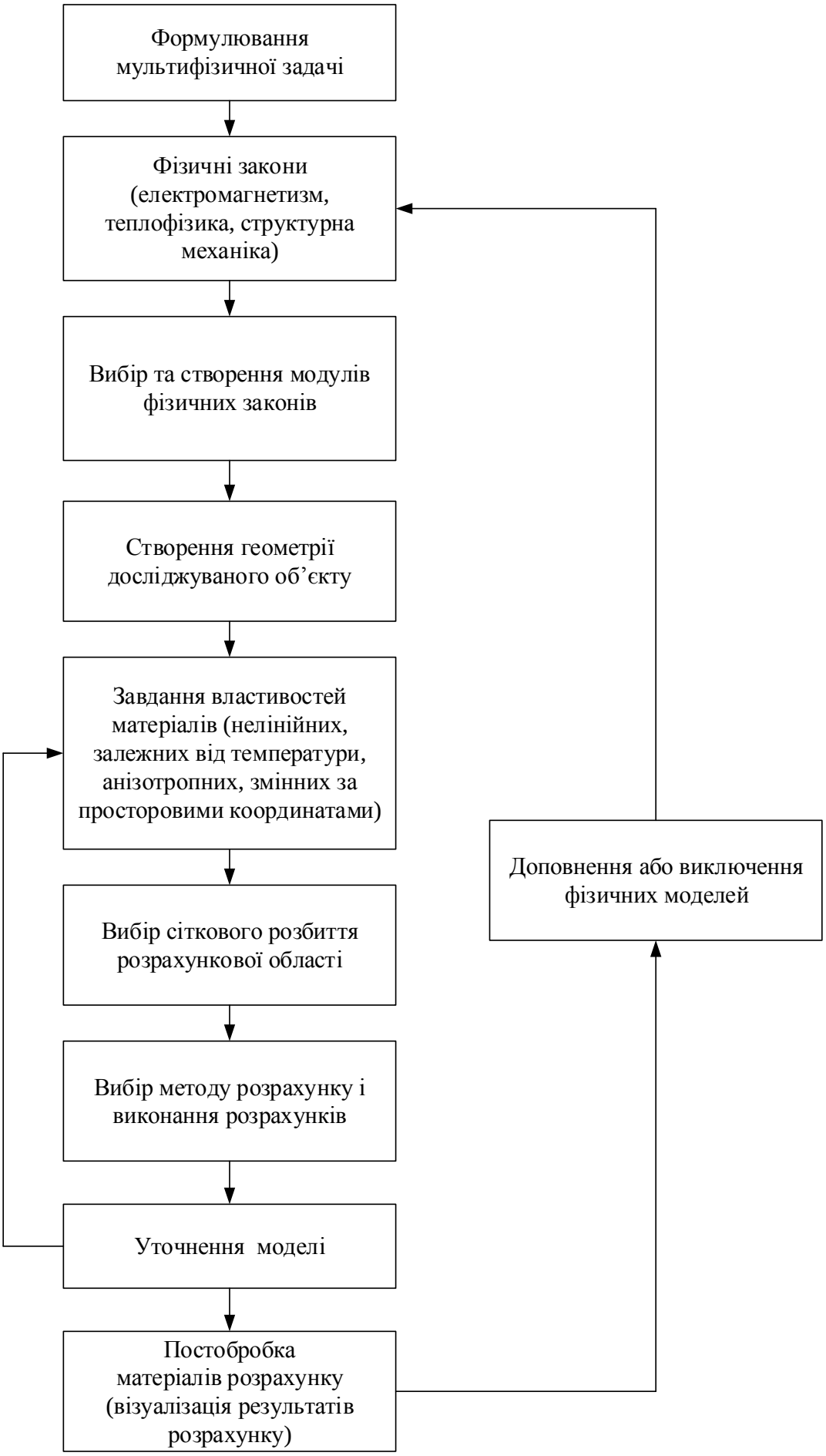


Рисунок 2.8 – Основні етапи реалізації мультифізичного моделювання ЛІЕП

– формується геометрія ЛІЕП і визначаються розрахункові області для обраних фізичних задач;

– задаються вихідні дані у вигляді постійних величин і функцій, що описують взаємозв'язок між параметрами, наприклад, залежність питомого опору від температури для електропровідного елементу, залежність індукції від напруженості магнітного поля для феромагнітного елементу;

– задаються початкові і граничні умови розглянутих фізичних задач;

– виконується дискретизація розрахункових областей з урахуванням геометричної моделі ЛІЕП;

– обираються методи вирішення розглянутих завдань, як правило, MUMPS, PARDISO і проводяться чисельні розрахунки;

– результати розрахунку представляються в чисельному або графічному вигляді.

Були розроблені двомірні 2D математичні моделі ЛІЕП в програмному пакеті COMSOL Multiphysics 5.3. Розрахункова область моделі представляла собою циліндр з радіусом, величина якого більше, ніж в 3 рази перевищувала радіус найбільш віддаленого елемента ЛІЕП в радіальному напрямку від осі *z*. Висота розрахункового циліндра більше, ніж в 8 разів перевищувала найбільшу висоту елементів ЛІЕП (рис. 2.9). Це дозволяло домогтися необхідної точності при прийнятному часу розрахунку, вважаючи границю розрахунку умовно нескінченою.

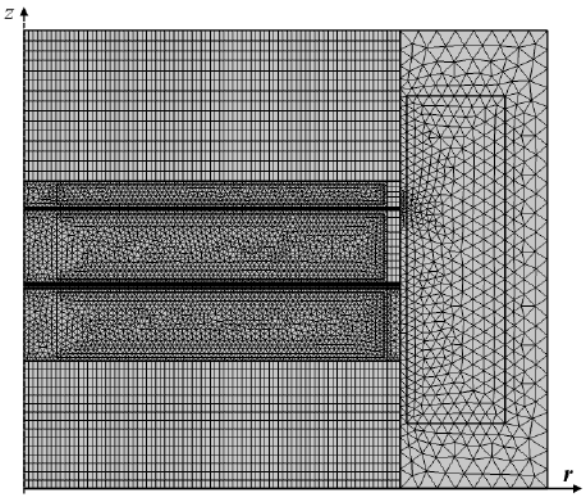


Рисунок 2.9 – Просторова дискретизація кінцевими елементами

В моделі використовувалася сітка типу «Free triangular» з розмірами елементів «Extra fine» (максимальний розмір елемента сітки для віддалених областей навколишнього середовища становив 5 мм, а для ЛІЕП розмір елемента сітки вибирався в інтервалі від (0,001 до 1,0 мм). Відносне переміщення елементів ЛІЕП між собою зумовило застосування автоматичної перебудови сітки Automatic remeshing (критерій перебудови сітки mod1.fsi.minqual>0,2). Моделювання процесів ЛІЕП здійснювалось з використанням взаємопов'язаних фізичних модулів.

Просторова дискретизація полягає в розбитті обмеженої області на окремі кусочно безперервні підобласті. Сукупність таких елементів визначається як сітка або тріангуляція, яка є моделлю розрахункової області. Причому для кожного з фізичних модулів («Magnetic fields», «Electrical circuit», «Heat transfer in solid») використовувалася інтерполяція рішення для окремих кінцевих елементів, що визначається квадратичною або кубічною дискретизацією.

Основні змінні апроксимуються вузловими значеннями, помноженим на базисний вектор, який необхідний для інтерполяції всередині елемента. Для апроксимації по часу використовується неявна кінцево-різницева схема п’ятого порядку.

2.3 Апробація математичної та комп’ютерної моделі ЛІЕП

Для апробації математичної та комп’ютерної моделі було виконано перевірку енергетичного балансу для ЛІЕП мультиякірної конфігурації, що включає ЕЯ і КЯ, який паралельно зв’язаний з ОІ (табл. 2.1).

Складовими енергетичного балансу ЛІЕП є:

енергія ЄНЕ:

$$W_C = \frac{C_0 u_C^2}{2}, \tag{2.62}$$

де C_0 – ємність ЄНЕ; u_C – напруга ЄНЕ,

Таблиця 2.1 – Основні розміри та параметрами ЛІЕП базового варіанту

Показник	Позначення	Величина
Параметри обмотки індуктора		
Зовнішній діаметр	D_{ex1}	100 мм
Внутрішній діаметр	D_{in1}	10 мм
Висота	H_1	10 мм
Кількість витків	N_1	46 шт.
Перетин шини	$S_1=a_1\times b_1$	1,8×4,8=8,64 мм^2
Параметри електропровідного якоря		
Матеріал	Мідь М2	
Зовнішній діаметр	D_{ex3}	100 мм
Внутрішній діаметр	D_{in3}	10 мм
Висота	H_3	3 мм
Маса	M_3	0,24 кг
Параметри котушкового якоря		
Зовнішній діаметр	D_{ex2}	100 мм
Внутрішній діаметр	D_{in2}	10 мм
Висота	H_2	10 мм
Кількість витків а	N_2	46 шт.
Перетин шини	$S_2=a_2\times b_2$	1,8×4,8=8,64 мм^2
Маса	m_3	0,82 кг
Параметри феромагнітного якоря		
Матеріал	Сталь 3	
Зовнішній діаметр	D_{ex4}	100мм
Внутрішній діаметр	D_{in4}	10мм
Висота	H_4	12 мм
Маса	m_4	0,75 кг
Параметри феромагнітного екрану		
Матеріал	Сталь 3	
Зовнішній діаметр	D_{ex5}	147 мм
Внутрішній діаметр	D_{in5}	117 мм
Висота	H_5	50 мм
Параметри геометричного розташування якорів відносно ОІ		
Відстань між ОІ та КЯ	h_{12}	2 мм
Відстань між КЯ та ЕЯ	h_{23}	2 мм
Параметри джерела живлення		
Ємність ЄНЕ	C_0	2500 мкФ
Зарядна напруга ЄНЕ	U_0	450 В

енергія магнітного поля:

$$W_{маг} = \frac{1}{2}\int_V HBdV\,, \tag{2.63}$$

де H – напруженість магнітного поля; B – індукція магнітного поля; V – об’єм розрахункової області,

кінетична енергія:

$$W_{кін} = \frac{m_e v_z^2}{2}, \tag{2.64}$$

де m_{2e} – маса виконавчого елементу; v_z – миттєва швидкість,

теплова енергія, яка виділяється в ОІ:

$$W_{T.OI} = \int_0^{t_p} i_1^2 \cdot R_1(T_1)dt\,, \tag{2.65}$$

де i_1 – миттєве значення струму ОІ; $R_1(T_1)$ – опір ОІ; T_1 – температура ОІ; t_p – тривалість робочого процесу,

теплова енергія, яка виділяється в КЯ:

$$W_{T.КЯ} = \int_0^{t_p} i_2^2 \cdot R_2(T_2)dt\,, \tag{2.66}$$

де i_2 – миттєве значення струму КЯ; $R_2(T_2)$ – опір КЯ; T_2 – температура КЯ,

теплова енергія, яка виділяється в ЕЯ:

$$W_{T.ЕЯ} = \int_0^{t_p} i_3^2 \cdot R_3(T_3)dt\,, \tag{2.67}$$

де i_3 – миттєве значення струму ЕЯ; $R_3(T_3)$ – опір ЕЯ, T_3 – температура ЕЯ.

Сумарна теплова енергія в ОІ, КЯ та ЕЯ:

$$W_{\Sigma T} = W_{T.OI} + W_{T.ЕЯ} + W_{T.КЯ}\,. \tag{2.68}$$

Результати розрахунку енергетичних процесів в ЛІЕП при коливально-загасаючому імпульсу струму збудження представлені на рис. 2.10. Під час робочого процесу магнітна енергія $W_{маг}$ та енергія ЄНЕ W_C мають

коливально-загасаючий характер, причому вони змінюються практично в протифазі. Всі інші складові енергій в ЛІЕП зростають до різних рівней, виходячи на певне стале значення. Як випливає з результатів розрахунку, основна частина енергії ЄНЕ перетворюєтья в теплову енергію в активних елементах ЛІЕП. Це й обумовлює відносно низьку ефективність перетворювача.

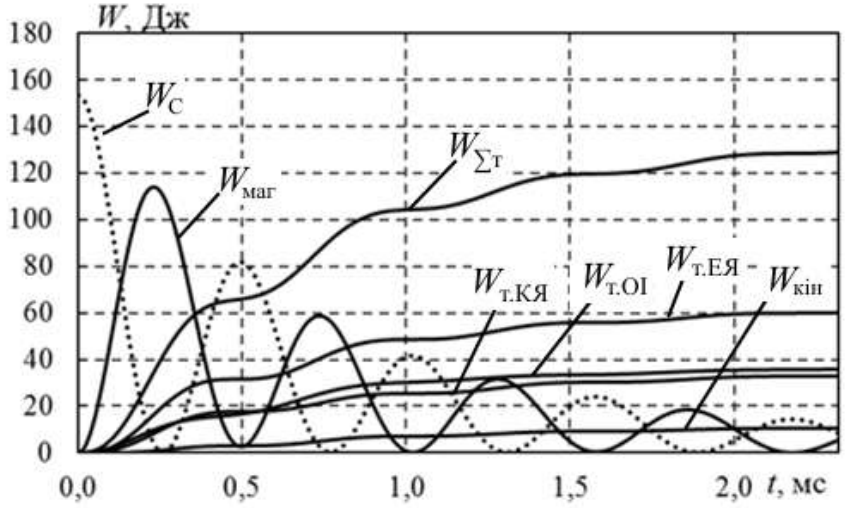


Рисунок 2.10 – Енергетичний процес ЛІЕП при коливально-загасаючому імпульсу струму збудження

Для перевірки енергетичного балансу на протязі робочого процесу ЛІЕП застосуємо оцінку абсолютної ΔW та відносної δ_W похибок:

$$\Delta W = W - W_D, \tag{2.68}$$

$$\delta_W = \frac{\Delta W}{W_D} \cdot 100\%. \tag{2.69}$$

де $W = W_{т.ЕЯ} + W_{т.КЯ} + W_{т.ОІ} + W_{маг} + W_{кін}$ – результуюча (сумарна) енергія розрахунків енергій; W_D – дійсне значення енергії (початкова енергія ЄНЕ $W_C = 0{,}5 C_0 U_0^2$).

Відносна похибка розрахунків енергетичного балансу під час робочого процесу для ЛІЕП при коливально-загасаючому імпульсу струму збудження зображена на рис. 2.11.

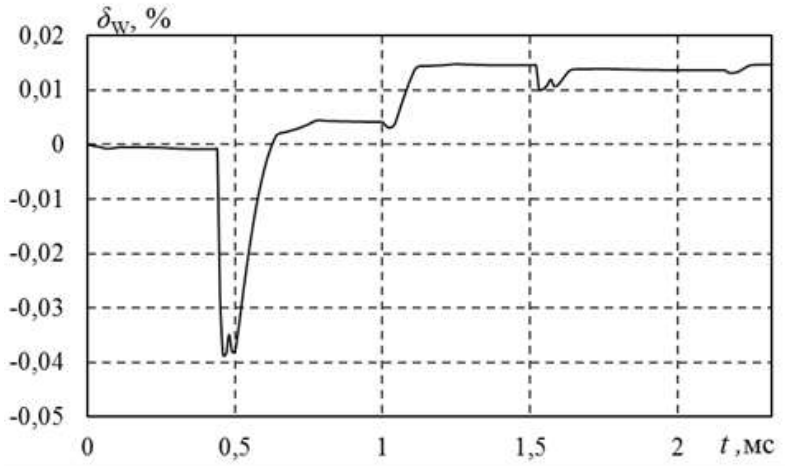


Рисунок 2.11 – Відносна похибка розрахунків енергетичного балансу для ЛІЕП при коливально-загасаючому імпульсу струму збудження

Максимальна відносна похибка δ_W = 0,04 % має місце в інтервалі 0,45–0,6 мс, коли енергія магнітного поля $W_{маг}$ приймає мінімальне значення. В інші моменти часу відносна похибка не перевищує 0,02 %, що свідчить про достовірність результатів розрахунку.

Для перевірки адекватності математичної та комп'ютерної моделей на рис. 2.12 представлені складові енергетичних процесів цього ЛІЕП при аперіодичній формі струму збудження. Така форма струму збудження забезпечується за допомогою зворотнього діоду *VD*, який встановлений паралельно ОІ. На рис. 2.12 окрім зазначених вище складових енергетичного процесу, представлена і теплова енергія в зворотньому діоді $W_{т.д}$. Після того, як напруга ЄНЕ W_C = 0, струм в ОІ починає протікати через коло з діодом *VD*. Внаслідок чого, магнітна енергія після цього моменту починає плавно загасати, в той час як інші складові енергій поступово збільшуються, сягаючи сталого значення.

Відносна похибка розрахунків енергетичного балансу під час робочого процесу для цього ЛІЕП при аперіодичній формі струму збудження представлена на рис. 2.13. Відносна похибка починає збільшуватись після того, як напруга в ЄНЕ сягає нульового значення. Після цього вона зростає в інтервалі 0,25-0,4 мс і сягає сталого значення δ_W = 0,18 %, що більше, ніж в

ЛІЕП при коливально-загасаючому імпульсу збудження. Але ця відносна похибка є допустимою для інженерних розрахунків і вона показує адекватність математичної та комп'ютерної моделі ЛІЕП мультиякірної конфігурації.

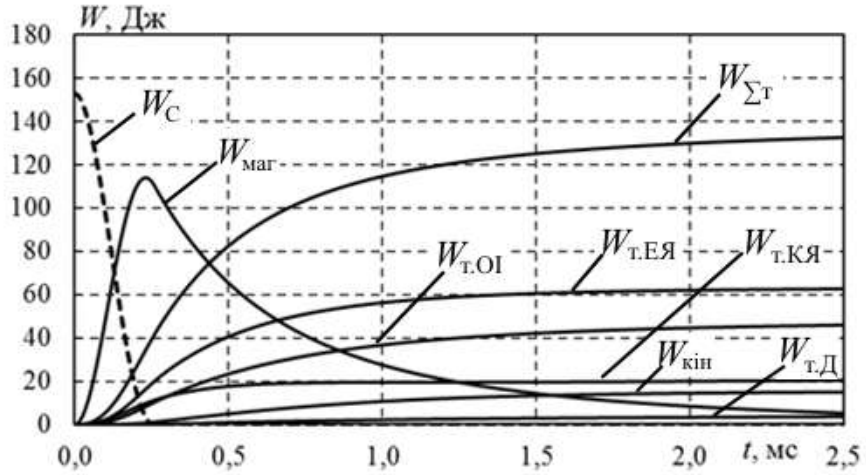


Рисунок 2.12 – Енергетичний процес ЛІЕП при аперіодичній формі струму збудження

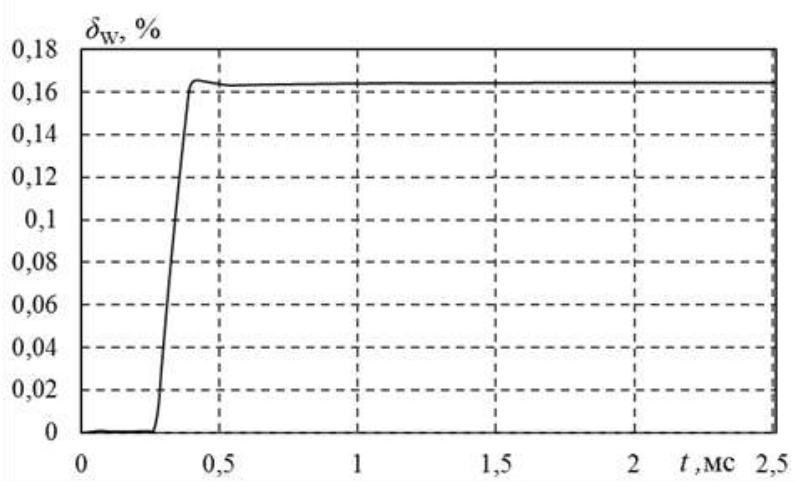


Рисунок 2.13 – Відносна похибка розрахунків енергетичного балансу для ЛІЕП при аперіодичній формі струму збудження

Таким чином, розроблена удосконалена математична модель ЛІЕП за рахунок включення феромагнітного, котушкового та суцільного електропровідного якорів, які взаємодіють з рухомим якорем. Математична модель, яка реалізована в програмному середовищі COMSOL Multiphysics, містить взаємопов'язані електричні, магнітні, механічні та теплові процеси і враховує магнітні та теплофізичні нелінійні залежності.

Двомірна математична модель в осесиметричній постановці на кожному часовому кроці розраховує електромагнітне поле в лінійному імпульсному електромеханічному перетворювачі при взаємному положенні обмотки індуктора та якорів, які рухаються з певними швидкостями під дією електродинамічної або електромагнітної сил. Модель доповнюється граничними умовами. Система диференціальних рівнянь, яка враховує як послідовне, так і паралельне з'єднання котушкового якоря з обмоткою індуктора, доповнюється початковими умовами.

Математична модель, яка описує механічні зв'язки між рухомими елементами електромеханічного перетворювача, враховує масу якорів та виконавчого елементу, швидкості їх переміщення відносно обмотки індуктора, динамічне тертя та густину середовища переміщення, аеродинамічний опір та пружність зворотного (буферного) елементу.

Для визначення температури активних елементів електромеханічного перетворювача використовується польова модель в циліндричній системі координат, яка дозволяє на кожному часовому кроці врахувати просторовий розподіл температур. Теплова модель доповнюється граничними умовами третього роду, що описують процес тепловіддачі, та граничними умовами другого роду на осі симетрії.

За допомогою енергетичного балансу було встановлено адекватність математичної та комп'ютерної моделі для лінійного імпульсного електромеханічного перетворювача мультиякірної конфігурації.

РОЗДІЛ 3
АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК І ПОКАЗНИКІВ ЛІНІЙНИХ ІМПУЛЬСНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ МУЛЬТИЯКІРНИХ КОНФІГУРАЦІЙ

ЛІЕП індукційного, електродинамічного та електромагнітного типів забезпечують різні силові і швидкісні показники, створюючи різні величини магнітних полів розсіяння в навколишнє середовище, що впливає на екологічні показники. Вони мають різні маси якорів і величини струмів збудження індуктора, що важливо для електронної системи живлення. Вони характеризуються різними швидкостями протікання електромагнітних процесів, різними напрямками дії електродинамічних та електромагнітних сил та ін. Одним із шляхів підвищення ефективності ЛІЕП являється розробка конструкцій, які об’єднують властивості перетворювачів зазначених типів. Оскільки в цих перетворювачах основна відмінність полягає у конструкції якоря, то для поєднання властивостей різних типів ЛІЕП необхідно створити перетворювачі з декількома якорями ЛІЕП мультиякірних конфігурацій, які забезпечують однонаправлений рух в ЛІЕП швидкісного призначення або сумування електродинамічних сил та електромагнітних сил в ЛІЕП силового призначення [100].

3.1 Класифікація ЛІЕП мультиякірних конфігурацій

На даний момент найбільш широко розповсюдженими для використання є ЛІЕП індукційного, електродинамічного та електромагнітного типу. Ці перетворювачі мають обмотку індуктора, яка збуджується струмом від імпульсного електричного джерела з ємнісним накопичувачем енергії, та один рухомий якір. В ЛІЕП коаксіальної конфігурації напроти дискової ОІ розташовується дисковий якір, який здійснює переміщення в аксіальному напрямку. В ЛІЕП індукційного типу якір виконаний у вигляді тонкого

електропровідного диску. В ЛІЕП електродинамічного типу якір виконано у вигляді багатовиткової котушки, яка електрично (послідовно або паралельно) з'єднана з ОІ. В ЛІЕП електромагнітного типу якір виконано у вигляді відносно товстого феромагнітного диску.

Електромеханічний перетворювач індукційного типу з електропровідним якорем позначимо ЛІЕП-Е. Перетворювач електродинамічного типу з котушковим якорем позначимо ЛІЕП-К. Перетворювач електромагнітного типу з феромагнітним якорем позначимо ЛІЕП-Ф. Перетворювачі з одним якорем будемо вважати перетворювачами І рівня. Перетворювачі з двома якорями будемо вважати перетворювачами ІІ рівня. А перетворювачі з трьома якорями будемо вважати перетворювачами ІІІ рівня (рис. 3.1).

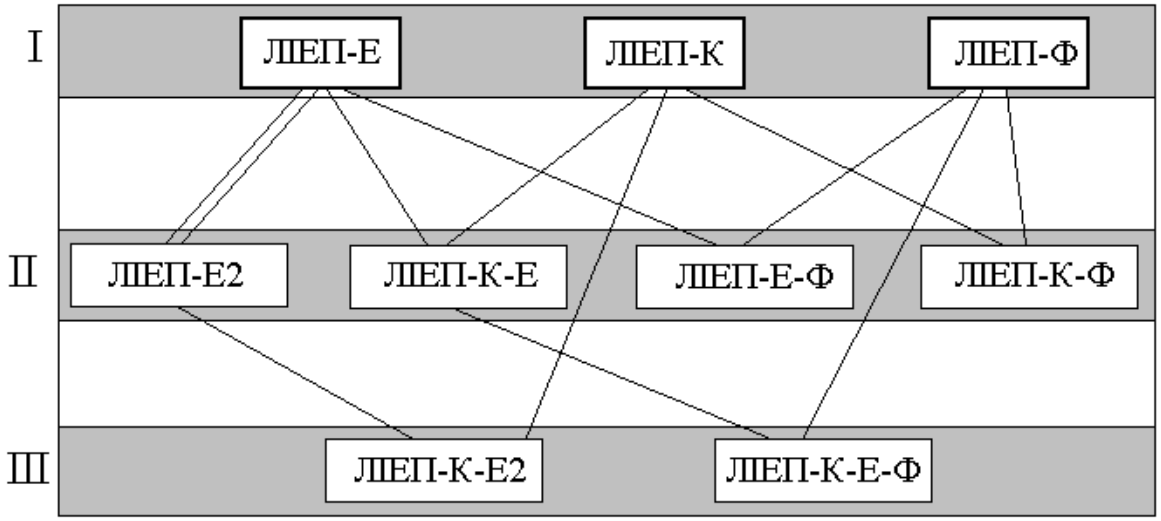


Рисунок 3.1 – Загальна класифікація ЛІЕП

До перетворювачів І рівня відносяться: ЛІЕП-Е, який включає ЕЯ; ЛІЕП-К, який включає КЯ; ЛІЕП-Ф, який включає ФЯ.

До перетворювачів ІІ рівня відносяться: ЛІЕП-Е2, який включає два ЕЯ, що охоплюють ОІ; ЛІЕП-К-Е, який включає КЯ і ЕЯ; ЛІЕП-Е-Ф, який включає ЕЯ і ФЯ; ЛІЕП-К-Ф, який включає КЯ і ФЯ.

До перетворювачів ІІІ рівня відносяться: ЛІЕП-К-Е2, який включає КЯ і два ЕЯ; ЛІЕП-К-Е-Ф, який включає КЯ, ЕЯ і ФЯ.

На рис. 3.2 представлено загальний вигляд з перерізом ЛІЕП мультиякірних конфігурацій (перетворювачі II і III рівня). КЯ може бути електрично зв’язаний з ОІ паралельно (parallel connection) та послідовно (serial connection). В першому варіанті в позначеннях ЛІЕП добавляється індекс *p*, наприклад ЛІЕП-К$_p$, а в другому варіанті індекс *s*, наприклад ЛІЕП-К$_s$. КЯ та ОІ намотані в протилежні сторони так, що між ними діють ЕДЗ відштовхування.

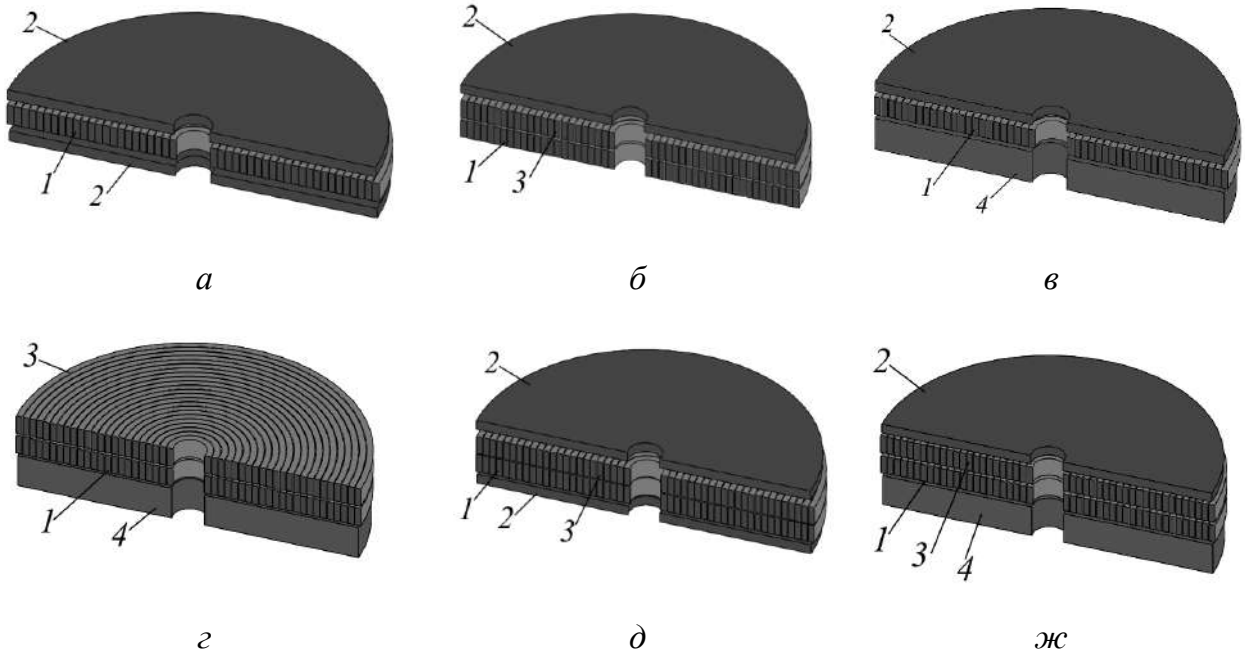


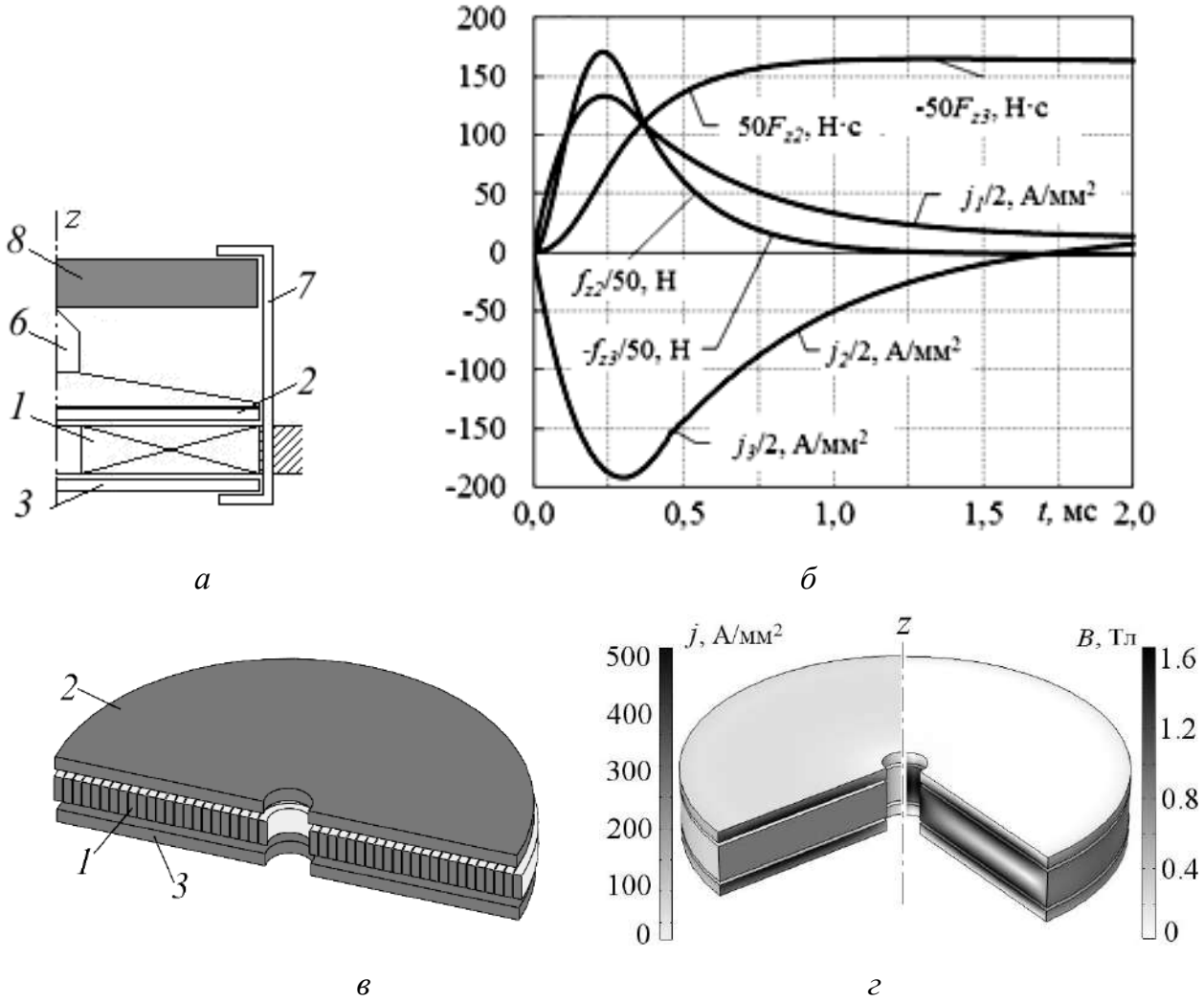
Рисунок 3.2 – Загальний вигляд з перерізом ЛІЕП мультиякірних конфігурацій: ЛІЕП-Е2 (*а*), ЛІЕП-К-Е (*б*), ЛІЕП-Е-Ф (*в*), ЛІЕП- К-Ф (*г*), ЛІЕП-К-Е2 (*д*), ЛІЕП-К-Е-Ф (*ж*): *1* – ОІ; *2* – ЕЯ; *3* – КЯ; *4* – ФЯ

Розглянемо електромеханічні характеристики ЛІЕП мультиякірних конфігурацій силового призначення з параметрами, представленими в табл. 2.1.

3.2 Аналіз електромеханічних характеристик ЛІЕП мультиякірних конфігурацій силового призначення

Розглянемо ЛІЕП з двома електропровідниковими якорями. Оскільки найбільші силові показники розвивають ЛІЕП при максимально близькому розташуванні якорів відносно ОІ, будемо вважати в силових перетворювачах, що малорухомі якорі передають силу через рухомі або нерухомі фіксатори на об'єкт впливу. В цьому розділі будемо використовувати однакові позначення всіх елементів. Активні елементи: *1* – ОІ, 2 – ЕЯ передній, *3* – ЕЯ задній, *4* – КЯ, *5* – ФЯ. Пасивні елементи: *6* – ударний виконавчий елемент (бойок), *7* – фіксатори, *8* – об'єкт впливу, *9* – внутрішнє осердя. ОІ *1* та КЯ *4* електрично з'єднані між собою за допомогою рухомих (гнучких або контактних) струмопроводів. Розглянемо ЛІЕП циліндричної конфігурації з коаксіальним розташуванням якорів відносно індуктора при аперіодичній формі струму збудження. Ефективність ЛІЕП силового призначення будемо оцінювати амплітудою f_{zm} та величиною імпульсу електродинамічних та електромагнітних зусиль.

Розглянемо ЛІЕП-Е2 з двома електропровідними якорями, які охоплюють ОІ з протилежних сторін та діють на рухомі фіксатори (рис. 3.3). В даному ЛІЕП, що включає ОІ *1*, охоплений переднім *2* та заднім *3* ЕЯ, густина струму в ОІ j_1 має форму полярного аперіодичного імпульсу, в той час, як густина струмів в передньому j_2 та в задньому j_3 ЕЯ на протязі 1,3 мс мають протилежну полярність. Амплітуда густини струму в ОІ складає $j_{1m} = 266{,}7$ А/мм^2, а в якорях – $j_{2,3m} = 390{,}2$ А/мм^2. Це обумовлює виникнення протилежно направлених ЕДЗ відштовхування переднього f_{z2} та заднього f_{z3} ЕЯ від ОІ. Протилежну полярність мають й імпульси ЕДЗ, що діють на передній F_{z2} та задній F_{z3} ЕЯ. Амплітуди ЕДЗ, що діють на кожний ЕЯ, складають $f_{z2,3m} = 8{,}55$ кН, а величина імпульсу ЕДЗ складає $F_{z2,3} = 3{,}3$ Н·с. За рахунок рухомих фіксаторів *7* ЕДЗ від обох якорів здійснюють сумарну силову дію на об'єкт впливу *8*.



а *б* *в* *г*

Рисунок 3.3 – Конструктивна схема (*а*), електромеханічні характеристики (*б*), схема активних елементів (*в*) та розподіли густин струмів і індукції магнітного поля в активних елементах в момент максимального значення струму в ОІ (*г*) ЛІЕП-Е2

На рис. 3.3 *в* показані розподіли густин струмів *j* та індукції магнітного поля *B* в обмотці індуктора та якорях в момент максимального значення струму в ОІ. Максимальні значення густини струму виникають на середніх ділянках ЕЯ, що обернені до ОІ. А найбільші значення індукції магнітного поля *B* виникають в центральній зоні ОІ та в суміжних областях між індуктором та ЕЯ [101].

Розглянемо ЛІЕП з електропровідним та котушковим якорями. В ЛІЕП-К-Е з електропровідним та котушковим якорями ОІ та КЯ можуть бути з’єднані послідовно або паралельно (рис. 3.4) [102]. Розглянемо ЛІЕП з переднім ЕЯ та КЯ, що паралельно з’єднаний з ОІ тобто ЛІЕП-Кр-Е з нерухомими фіксаторами.

При такому з’єднанні величини струмів в ОІ та КЯ можуть розрізняться через індукційну взаємодію з ЕЯ.

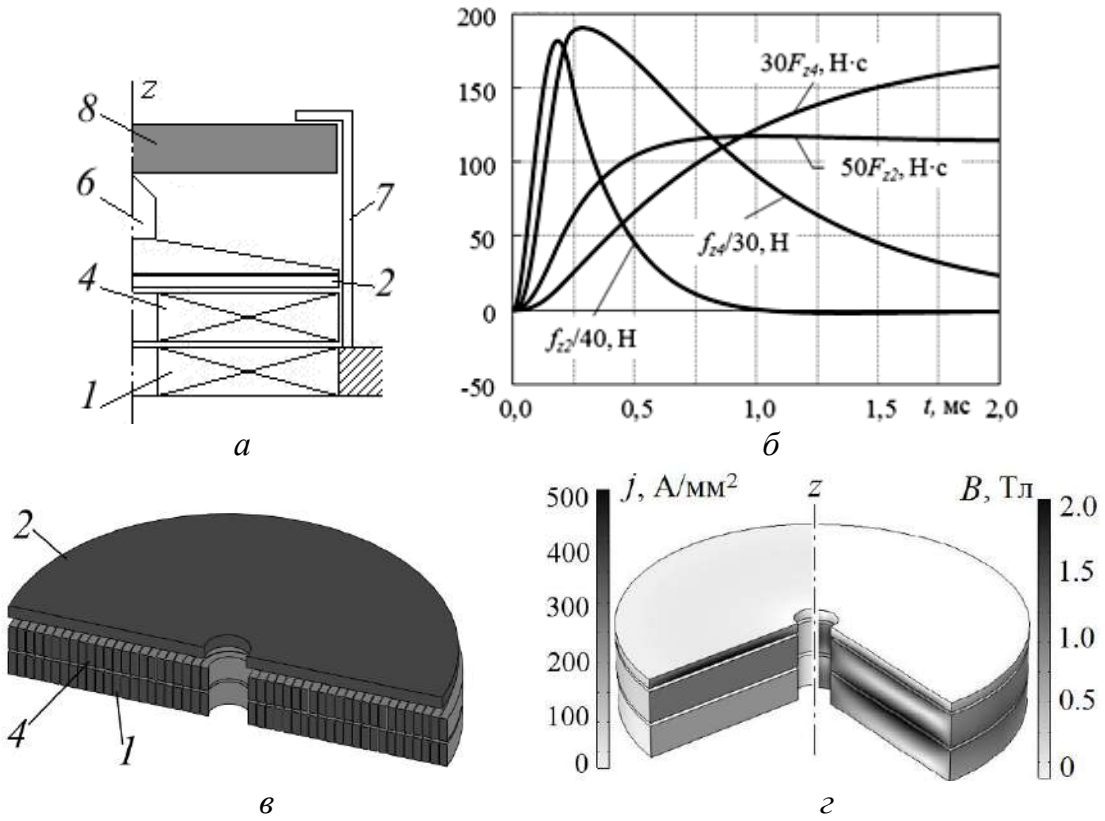
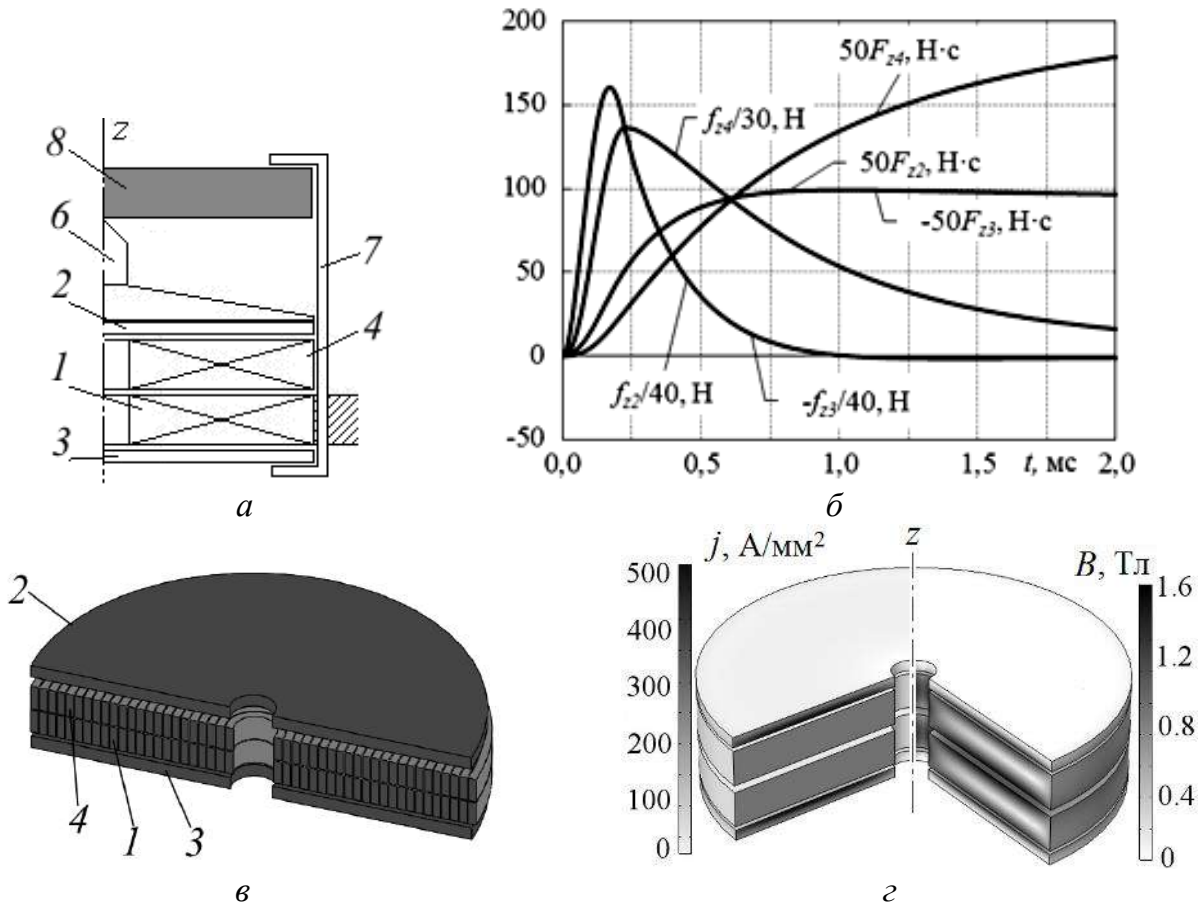


Рисунок 3.4 – Конструктивна схема (*а*), електромеханічні характеристики (*б*), схема активних елементів (*в*) та розподіли густин струмів і індукції магнітного поля в активних елементах в момент максимального значення струму в ОІ (*г*) ЛІЕП-К$_р$-Е

На рис. 3.4 *б* представлені миттєві значення ЕДЗ, які діють на ЕЯ f_{z2} та на КЯ f_{z4}, і відповідні імпульси ЕДЗ F_{z2} й F_{z4}, які направлені вздовж осі *z*. Амплітуди ЕДЗ, які діють на ЕЯ, складають $f_{z2m} = 7{,}28$ кН, а на КЯ $f_{z4m} = 5{,}72$ кН. Відповідні величини імпульсів ЕДЗ складають $F_{z2} = 2{,}35$ Н·с і $F_{z4} = 6{,}04$ Н·с. Зазначимо, що ЕДЗ, які діють на передній ЕЯ, за рахунок більш короткого часу впливу обумовлюють меншу величину імпульсу ЕДЗ в кінці робочого процесу у порівнянні з величиною імпульсу ЕДЗ, що діє на КЯ.

На рис. 3.4 *в* показані розподіли густин струмів *j* та індукції магнітного поля *B* в індукторі та якорях в момент максимального значення струму в ОІ. В даному ЛІЕП максимальне значення індукції магнітного поля *B* в момент максимуму струму в індукторі має місце в області між ОІ та КЯ.

Розглянемо ЛІЕП з двома електропровідними та котушковим якорями, а саме, ЛІЕП-Кр-Е2 з переднім і заднім ЕЯ та КЯ, який паралельно з'єднаний з ОІ (рис. 3.5) [103]. Обидва ЕЯ діють на рухомі фіксатори 7.



а *б* *в* *г*

Рисунок 3.5 – Конструктивна схема (*а*), електромеханічні характеристики (*б*), схема активних елементів (*в*) та розподіли густин струмів і індукції магнітного поля в активних елементах в момент максимального значення струму в ОІ (*г*) ЛІЕП-К$_р$-Е2

В даному перетворювачі струми в обох ЕЯ та струми в індукторі і КЯ рівні. При цьому на передній і задній ЕЯ діють протилежно направлені ЕДЗ, амплітуди яких складають $f_{z2,3m}$ = 6,42 кН. На КЯ діють ЕДЗ, амплітуда яких складає f_{z4m} = 4,09 кН. Відповідні величини імпульсів ЕДЗ, що діють на ЕЯ та КЯ складають $F_{z2,3}$ = 1,98 Н·с та F_{z4} = 4,07 Н·с.

На рис. 3.5 *в* показані розподіли густин струмів j та індукції магнітного поля B в індукторі та якорях в момент максимального значення струму в індукторі. Максимальне значення індукції магнітного поля B в момент

максимуму струму в ОІ в даному ЛІЕП мають місце в області між індуктором та КЯ.

Розглянемо ЛІЕП з ЕЯ та ФЯ (рис. 3.6) [104]. В цьому перетворювачі ФЯ 5 через внутрішнє осердя 9 передає електромагнітне зусилля на ЕЯ, що забезпечує їх однонаправлену дію в сторону об'єкту впливу 8.

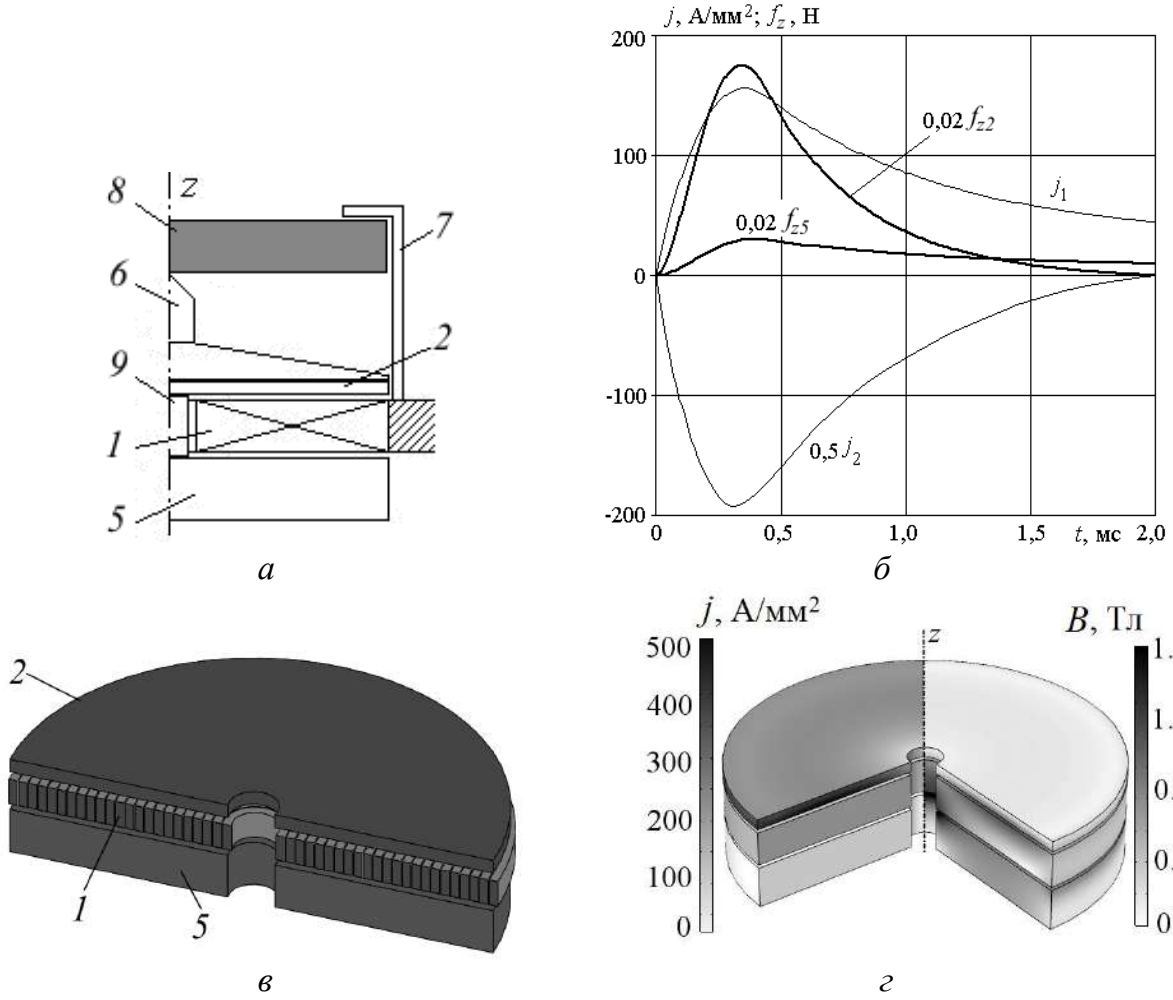


Рисунок 3.6 – Конструктивна схема (*а*), електромеханічні характеристики (*б*), схема активних елементів (*в*) та розподіли густин струмів і індукції магнітного поля в активних елементах в момент максимального значення струму в ОІ (*г*) ЛІЕП-Е-Ф

В ЛІЕП-Е-Ф з нерухомими фіксаторами 7 зміна густини струму в ОІ j_1 в часі відбувається в формі аперіодичного полярного імпульсу з амплітудою j_{1m} = 156 А/мм^2. Усереднена по перетину густина струму в ЕЯ j_2 також має форму імпульсу з амплітудою j_{2m} = 385 А/мм^2. Однак струм в ЕЯ через 2 мс змінює полярність на протилежну.

До кінця робочого процесу величина імпульсу ЕДЗ становить F_{z2} = 5,42 Н·с, а величина імпульсу ЕМЗ – F_{z5} = 3,49 Н·с. Зауважимо, що максимальна величина результуючого силового впливу (сумарна амплітуда ЕДЗ і ЕМЗ) в 1,21 рази більше, ніж ЕДЗ в ЛІЕП-Е індукційного типу і в 5,65 рази більше, ніж ЕМЗ в ЛІЕП-Ф електромагнітного типу. Що стосується імпульсу результуючих зусиль, то тут ситуація дещо інша. В даному ЛІЕП величина імпульсу зусиль в 1,82 рази більше, ніж величина імпульсу ЕДЗ в ЛІЕП-Е і в 1,22 рази більше, ніж величина імпульсу ЕМЗ в ЛІЕП-Ф електромагнітного типу. Це свідчить про перспективність ЛІЕП-Ф для ударно-силового застосування.

На рис. 3.6 *в* показані розподіли густин струмів *j* та індукції магнітного поля *B* в індукторі та в якорях в момент максимального значення струму в ОІ. У цьому перетворювачі найбільша густина струму по перетину ЕЯ має місце в середній частині, зверненої до індуктора. Максимальне значення індукції магнітного поля *B* виникає в середній частині зазору між індуктором і ЕЯ. Крім того, значна індукція магнітного поля спостерігається у внутрішній зоні індуктора, де розташоване (але не показане) феромагнітне осердя *9*.

ЛІЕП з котушковим та феромагнітним якорями. В ЛІЕП-К-Ф індуктор 1 взаємодіє з КЯ 4 і з ФЯ 5, який через внутрішнє осердя 9, передає зусилля на КЯ 4 (рис. 3.7) [105]. Розглянемо перетворювач з паралельним з'єднанням ОІ і КЯ та нерухомими фіксаторами 7.

Зміни густин струмів в ОІ j_1 і в КЯ j_4 в часі відбуваються в формі аперіодичного полярного імпульсу з коротким переднім і довгим заднім фронтами. При цьому амплітуди густин струмів в індукторі і КЯ різні: в ОІ j_{1m} = 177,7 А/мм^2, а в КЯ j_{4m} = 204,7 А/мм^2.

ЛІЕП з котушковим та феромагнітним якорями. В ЛІЕП-К-Ф індуктор 1 взаємодіє з КЯ 4 і з ФЯ 5, який через внутрішнє осердя 9, передає зусилля на КЯ 4 (рис. 3.7) [105]. Розглянемо перетворювач з паралельним з'єднанням ОІ і КЯ та нерухомими фіксаторами 7.

Зміни густин струмів в ОІ j_1 і в КЯ j_4 в часі відбуваються в формі аперіодичного полярного імпульсу з коротким переднім і довгим заднім фронтами. При цьому амплітуди густин струмів в індукторі і КЯ різні: в ОІ j_{1m} = 177,7 А/мм^2, а в КЯ j_{4m} = 204,7 А/мм^2.

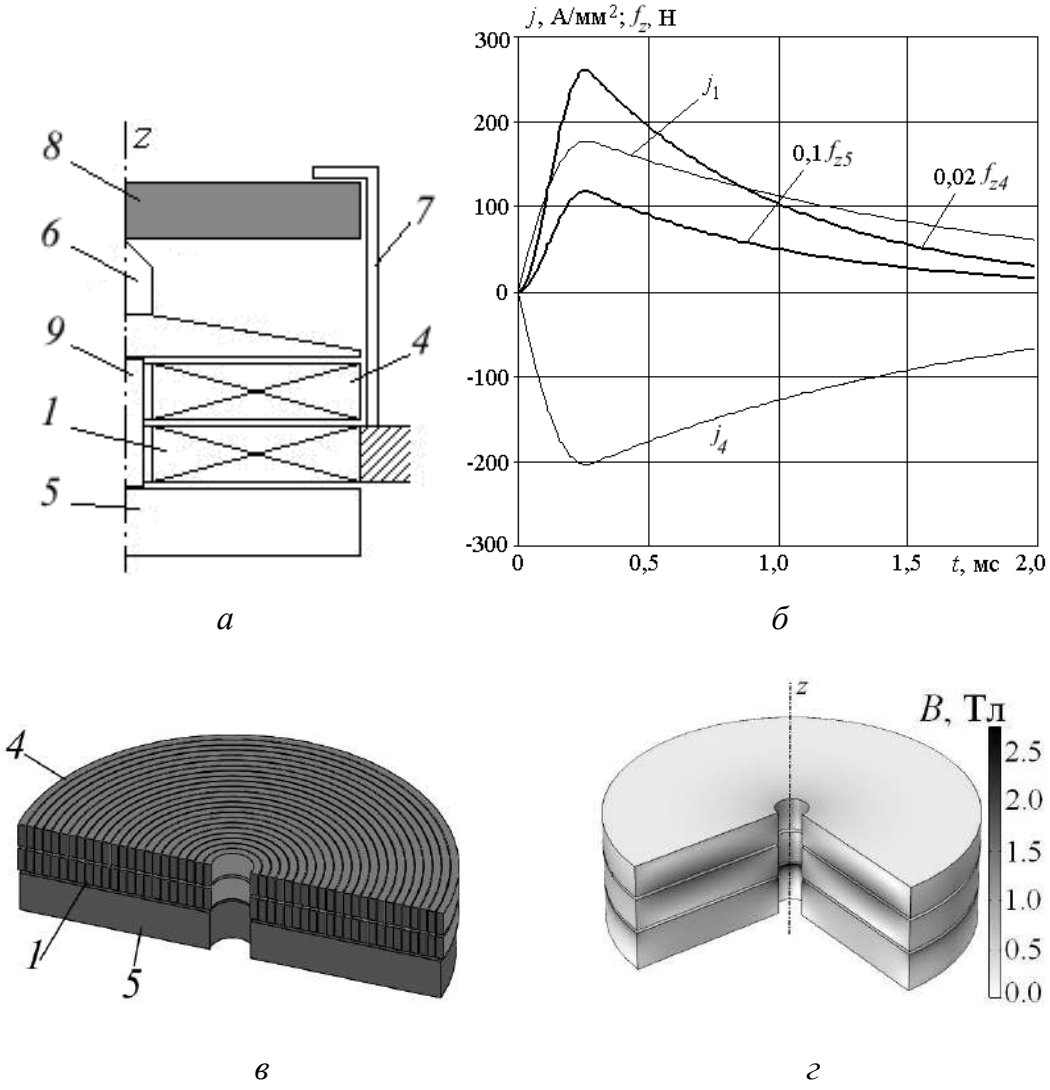


Рисунок 3.7 – Конструктивна схема (*а*), електромеханічні характеристики (*б*), схема активних елементів (*в*) та індукції магнітного поля в активних елементах в момент максимального значення струму в ОІ (*г*) ЛІЕП-К$_р$-Ф

Менше значення амплітуди густини струму в індукторі можна пояснити впливом магнітного поля на нього з боку суміжно розташованого ФЯ 5. На рис. 3.7 *г* показані розподіли густин струмів j та індукції магнітного поля B в індукторі та якорях в момент максимального значення струму в індукторі.

Максимальні значення індукції магнітного поля B виникають в середній частині зазору між ОІ і КЯ. Причому ця величина індукції перевищує аналогічну величину в перетворювачі ЛІЕП-Е-Ф з ЕЯ і ФЯ. Електромагнітні f_{z5} і електродинамічні f_{z4} зусилля в часі змінюються таким же чином, як і зазначені вище густини струмів. На КЯ з боку індуктора діють ЕДЗ відштовхування f_{z4}, амплітуда яких складає f_{z4m} = 13,03 кН. ЕМЗ притягнення f_{z5}, що діють на ФЯ з боку індуктора, значно менше і їх амплітуда становить лише f_{z5m} = 1,19 кН.

До кінця робочого процесу величина імпульсу ЕДЗ становить F_{z4} = 12,25 Н·с, а величина імпульсу ЕМЗ – F_{z5} = 1,2 Н·с. Зауважимо, що амплітуда результуючого силового впливу f_z в 1,1 рази більше, ніж в перетворювачі ЛІЕП-К електродинамічного типу і в 7,8 рази більше, ніж в перетворювачі ЛІЕП-Ф електромагнітного типу. В перетворювачі ЛІЕП-К$_p$-Ф величина імпульсу результуючих зусиль F_z в 1,21 рази більше, ніж в ЛІЕП-К електродинамічного типу і майже в 2 рази більше, ніж в ЛІЕП-Ф електромагнітного типу.

Розглянемо ЛІЕП з електропровідним, котушковим та феромагнітним якорями. В ЛІЕП-К-Е-Ф ОІ *1* взаємодіє з ФЯ *5* і з КЯ *4*, який, в свою чергу, взаємодіє з ЕЯ *2* (рис. 3.8) [106]. ФЯ через внутрішнє осердя *9* передає зусилля на ЕЯ *2*. Розглянемо перетворювач з нерухомими фіксаторами *7*, в якому ОІ і КЯ з'єднані паралельно. Зміни густин струмів в ОІ j_1 і в КЯ j_4 в часі відбуваються в формі аперіодичного полярного імпульсу з коротким переднім і довгим заднім фронтами. При цьому амплітуди густин струмів в ОІ і КЯ різні: в індукторі j_{1m} = 168,8 А/мм^2, а в КЯ j_{4m} = 279,8 А/мм^2. Більше значення амплітуди густини струму в КЯ можна пояснити магнітним впливом ФЯ на ОІ і впливом ЕЯ на КЯ. Амплітуда струму в ЕЯ становить j_{2m} = 368,7 А/мм^2. Струм в ЕЯ після досягнення максимального значення зменшується таким чином, що вже через 1 мс змінює полярність.

На рис. 3.8 г показані розподіли густин струмів j та індукції магнітного поля B в індукторі та в якорях в момент максимального значення струму в ОІ. Найбільша густина струму виникає в ЕЯ, а саме в його середній частині,

зверненої до індуктора. Найбільші значення індукції магнітного поля В виникають в середній частині зазору між індуктором і КЯ а також між КЯ і ЕЯ. Оскільки полярності струмів ОІ і ЕЯ однакові, то між ними виникають ЕДЗ притягнення. Це позначається на силових характеристиках даного ЛІЕП.

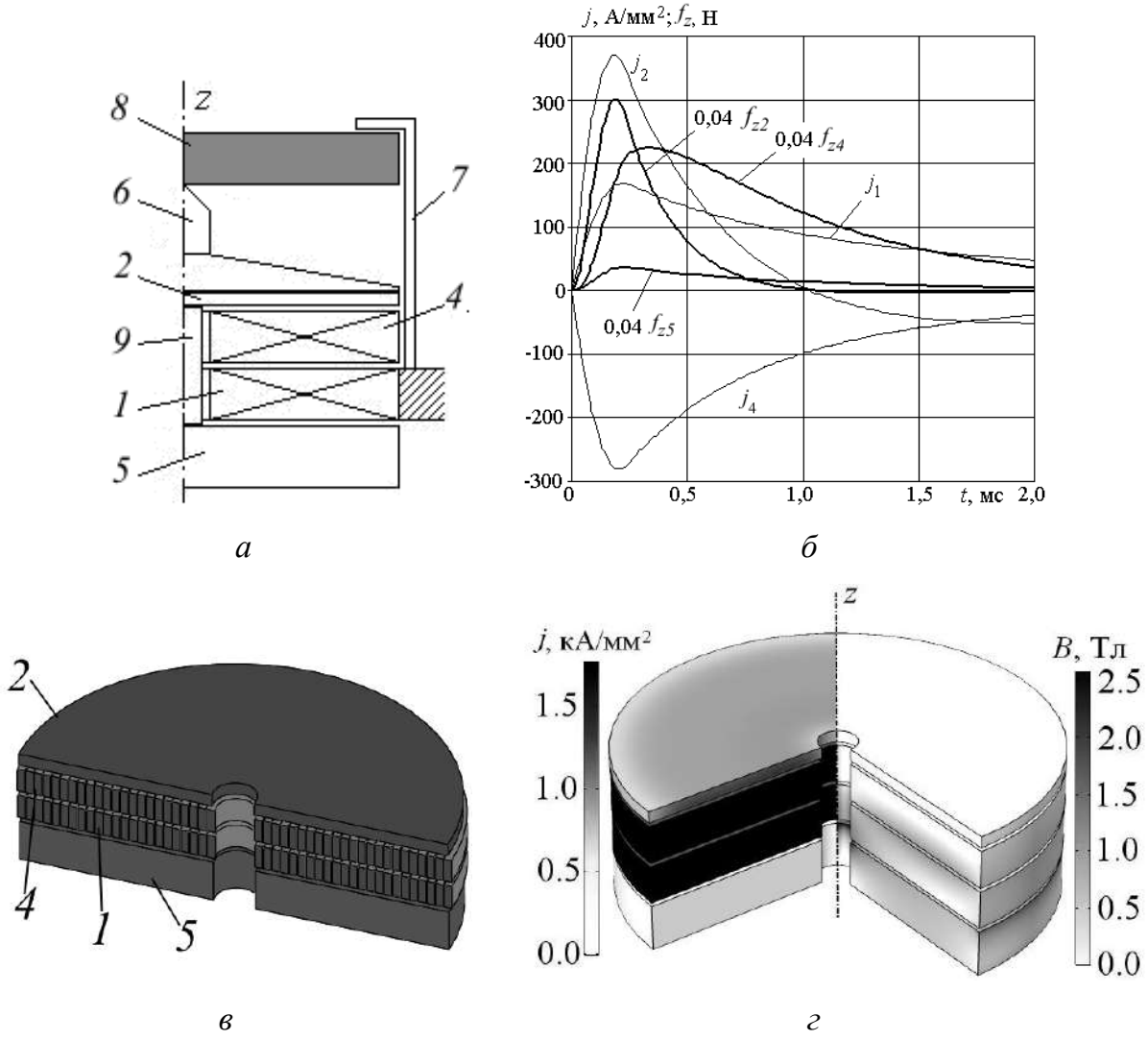


Рисунок 3.8 – Конструктивна схема (*а*), електромеханічні характеристики (*б*), схема активних елементів (*в*) та розподіли густин струмів і індукції магнітного поля в активних елементах в момент максимального значення струму в ОІ (*г*) ЛІЕП-К$_р$-Е-Ф

Електромагнітні f_{z5} і електродинамічні f_{z4} зусилля протягом всього робочого процесу зберігають полярності, а ЕДЗ f_{z2}, що діють на ЕЯ, після 1 мс практично зникають. На КЯ з боку індуктора діють ЕДЗ відштовхування f_{z4}, амплітуда яких складає f_{z4m} = 5,58 кН. ЕМЗ притягнення f_{z5}, що діють на ФЯ з

боку індуктора, значно менше і їх амплітуда становить f_{z5m} = 0,92 кН. А амплітуда ЕДЗ, що діють на ЕЯ, становить f_{z2m} = 7,48 кН. До кінця робочого процесу величина імпульсу ЕДЗ, що діє на КЯ, становить F_{z4} = 6,59 Н·с, величина імпульсу ЕМЗ, що діє на ФЯ – F_{z5} = 0,89 Н·с і величина імпульсу ЕДЗ, що діє на ЕЯ – F_{z2} = 2,45 Н·с.

Зауважимо, що амплітуда результуючого силового впливу в перетворювачі ЛІЕП-К-Е-Ф становить f_m = 13,12 кН, що більше аналогічної величини силового впливу будь-якого ЛІЕП першого рівня (рис. 3.1), але менше, ніж у ЛІЕП з КЯ і ФЯ. Величина імпульсу результуючих зусиль ЛІЕП з ЕЯ, КЯ і ФЯ більше, ніж в ЛІЕП індукційного і електромагнітного типів, але менше, ніж в ЛІЕП електродинамічного типу.

3.3 Аналіз ефективності ЛІЕП мультиякірних конфігурацій силового призначення

Проведемо порівняльний аналіз ЛІЕП мультиякірних конфігурацій перетворювачів II та III рівня: ЛІЕП-Е2; ЛІЕП-Е-Ф; ЛІЕП-К-Е; ЛІЕП-К-Е2; ЛІЕП-К-Ф; ЛІЕП-К-Е-Ф. При наявності КЯ останній з'єднується з ОІ як послідовно (serial connection) індекс $К_s$, так і паралельно (parallel connection) індекс $К_p$ [107]. В табл. 3.1 представлені розраховані величини амплітуди та величини імпульсу ЕДЗ F_z, густини струму ОІ j_{1m} та індукції магнітного поля розсіювання $B_{ex\,m}$ для різних варіантів ЛІЕП.

В якості базового варіанту використовуємо перетворювач індукційного типу ЛІЕП-Е, який відноситься до перетворювачів I рівня. Для того, щоб провести всебічний порівняльний аналіз різних ЛІЕП мультиякірних конфігурацій введемо критерій ефективності K^*, який у відносному вигляді враховує електричні (амплітуда густини струму збудження j_{1m}), силові (амплітуда f_{zm} і величина імпульсу F_z сили) і польові (максимальна індукція магнітного поля розсіювання $B_{ex\,m}$) показники:

$$K^* = \beta\left(\frac{\alpha_1}{j_{1m}^*} + \alpha_2 f_{zm}^* + \alpha_3 F_z^* + \frac{\alpha_4}{B_{ex\,m}^*}\right);\ \sum_{n=1}^{4}\alpha_n = 1, \qquad (3.1)$$

де β – коефіцієнт надійності ЛІЕП; α_n – *n*-ий ваговий коефіцієнт відповідного показника ЛІЕП.

Таблиця 3.1 – Значення розрахованих величини амплітуди та величини імпульсу ЕДЗ, густини струму ОІ та індукції магнітного поля розсіювання.

Конфігурація ЛІЕП	j_{1m}	$B_{ex\,m}$	f_z	F_z
	А/мм^2	мТл	Н	Н·с
ЛІЕП-Е2	266,74	7,25	17000	5,91
ЛІЕП-Е-Ф	185,67	7,06	10300	8,36
ЛІЕП-К$_s$-Е	163,14	8,27	13900	12,15
ЛІЕП-К$_p$-Е	279,34	11,31	24690	16,67
ЛІЕП-К$_s$-Е2	219,43	0,867	13850	9,43
ЛІЕП-К$_p$-Е2	257,13	2,19	24700	13,15
ЛІЕП-К$_s$-Ф	136,69	5,71	6910	8,70
ЛІЕП-К$_p$-Ф	177,687	10,26	13030	13,45
ЛІЕП-К$_s$-Е-Ф	142,47	7,15	7900	8,17
ЛІЕП-К$_p$-Е-Ф	170,02	2,62	13120	9,92

Вважаючи, що коефіцієнт надійності для ЛІЕП без КЯ становить β = 1, на підставі експертних оцінок вважаємо коефіцієнт надійності для ЛІЕП з КЯ β = 0,75. Більш низька надійність ЛІЕП з КЯ зумовлена наявністю рухомого контакту між ОІ і КЯ, а також його виконанням у вигляді багатовиткової котушки.

Використовуємо декілька варіантів стратегії оцінки ефективності ЛІЕП мультиякірних конфігурацій (табл. 3.2). Пріоритетність показника оцінюється величиною безрозмірного вагового коефіцієнта α.

В табл. 3.3 у відносному вигляді представлені значення критеріїв ефективності K^* ЛІЕП мультиякірних конфігурацій при різних варіантах стратегії оцінки їх ефективності.

Таблиця 3.2 – Значення вагових коефіцієнтів α_n для різних варіантів стратегії оцінки ЛІЕП, в.о.

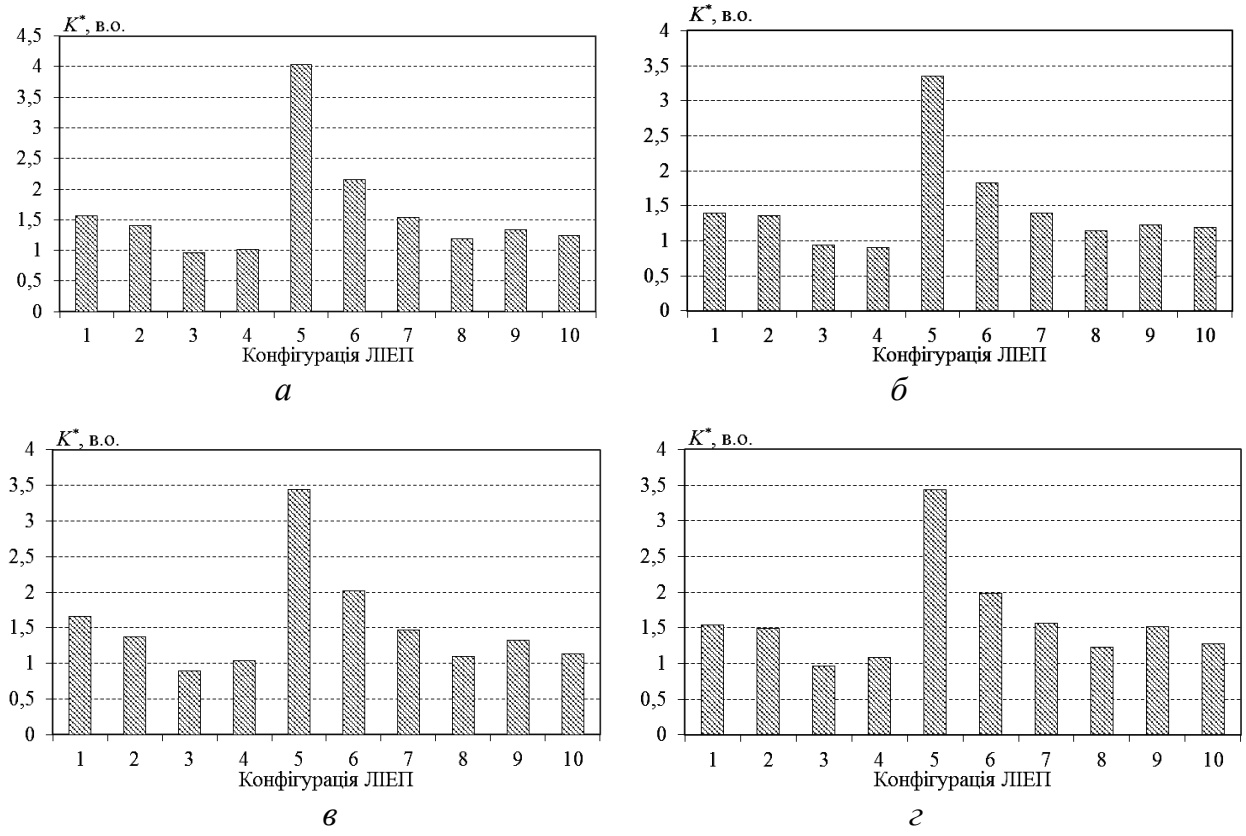
Варіант стратегії	α_1	α_2	α_3	α_4
I	0,25	0,25	0,25	0,25
II	**0,4**	0,2	0,2	0,2
III	0,2	**0,4**	0,2	0,2
IV	0,2	0,2	**0,4**	0,2
V	0,2	0,2	0,2	**0,4**

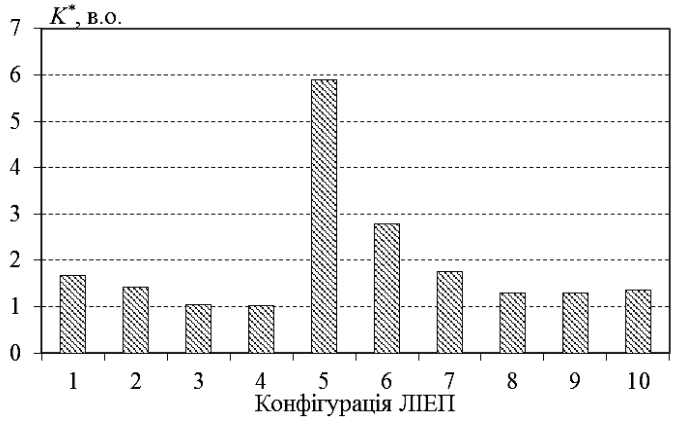
Таблиця 3.3 – Значення критеріїв ефективності K^* ЛІЕП мультиякірних конфігурацій, в.о.

Конфігурація ЛІЕП		Варіант стратегії				
		I	II	III	IV	V
1	ЛІЕП-Е2	1,569	1,393	1,659	1,544	1,679
2	ЛІЕП-Е-Ф	1,410	1,364	1,371	1,492	1,414
3	ЛІЕП-$К_s$-Е	0,962	0,939	0,892	0,969	1,048
4	ЛІЕП-$К_p$-Е	1,011	0,907	1,039	1,084	1,012
5	**ЛІЕП-$К_s$-Е2**	**4,028**	**3,348**	**3,442**	**3,438**	**5,883**
6	ЛІЕП-$К_p$-Е2	2,155	1,832	2,024	1,988	2,778
7	ЛІЕП-$К_s$-Ф	1,544	1,398	1,468	1,558	1,751
8	ЛІЕП-$К_p$-Ф	1,192	1,147	1,098	1,228	1,293
9	ЛІЕП-$К_s$-Е-Ф	1,340	1,227	1,324	1,513	1,296
10	ЛІЕП-$К_p$-Е-Ф	1,237	1,192	1,131	1,274	1,352

На рис. 3.9 зображені гістограми критеріїв ефективності K^* ЛІЕП мультиякірних конфігурацій при різних стратегіях: стратегія I (*а*), стратегія II (*б*), стратегія III (*в*), стратегія IV (*г*), стратегія V (*д*).

З усіх розглянутих вище перетворювачів найбільш ефективним являється ЛІЕП-К-Е2 з двома ЕЯ і КЯ. Більш високі показники демонструє перетворювач ЛІЕП-$К_s$-Е2, у порівнянні з перетворювачем ЛІЕП-$К_p$-Е2. Перетворювач III рівня ЛІЕП-$К_s$-Е2 за різними варіантами стратегії оцінки в 3–5 і більше разів ефективніший, ніж перетворювач I рівня ЛІЕП-Е індукційного типу. Така висока ефективність в значній мірі обумовлена зменшеним рівнем магнітного поля розсіювання $B_{ex\,m}$ та зменшеною амплітудою густини струму збудження j_{1m}.





д

Рисунок 3.9 – Гістограми критеріїв ефективності *К** ЛІЕП мультиякірних конфігурацій при різних стратегіях: стратегія I (*а*), стратегія II (*б*), стратегія III (*в*), стратегія IV (*г*), стратегія V (*д*)

Зазначимо, що у порівнянні з ЛІЕП з одним ЕЯ перетворювач з КЯ і ЕЯ забезпечує збільшення амплітуди ЕДЗ у 1,46 рази та величину імпульсу ЕДЗ у 2,09 рази. Це важливо для силового призначення перетворювача. Найменш ефективними є перетворювач II рівня ЛІЕП-К-Е з ЕЯ і КЯ. При послідовному з’єднанні КЯ з ОІ його ефективність нижче, ніж при паралельному з'єднанні. На підставі представлених даних можна зробити висновок про більш високу ефективність ЛІЕП мультиякірних конфігурацій у порівнянні з ЛІЕП I рівня з одним якорем.

3.4 Дослідження ЛІЕП мультиякірної конфігурації швидкісного призначення

Розглянемо ЛІЕП мультиякірної конфігурації швидкісного призначення з рухомим індуктором, нерухомим (НЕЯ) та рухомим (РЕЯ) електропровідними якорями. Конструктивна схема ЛІЕП-Е2 містить рухому обмотку індуктора, яка охоплена з протилежних сторін двома ЕЯ (рис. 3.10).

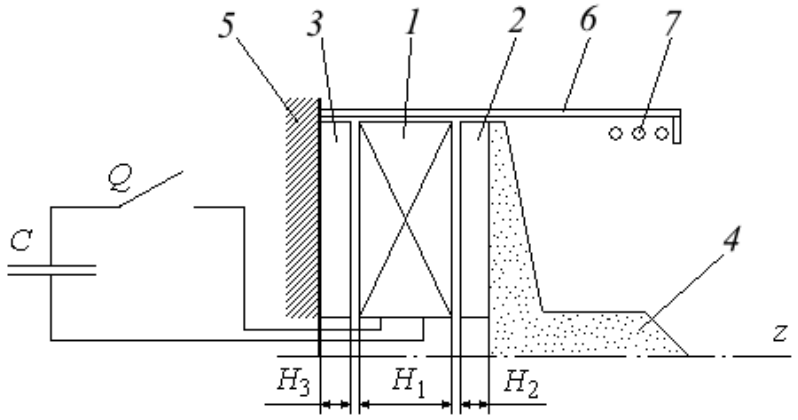


Рисунок 3.10 – Конструктивна схема ЛІЕП мультиякірної конфігурації швидкісного призначення: *1* – ОІ; *2* – НЕЯ; *3* – РЕЯ; *4* – ВЕ; *5* – упор; *6* – корпус; *7* – демпферна пружина

Нерухомий якір взаємодіє з упором, а рухомий якір взаємодіє з ВЕ, що прискорюється [108]. При збуджені ОІ через гнучкі або ковзаючі контакти від ЄНЕ між індуктором і якорями виникають ЕДЗ відштовхування, що призводить до переміщення РЕЯ відносно індуктора, який, в свою чергу, відштовхується від НЕЯ. При цьому виникає питання про вплив геометричних параметрів ЕЯ на електромеханічні процеси в ЛІЕП-Е2 швидкісного призначення. Оскільки радіальні розміри якорів, як правило, відповідають радіальним розмірам індуктора, то виникає питання про вплив аксіальних розмірів якорів на силові і швидкісні показники ЛІЕП.

Математична модель ЛІЕП. Оскільки в ЛІЕП-Е2 відсутні феромагнітні елементи, то для дослідження впливу основних параметрів на робочі показники доцільно використати колову модель. Розглянемо математичну модель, яка описує електромеханічні процеси ЛІЕП з використанням зосереджених параметрів активних елементів ОІ, НЕЯ та РЕЯ [109]:

$$i_1 R_1(T_1) + L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C}\int i_1 dt + M_{12}(z)\frac{di_2}{dt} + M_{13}(z)\frac{di_3}{dt} +$$
$$+ v_{12}(t) i_2 \frac{dM_{12}}{dz} + v_{13}(t) i_3 \frac{dM_{13}}{dz} = 0;\ \frac{1}{C}\int_0^t i_1 dt = U_0; \qquad (3.3)$$

$$i_2 R_2(T_2) + L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{12}(z) \frac{di_1}{dt} + M_{23}(z) \frac{di_3}{dt} + i_1 \xi_1 + i_3 \xi_3 = 0; \quad (3.4)$$

$$i_3 R_3(T_3) + L_3 \frac{di_3}{dt} + M_{13}(z) \frac{di_1}{dt} + M_{23}(z) \frac{di_2}{dt} + i_1 \xi_2 + i_2 \xi_3 = 0; \quad (3.5)$$

$$i_1 i_3 \frac{dM_{13}}{dz} = i_1 i_2 \frac{dM_{12}}{dz} + (m_1 + m_2 + m_e) \frac{dv_{13}}{dt} + K_T v_{13}(t); \quad (3.6)$$

$$i_1 i_2 \frac{dM_{12}}{dz} = i_2 i_3 \frac{dM_{23}}{dz} + (m_2 + m_e) \frac{dv_{12}}{dt} + K_T \cdot (v_{13}(t) + v_{12}(t)) +$$

$$+ 0{,}125 \pi \gamma_a \beta_a D_{2m}^2 [v_{12}(t) + v_{13}(t)]^2 + K_P [\Delta z_{12}(t) + \Delta z_{13}(t)], \quad (3.7)$$

де $\xi_1 = v_{12}(t) \frac{dM_{12}}{dz}$; $\xi_2 = v_{13}(t) \frac{dM_{13}}{dz}$; p=1, 2, 3 – індекси ОІ, РЕЯ та НЕЯ; $\xi_3 = (v_{12}(t) + v_{13}(t)) \frac{dM_{23}}{dz}$; $R_p(T_p)$, L_p, i_p – опір, індуктивність та струм p-ого активного елемента; $M_{12}(z)$, $M_{13}(z)$, $M_{23}(z)$ – взаємоіндуктивності між відповідними p-ми активними елементами; $v_{13}(t)$, $v_{12}(t)$ – швидкості ОІ відносно НЕЯ та РЕЯ відносно ОІ вздовж осі z; $\Delta z_{13}(t)$, $\Delta z_{12}(t)$ – переміщення ОІ відносно НЕЯ та РЕЯ відносно ОІ; m_1, m_2, m_e – маса ОІ, РЕЯ та ВЕ відповідно.

Спільне рішення рівнянь (3.3) – (3.5) призводить до одного диференційного рівняння:

$$a_4 \frac{d^4 i_1}{dt^4} + a_3 \frac{d^3 i_1}{dt^3} + a_2 \frac{d^2 i_1}{dt^2} + a_1 \frac{di_1}{dt} + a_0 = 0, \quad (3.8)$$

де $a_4 = L_1 b_1 + M_{13} d_2 + M_{12} d_3$; $a_3 = R_1 b_1 + R_2 b_2 + R_3 b_3 + 2(e_1 d_1 + e_2 d_2 + e_3 d_3)$;

$a_2 = b_1 / C + L_1 (R_2 R_3 - e_1^2) + L_2 (R_1 R_3 - e_2^2) + L_3 (R_1 R_2 - e_3^2) +$

$+ 2[M_{12}(e_1 e_2 - R_3 e_3) + M_{13}(e_1 e_3 - R_2 e_2) + M_{23}(e_2 e_3 - R_1 e_1)]$;

$a_1 = R_1 (R_2 R_3 - e_1^2) + e_2 (e_1 e_3 - R_2 e_2) + e_3 (e_1 e_2 - R_3 e_3) + (R_2 L_3 + R_3 L_2 - 2 M_{23} e_1) / C$;

$a_0 = (R_2 R_3 - e_1^2) / C$; $b_1 = L_2 L_3 - M_{23}^2$; $b_2 = L_1 L_3 - M_{13}^2$; $b_3 = L_1 L_2 - M_{12}^2$;

$d_1 = M_{12} M_{13} - L_1 M_{23}$; $d_2 = M_{12} M_{23} - L_2 M_{13}$; $d_3 = M_{13} M_{23} - L_3 M_{12}$;

$e_1 = (v_{13} + v_{12}) \frac{dM_{23}}{dz}$; $e_2 = v_{13} \frac{dM_{13}}{dz}$; $e_3 = v_{12} \frac{dM_{12}}{dz}$.

Характеристичне рівняння для диференційного рівняння (3.8):

$$a_4x^4 + a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0 = 0, \tag{3.9}$$

за допомогою заміни $\varpi = x + 0{,}25a_3/a_4$ переводиться в приведену форму з кубічною резольвентою:

$$\varpi^3 + q_1 \cdot \varpi^2 + q_2 \cdot \varpi - q_3^2 = 0, \tag{3.10}$$

де $q_1 = 2\frac{a_2}{a_4} - 0{,}75\left(\frac{a_3}{a_4}\right)^2$; $q_2 = 3\left(\frac{a_3}{2 \cdot a_4}\right)^4 - \frac{a_3^2 \cdot a_2}{a_4^3} + \frac{a_1 \cdot a_3 + a_2^2}{a_4^2} - 4\frac{a_0}{a_4}$;

$q_3 = \left(\frac{a_3}{2 \cdot a_4}\right)^3 - 0{,}5\frac{a_2 \cdot a_3}{a_4^2} + \frac{a_1}{a_4}$.

Якщо дискримінант резольвенти:

$$D = (u/3)^3 - (v/2)^2, \tag{3.11}$$

де $u = q_2 - q_1^2/3$; $v = 2 \cdot q_1^3/27 - q_1 \cdot q_2/3 - q_3^2$,

менше нуля, то, використовуючи тригонометричне рішення для рівняння (3.10), отримуємо:

$$\varpi_p = 2 \cdot \sqrt[3]{\left(-\frac{u^3}{27}\right)^{0,5}} \cos\left(\frac{2\pi(p-1)}{3} + \frac{\arccos\left(-0{,}5v\sqrt{-27/a_3^3}\right)}{3}\right). \tag{3.12}$$

Корені рівняння (3.9) дорівнюють:

$$x_l = 0{,}5 \cdot \left(\pm\sqrt{\varpi_1} \pm \sqrt{\varpi_2} \pm \sqrt{\varpi_3}\right) - 0{,}25 \cdot a_3/a_4, \tag{3.13}$$

де l = 1, 2, 3, 4.

Якщо всі корні (3.13) дійсні, то струми в p-их активних елементах ЛІЕП-Е2 визначаються рівнянням:

$$i_p = \frac{U_0 \iota}{a_4 \vartheta}, \tag{3.14}$$

де $\iota = A_{p1}\exp(x_1 t) + A_{p2}\exp(x_2 t) + A_{p3}\exp(x_3 t) + A_{p4}\exp(x_4 t)$;

$\vartheta = \gamma_{21}\gamma_{43}(\delta_{21}+\delta_{43}) + \gamma_{24}\gamma_{31}(\delta_{24}+\delta_{31}) + \gamma_{32}\gamma_{41}(\delta_{32}+\delta_{41})$,

$A_{p1} = \gamma_{32}(\alpha_4 - \Theta_p\delta_{32}) + \gamma_{24}(\alpha_3 - \Theta_p\delta_{24}) + \gamma_{43}(\alpha_2 - \Theta_p\delta_{43})$;

$A_{p2} = \gamma_{13}(\alpha_2 - \Theta_p\delta_{13}) + \gamma_{41}(\alpha_3 - \Theta_p\delta_{41}) + \gamma_{34}(\alpha_1 - \Theta_p\delta_{34})$;

$A_{p3} = \gamma_{21}(\alpha_4 - \Theta_p\delta_{21}) + \gamma_{42}(\alpha_1 - \Theta_p\delta_{42}) + \gamma_{14}(\alpha_2 - \Theta_p\delta_{14})$;

$A_{p4} = \gamma_{12}(\alpha_3 - \Theta_p\delta_{12}) + \gamma_{31}(\alpha_2 - \Theta_p\delta_{31}) + \gamma_{23}(\alpha_1 - \Theta_p\delta_{23})$; $n = 2, 3$; $m = 5 - n$;

$\gamma_{kl} = x_k - x_l$; $\alpha_k = (\Lambda_p x_k - \Xi_p)x_k^2$; $\delta_{kl} = x_k^2 x_l^2$; $\Theta_1 = -b_1$;

$\Theta_n = -d_m$; $\Lambda_1 = \zeta_1 / a_4$; $\Lambda_n = \zeta_n / a_4$;

$\Xi_1 = \left[a_4 b_1^2 / C - \zeta_1(R_1 b_1 + e_2 d_2 + e_3 d_3) - \zeta_2(R_2 d_3 + e_3 b_1 + e_1 d_2) - \zeta_3(R_3 d_2 + e_2 b_1 + e_1 d_3)\right] / a_4^2$;

$\Xi_n = [a_4 b_1 d_m / C - \zeta_1(R_1 d_m + e_m b_n + e_n d_1) - \zeta_n(R_n b_n + e_m d_m + e_1 d_1)$

$-\zeta_m(R_m d_1 + e_n d_m + e_1 b_n)] / a_4^2$;

$\zeta_1 = R_1 b_1^2 + R_2 d_3^2 + R_3 d_2^2 + 2[b_1(e_2 d_2 + e_3 d_3) + e_1 d_2 d_3]$;

$\zeta_n = d_m(R_1 b_1 + R_n b_n) + R_m d_1 d_n + e_m(b_1 b_n + d_m^2) - (e_n b_1 + e_1 d_m) \times$

$\times L_1 M_{nm} - L_n M_{1m}(e_n d_m + e_1 b_n) - L_m M_{1n}(e_1 d_1 + e_n d_n)$.

Якщо дискримінант резольвенти (3.11) більшу нуля, то за допомогою рішення Кардано для рівняння (3.10) отримуємо один дійсний та два комплексно спряжених кореня:

$$\varpi_1 = \phi + \zeta - q_1/3; \varpi_{2,3} = \varepsilon \pm j\chi, \tag{3.15}$$

де $\phi = \sqrt[3]{-0{,}5 \cdot v + \sqrt{D}}$; $\zeta = \sqrt[3]{-0{,}5 \cdot v - \sqrt{D}}$; $\varepsilon = -0{,}5 \cdot (\phi + \zeta) - q_1/3$; $\chi = 0{,}5 \cdot \sqrt{3}(\phi - \zeta)$.

В цьому випадку корні рівняння (3.9) мають вигляд:

$$x_{1,2} = 0{,}5 \cdot \sqrt{\varpi_1} - 0{,}25 \cdot a_3 / a_4 \pm \sqrt{0{,}5 \cdot \left(\varepsilon + \sqrt{\varepsilon^2 + \chi^2}\right)};\ x_{3,4} = \sigma \pm j\xi\,, \quad (3.16)$$

де $\sigma = 0{,}5 \cdot \sqrt{\varpi_1} - 0{,}25 \cdot a_3 / a_4$; $\xi = \sqrt{0{,}5 \cdot \left(-\varepsilon + \sqrt{\varepsilon^2 + \chi^2}\right)}$.

Якщо корні x_1 та x_2 дійсні і різні, то струми в p-их активних елементах ЛІЕП-Е2 можна представити у вигляді:

$$i_p = \frac{U_0 \lambda}{a_4 \aleph}, \quad (3.17)$$

де $\aleph = x_1 x_2 \left(3\sigma^2 - 2\sigma\chi_1 - \xi^2 + x_1 x_2\right) + \chi_2(\chi_2 + \chi_3 - 2\sigma\chi_1)$;

$\lambda = B_{p1} \exp(x_1 t) + B_{p2} \exp(x_2 t) + \exp(\sigma \cdot t)\left[B_{p3} \cos(\xi t) + B_{p4} \sin(\xi t)\right]$;

$B_{p1} = \left\{\Theta_p \left[x_2{}^2 \left(3\sigma^2 - \xi^2 - 2x_2\sigma\right) - \chi_2^2\right] + \Lambda_p \left[2\sigma\chi_2 - x_2\left(3\sigma^2 - \xi^2 - x_2^2\right)\right] -\right.$

$\left. - \Xi_p \left[(\sigma - x_2)^2 + \xi^2\right]\right\} / (x_2 - \xi)$;

$B_{p2} = \left\{\Theta_p \left[\chi_2^2 + \sigma^2\left(\xi^2 - 3\sigma^2 + 2x_1\sigma\right)\right] + \Lambda_p \left[x_1\left(3\sigma^2 - \xi^2\right) - 2\sigma\chi_2\right] +\right.$

$\left. \Xi_p (\chi_2 - 2x_1\sigma)\right\} / (x_2 - \xi)$;

$B_{p3} = \Theta_p \left[\left(\xi^2 - 3\sigma^2\right)\chi_1 + 2\sigma\chi_3\right] + \Lambda_p \left[\left(3\sigma^2 - \xi^2\right) - \chi_3\right] + \Xi_p(\chi_1 - 2\sigma)$;

$B_{p4} = \left\{\Theta_p \left[\chi_3\left(\xi^2 - \sigma^2\right) + \chi_1\sigma\left(\sigma^2 - 3\xi^2\right) + x_1^2 x_2^2\right] + \Lambda_p (\chi_3\sigma -\right.$

$\left. - x_1 x_2 \chi_1 + 3\sigma\xi^2 - \sigma^3\right) + \Xi_p \left(\sigma^2 - \xi^2 + x_1 x_2 - \sigma\xi_1\right)\right\} / \xi$;

$\chi_1 = x_1 + x_2$; $\chi_2 = \sigma^2 + \xi^2$; $\chi_3 = x_1^2 + x_1 x_2 + x_2^2$.

Переміщення ОІ відносно НЕЯ та переміщення РЕЯ відносно ОІ на основі рівнянь (3.6) та (3.7) можна представити у вигляді рекурентних співвідношень:

$$\Delta z_{13}(t_{k+1}) = \left[i_1(t_k) \left(i_3(t_k) \frac{dM_{13}}{dz} - i_2(t_k) \frac{dM_{12}}{dz} \right) - K_T v_{13}(t_k) \right] \times$$

$$\times 0{,}5\frac{\Delta t^2}{m_1+m_2+m_e}+\Delta z_{13}(t_k)+v_{13}(t_k)\Delta t\,, \tag{3.18}$$

$$\Delta z_{12}(t_{k+1})=\Delta z_{12}(t_k)+v_{12}(t_k)\Delta t+\frac{\Delta t^2}{2\left(m_2+P\right)}\times$$

$$\times\left[\left(i_1(t_k)\frac{dM_{12}}{dz}-i_3(t_k)\frac{dM_{23}}{dz}\right)i_2(t_k)-K_T\left(v_{12}(t_k)+v_{13}(t_k)\right)-\right.$$

$$\left.-0{,}125\cdot\pi\cdot\beta_a\gamma_a D_{2m}^2\left[v_{12}(t_k)+v_{13}(t_k)\right]^2-K_P\left(\Delta z_{12}(t_k)+\Delta z_{13}(t_k)\right)\right]. \tag{3.19}$$

Температуру *p*-ого активного елемента при переміщенні РЕЯ та ОІ можна описати рекурентним співвідношенням:

$$T_p(t_{k+1})=T_p(t_k)\chi+(1-\chi)\left[T_0+4\pi^{-2}i_p(t_k)R_p(T_n)\alpha_{Tp}^{-1}\times\right.$$

$$\left.\times D_{ep}^{-1}H_p^{-1}\left(D_{ep}^2-D_{ip}^2\right)^{-1}\right], \tag{3.20}$$

де $\chi=\exp\left\{-0{,}25\Delta t D_{ep}\alpha_{Tp}c_p^{-1}(T_p)\gamma_p^{-1}\right\}$; D_{ep}, D_{ip} – зовнішній та внутрішній діаметри *p*-ого активного елемента відповідно; α_{Tp} – коефіцієнт тепловіддачі *p*-ого активного елемента; c_p – теплоємність *p*-ого активного елемента.

Початкові умови системи рівнянь (3.3) – (3.20):

$T_p(0) = T_0$ – температура *p*-ого активного елемента;

$i_p(0) = 0$ – струм *p*-ого активного елемента;

$\Delta z(0) = 1$ мм – початкова відстань між якорями та ОІ;

$u_c(0) = U_0$ – напруга ЄНЕ;

$v_z(0) = 0$ – швидкість РЕЯ вздовж осі *z*.

Розглянемо ЛІЕП-Е2 з параметрами: ОІ має зовнішній діаметр $D_{\text{ex1}} = 100$ мм, внутрішній діаметр $D_{\text{in1}} = 10$ мм, висоту $H_1 = 10$ мм. ОІ має $N_1 = 46$ шт. витків мідної шини поперечним перетином $a\times b = 1{,}8\times4{,}8$ мм^2. Обидва ЕЯ виконані у формі диска з технічної міді з зовнішнім діаметром $D_{\text{ex2,3}} = 100$ мм, внутрішним діаметром $D_{\text{in2,3}} = 10$ мм та висотою

$H_2 = H_3$ = 3–7 мм. ЄНЕ має ємність C = 500 мкФ та напругу U_0 = 1,0 кВ. ВЕ має масу m_e = 1,0 кг.

Розглянемо вплив висоти ЕЯ на електромеханічні процеси перетворювача ЛІЕП-Е2. Висоту рухомого електропровідного якоря будемо оцінювати безрозмірним геометричним параметром $h_2^* = H_2 \cdot H_1^{-1}$, а висоту нерухомого електропровідного якоря – параметром $h_3^* = H_3 \cdot H_1^{-1}$. Розглянемо електромеханічні характеристики ЛІЕП-Е2, що мають різні співвідношення висот НЕЯ і РЕЯ. На рис. 3.11 представлені електромеханічні характеристики ЛІЕП-Е2, у якого висота НЕЯ в два рази більше висоти РЕЯ (параметри якорів h_2^* = 0,3, h_3^* = 0,6) [110]. Струм в ОІ густиною j_1 має коливально-затухаючий характер. Амплітуда струму ОІ становить j_{1m} = 448 А/мм^2. В початковий момент робочого процесу густини струмів в РЕЯ j_2 і в НЕЯ j_3 мають протилежну до індуктора полярність. Амплітуда струму в РЕЯ становить j_{2m} = 554,6 А/мм^2, а в НЕЯ j_{3m} = 303 А/мм^2. Внаслідок взаємодії струмів на РЕЯ діють ЕДЗ відштовхування f_{z2}, амплітуда яких складає f_{z2m} = 13,6 кН.

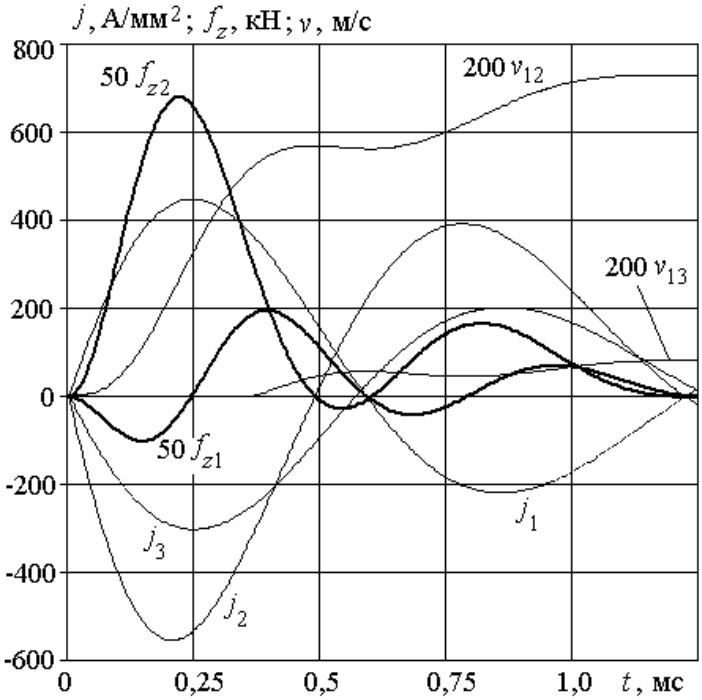


Рисунок 3.11 – Електромеханічні характеристики ЛІЕП-Е2 швидкісного призначення з геометричними параметрами якорів h_2^* = 0,3; h_3^* = 0,6

В інтервалі часу 0,5–0,65 мс ЕДЗ змінюють напрямок, після чого відбувається повторний сплеск зусиль відштовхування, але значно менший за розміром, в порівнянні з початковим. В результаті РЕЯ переміщається щодо ОІ зі швидкістю v_{12}, максимальна величина якої становить V_{12m} = 3,65 м/с. На ОІ в початковий момент часу діють негативні ЕДЗ f_{z1}, які притискають її до НЕЯ. Однак через 0,25 мс ці ЕДЗ, змінюючи напрямок, відштовхують ОІ від НЕЯ з амплітудою f_{z1m} = 3,9 кН. В результаті ОІ переміщається щодо НЕЯ зі швидкістю v_{13}, максимальна величина якої становить V_{13m} = 0,4 м/с. Причому переміщення індуктора починається з затримкою 0,35 мс. Максимальна швидкість РЕЯ щодо НЕЯ становить V_{23m} = 4,05 м/с. На рис. 3.12 представлені електромеханічні характеристики ЛІЕП-Е2, у якого висота РЕЯ в два рази більше висоти НЕЯ (параметри якорів h_2^* = 0,6, h_3^* = 0,3).

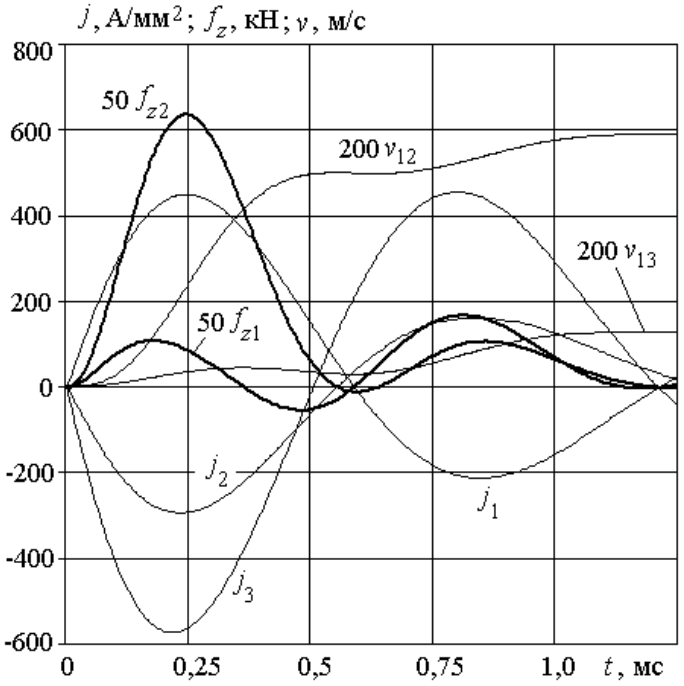


Рисунок 3.12 – Електромеханічні характеристики ЛІЕП-Е2 швидкісного призначення з геометричними параметрами якорів h_2^* = 0,6; h_3^* = 0,3

В даному ЛІЕП-Е2, як і в розглянутому вище, зберігається характер протікання струмів. Амплітуда густини струму в ОІ незначно збільшується до j_{1m} = 450,1 А/мм^2. Амплітуда густини струму в РЕЯ зменшується до

j_{2m} = 294,3 А/мм^2, а в НЕЯ амплітуда густини струму підвищується до j_{3m} = 573 А/мм^2. Внаслідок цього амплітуда ЕДЗ відштовхування, що діють на РЕЯ, зменшується до f_{z2m} = 12,7 кН, а максимальна швидкість переміщення РЕЯ відносно індуктора зменшується до величини V_{12m} = 2,95 м/с.

Однак в даному ЛІЕП-Е2 на ОІ в початковий момент часу діють позитивні ЕДЗ f_{z1}, які відштовхують його від НЕЯ, і переміщення починається приблизно через 0,1 мс. При цьому амплітуда цих сил спостерігається в другому піку відштовхування, досягаючи f_{z1m} = 2,18 кН. В результаті ОІ переміщається щодо НЕЯ зі швидкістю v_{13}, максимальна величина яких становить V_{13m} = 0,63 м/с. Максимальна швидкість РЕЯ відносно НЕЯ становить V_{23m} = 3,58 м/с. Зменшення швидкості РЕЯ можна пояснити його підвищеною масою. Розглянемо варіант ЛІЕП-Е2 швидкісного призначення, у якого висоти НЕЯ і РЕЯ рівні. На рис. 3.13 представлені електромеханічні характеристики цього ЛІЕП з параметрами h_2^* = 0,4, h_3^* = 0,4.

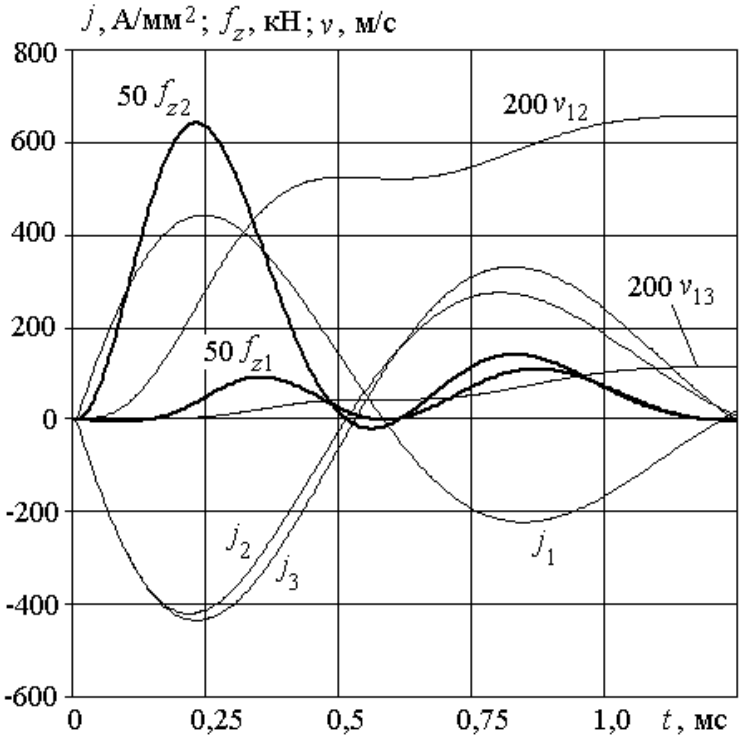
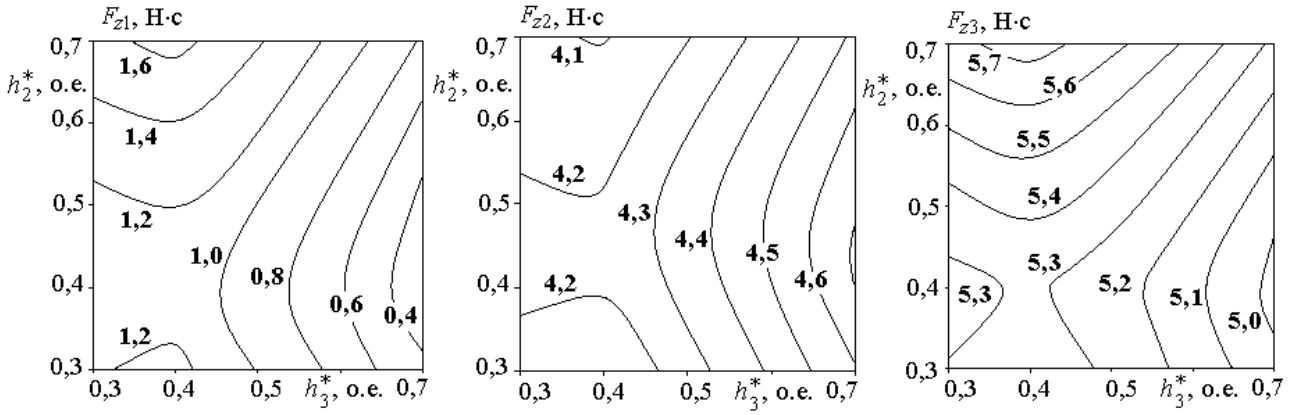


Рисунок 3.13 – Електромеханічні характеристики ЛІЕП-Е2 швидкісного призначення з геометричними параметрами якорів h_2^* = 0,4; h_3^* = 0,4

В даному ЛІЕП амплітуда густини струму в ОІ становить j_{1m} = 442,8 А/мм^2. Струми в якорях особливо на початковій стадії процесу, де відсутнє переміщення індуктора і РЕЯ, практично однакові. Амплітуда густини струму в РЕЯ становить j_{2m} = 420,3 А/мм^2, а в НЕЯ j_{3m} = 434,8 А/мм^2. Амплітуда ЕДЗ відштовхування, що діють на РЕЯ, становить f_{z2m} = 12,8 кН, що призводить до його переміщення щодо індуктора зі швидкістю, максимальна величина якої становить V_{12m} = 3,28 м/с. В даному ЛІЕП-Е2 на індуктор до моменту часу 0,15 мс практично не діють ЕДЗ f_{z1}. Внаслідок цього, переміщення індуктора щодо НЕЯ починається практично через 0,25 мс. При цьому максимальна величина цих сил спостерігається в другому піку відштовхування і становить лише f_{z1m} = 1,85 кН. В результаті індуктор переміщається щодо НЕЯ зі швидкістю, максимальна величина якої становить V_{13m} = 0,56 м/с. При цьому максимальна швидкість РЯ щодо СЯ становить V_{23m} = 3,84 м/с.

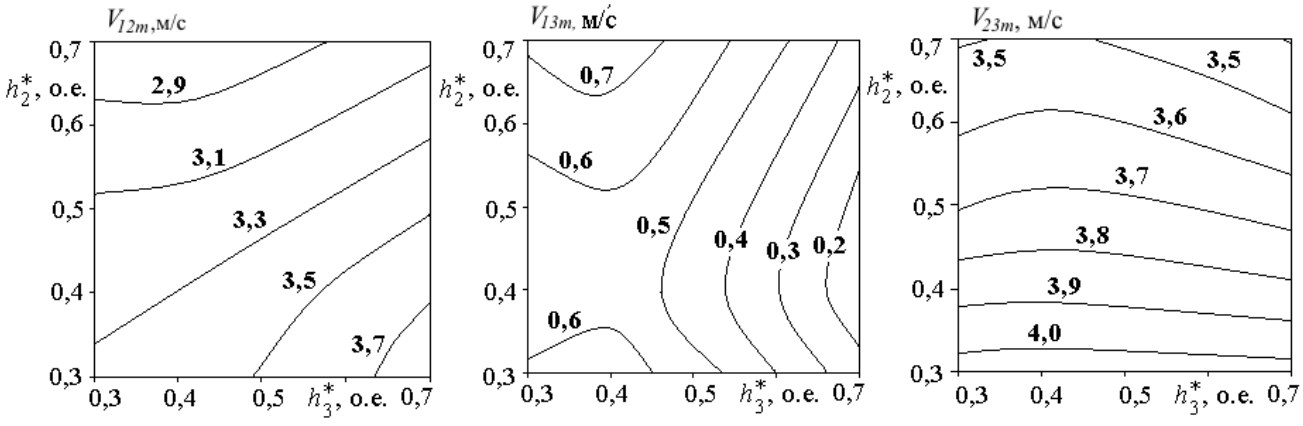
Розглянемо вплив геометричних параметрів НЕЯ $h_2^* \in [0{,}3;0{,}7]$ і РЕЯ $h_3^* \in [0{,}3;0{,}7]$ на величину імпульсу ЕДЗ $F_{zp} = \int f_{zp} dt$, де p = 1, 2, 3 – індекси ОІ, РЕЯ і НЕЯ [111]. Величини імпульсів ЕДЗ, що діють на індуктор F_{z1}, істотно менше, ніж величини імпульсів, що діють на РЕЯ F_{z2} і НЕЯ F_{z3}. Максимальні значення величини імпульсу ЕДЗ F_{z1}, що діють на індуктор, виникають при геометричних параметрах якорів h_3^* = 0,4 і h_2^* = 0,7 (рис. 3.14). Мінімальні значення F_{z1} виникають при h_3^* = 0,7 і h_2^* = 0,4. Найбільша величина імпульсу ЕДЗ F_{z1} при будь-якій висоті РЕЯ реалізується при НЕЯ з параметром h_3^* = 0,4. Найменші значення величини імпульсу ЕДЗ F_{z2}, що діють на РЕЯ, навпаки, виникають при h_3^* = 0,4 (мінімальне значення має місце при високому РЕЯ h_2^* = 0,7). Найбільші значення величини імпульсу ЕДЗ F_{z2} мають місце при h_2^* = 0,42–0,45 (максимальне значення - при високому НЕЯ h_3^* = 0,7) [111].



А *б* *в*

Рисунок 3.14 – Залежність величини імпульсів ЕДЗ, що діють на ОІ (*а*), РЕЯ (*б*) і НЕЯ (*в*) в залежності від співвідношень геометричних параметрів h_2^* і h_3^*

Найбільші значення величини імпульсу ЕДЗ F_{z3}, що діють на НЕЯ, виникають при $h_3^* = 0{,}4$ (максимальне значення має місце при $h_2^* = 0{,}7$). А найбільші значення величини імпульсу ЕДЗ F_{z3} мають місце при $h_2^* = 0{,}4$ (мінімальне значення має місце при $h_3^* = 0{,}7$). Розглянемо вплив геометричних параметрів НЕЯ і РЕЯ на швидкості переміщення ОІ і РЕЯ, що реалізуються в кінці робочого процесу рис. 3.15 [111]. Максимальне значення швидкості РЕЯ відносно індуктора V_{12m} реалізується при мінімальній його висоті $h_2^* = 0{,}3$ і максимальній висоті НЕЯ $h_3* = 0{,}7$. А мінімальне значення швидкості РЕЯ відносно індуктора V_{12m} реалізується при максимальній його висоті $h_2^* = 0{,}7$ і мінімальній висоті НЕЯ $h_3^* = 0{,}3$.



А *б* *в*

Рисунок 3.15 – Залежність швидкостей РЕЯ щодо ОІ (*а*), ОІ щодо НЕЯ (*б*) і РЕЯ щодо НЕЯ (*в*) в залежності від співвідношень геометричних параметрів h_2* і h_3^*

У свою чергу найбільші значення швидкостей переміщення ОІ щодо НЕЯ V_{13m} мають місце при відносно невисокому НЕЯ $h_3^* = 0{,}4$ (максимальна швидкість має місце при високому РЕЯ $h_2^* = 0{,}7$). Найменші значення швидкостей V_{13m} реалізуються при $h_2^* = 0{,}45$ (мінімальна швидкість V_{13} має місце при високому НЕЯ $h_3^* = 0{,}7$). Найбільший інтерес представляє швидкість переміщення РЕЯ відносно НЕЯ v_{23}. Як показують розрахунки найбільші швидкості V_{23m} розвиває найбільш низький РЕЯ $h_2^* = 0{,}3$, причому висота НЕЯ на неї практично не впливає. Однак зі збільшенням висоти РЕЯ починає позначатися вплив НЕЯ. В цьому випадку висоту НЕЯ доцільно вибирати з геометричним параметрами $h_3^* = 0{,}4$–$0{,}42$.

Для того щоб більш повно зрозуміти електромеханічні процеси в перетворювачі ЛІЕП-Е2 швидкісного призначення, розглянемо вплив маси виконавчого елемента m_e на його електромеханічні показники. На рис. 3.16 представлені залежності показників ЛІЕП-Е2, що має геометричні параметри якорів $h_2^* = 0{,}5$, $h_3^* = 0{,}5$ від маси виконавчого елемента m_e.

Зі збільшенням маси m_e відбувається істотне зменшення швидкості переміщення ОІ відносно НЕЯ v_{13}, яка вже при масі $m_e = 3{,}0$ кг практично знижується до нуля. Швидкість РЕЯ щодо індуктора v_{12} зі збільшенням маси виконавчого елемента m_e від 0 до 5 кг зменшується з 9,83 м/с до 0,9 м/с.

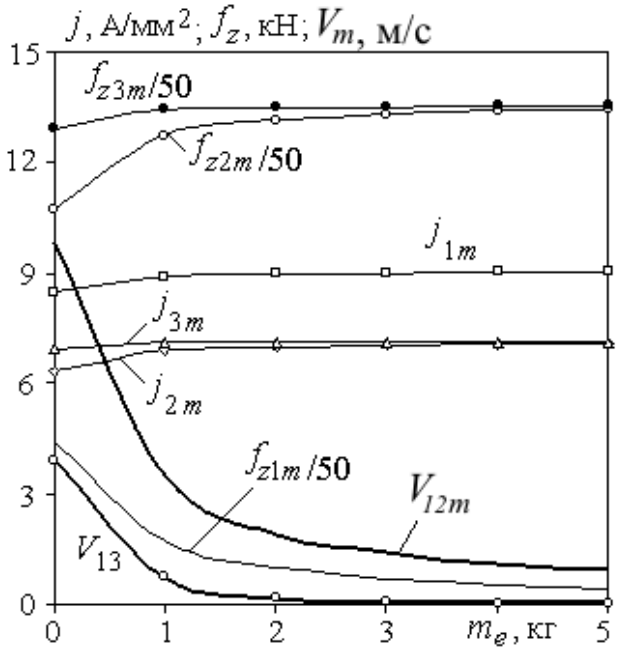


Рисунок 3.16 – Залежність показників ЛІЕП-Е2 швидкісного призначення з параметрами h_2* = 0,5; h_3^* = 0,5 від маси виконавчого елемента

Залежності максимальних значень ЕДЗ, що діють на активні елементи ЛІЕП-Е2, від маси виконавчого елемента мають такі особливості. Зі збільшенням маси m_e амплітуда ЕДЗ, що діють на індуктор f_{z1m}, зменшується, а на якорі збільшується. Причому амплітуда ЕДЗ, що діють на РЕЯ f_{z2m}, менше, ніж аналогічні величини, що діють на НЕЯ f_{z3m}. Однак зі збільшенням маси виконавчого елемента ці зусилля прагнуть до вирівнювання. Очевидно, що при повністю загальмованому РЕЯ ці ЕДЗ будуть рівними. Зі збільшенням маси m_e відбувається збільшення струмів як в індукторі, так і в якорях, особливо сильно в інтервалі 0–1 кг. Це можна пояснити більш сильною індукційною взаємодією індуктора з якорями, які знаходяться в сильному магнітному зв'язку.

Таким чином, встановлено, що:

– якщо висота НЕЯ в два рази більше висоти РЕЯ, то на індуктор в початковий момент часу діють ЕДЗ, які притискають його до НЕЯ, і переміщення індуктора починається з затримкою 0,35 мс. Якщо висота РЕЯ в два рази більше висоти НЕЯ, то на індуктор в початковий момент часу діють ЕДЗ, які відштовхують його від НЕЯ, і його переміщення починається з

затримкою 0,1 мс. Якщо висоти НЕЯ і РЕЯ рівні, то до моменту часу 0,15 мс на індуктор практично не діють ЕДЗ і переміщення індуктора відносно НЕЯ починається з затримкою 0,25 мс;

– значення імпульсів ЕДЗ, що діють на індуктор істотно менші, ніж імпульси ЕДЗ, що діють на якорі;

– найбільші швидкості розвиває найбільш низький РЕЯ, причому висота НЕЯ на них практично не впливає. Однак зі збільшенням висоти РЕЯ починає позначатися вплив НЕЯ. В цьому випадку висоту НЕЯ доцільно вибирати з геометричним параметром $h_З^* = 0{,}4–0{,}42$;

– зі збільшенням маси виконавчого елемента відбувається збільшення струмів в активних елементах ЛІЕП і зменшення швидкостей індуктора і РЕЯ. При цьому максимальні значення ЕДЗ, що діють на індуктор, зменшуються, а на якорі збільшуються. Максимальні ЕДЗ, що діють на РЕЯ менше, ніж аналогічні зусилля, що діють на НЕЯ.

3.5 Експериментальні дослідження ЛІЕП мультиякірних конфігурацій

3.5.1. Техніка та методика експериментальних досліджень ЛІЕП

Для перевірки основних теоретичних положень та результатів розрахунків в лабораторних умовах були проведені дослідження лабораторних зразків ЛІЕП з різними якорями. Експериментальна установка складається з трьох функціональних блоків: живлення, експериментального ЛІЕП, системи вимірювань. Загальний вигляд експериментальної установки представлений на рис. 3.17. Блок живлення експериментальної установки складається з ЄНЕ, сформованого з батареї електролітичних конденсаторів, системи заряду електролітичних конденсаторів та напівпровідникових приладів, призначених для комутації та формування необхідної форми імпульсу збудження [120].

Рисунок 3.17 – Загальний вигляд експериментальної установки: *1* – блок живлення; *2* – эксперименетальний ЛІЕП; *3* – елемент блоку системи вимірювань

Для формування аперіодичного імпульсу струму збудження в експериментальному ЛІЕП використовувалася електрична схема, представлена на рис. 3.18.

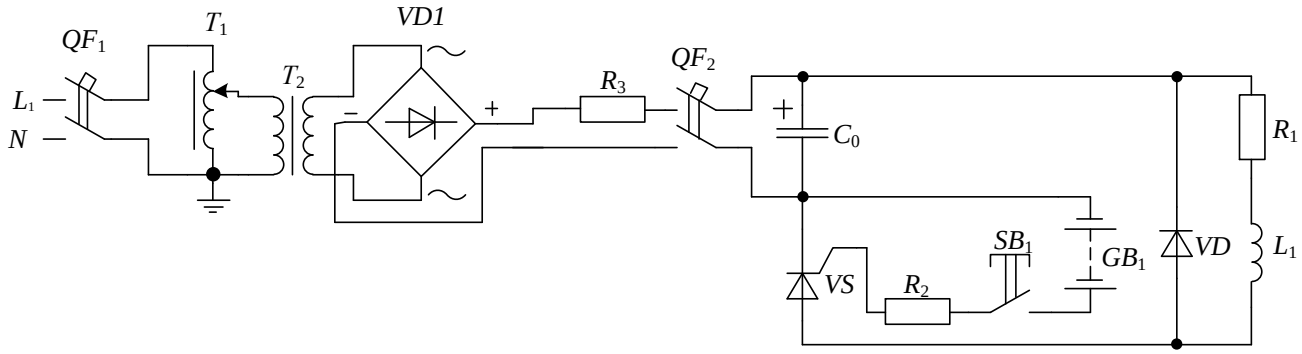


Рисунок 3.18 – Електрична схема формування аперіодичного імпульсу струму збудження в ОІ експериментального ЛІЕП

Дана схема забезпечує основні етапи роботи: заряд ЄНЕ, накопичення електричної енергії в ЄНЕ, розряд ЄНЕ на обмотку індуктора ЛІЕП. Схема включає: автотрансформатор T_1, підвищувальний трансформатор T_2, напівпровіднико-вий випрямляч VD_1, напівпровідниковий ключ VS, пристрій керування напівпровідниковим ключем SB_1, акумулятор GB_1, ЄНЕ C_0, струмообмежувальні резистори R_3, R_2.

Для формування аперіодичного імпульсу збудження з підживленням використовувалася схема, яка представлена на рис. 3.19 без схеми зарядки ЄНЕ. Дана схема забезпечує підключення додаткового ЄНЕ C_1 при напрузі U_1 за допомогою напівпровідникового діода VD_1.

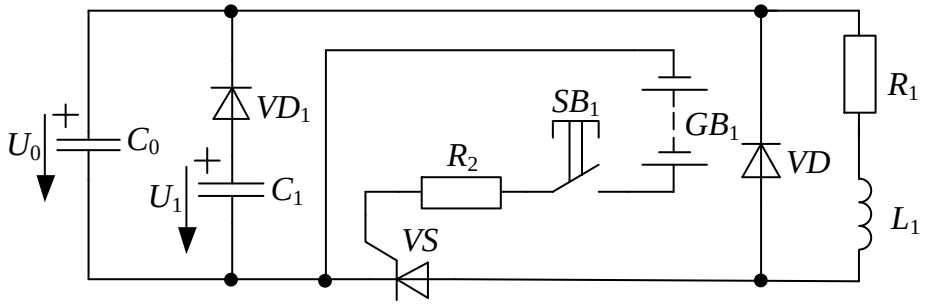


Рисунок 3.19 – Електрична схема формування аперіодичного імпульсу струму збудження з підживленням в ОІ (без схеми зарядки ЄНЕ)

Зовнішній вигляд експериментальної установки з експериментальним ЛІЕП швидкісного призначення, у якого ЕЯ здійснює вертикальне переміщення, представлено на рис. 3.20. В якості ВЕ виступає напрямний шток з диском, до якого приєднується відповідне навантаження. Експериментальна установка комплектується механічними пружинами між диском напрямного штока і гальмівною плитою, які створюють протидіючі зусилля ЛІЕП, а також в циклічному режимі роботи забезпечують повернення ВЕ в початкове положення, при горизонтальному переміщенні ЕЯ (установка кладеться на бік).

Зовнішній вигляд експериментальної установки з ЛІЕП силового призначення представлено на рис. 3.21. В якості ВЕ виступає бойок. Ця експериментальна установка дозволяє досліджувати експериментальний ЛІЕП силового призначення, при незначних переміщеннях ЕЯ або їх відсутності взагалі. Для цього установка комплектується, бойком який здійснює силові імпульси по ударній плиті.

Під час проведення експериментальних досліджень використовувалася система вимірювання параметрів ЛІЕП, яка забезпечує реєстрацію аналогових сигналів від різних датчиків, з наступним відображенням даних на екрані

цифрового осцилографа, та подальшою можливістю передачі інформації на персональний комп’ютер. Експериментальні дослідження ЛІЕП виконувались уніфікованим способом в два етапи. Комплектуючі деталі експериментальної установки, а саме: нерухома котушка з ОІ, рухомі КЯ, ЕЯ, ФЯ, феромагнітний екран та схема живлення були однотипними для всіх варіантів конструктивних схем електромеханічних перетворювачів. Параметри та геометричні розміри зазначених активних елементів ЛІЕП представлені в табл. 2.1.

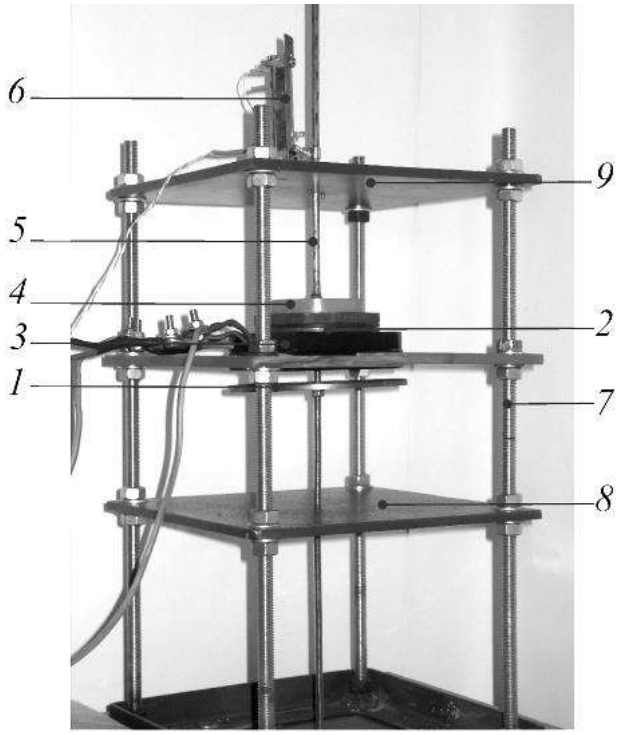


Рисунок 3.20 – Експериментальна установка для дослідження ЛІЕП швидкісного призначення: *1* – котушка з ОІ; *2* – ЕЯ; *3* – ФЯ; *4* – диск напрямного штока; *5* – напрямний шток; *6* – резистивний датчик переміщення; *7* – регулювальні опори; *8* – опорна плита; *9* – гальмівна плита

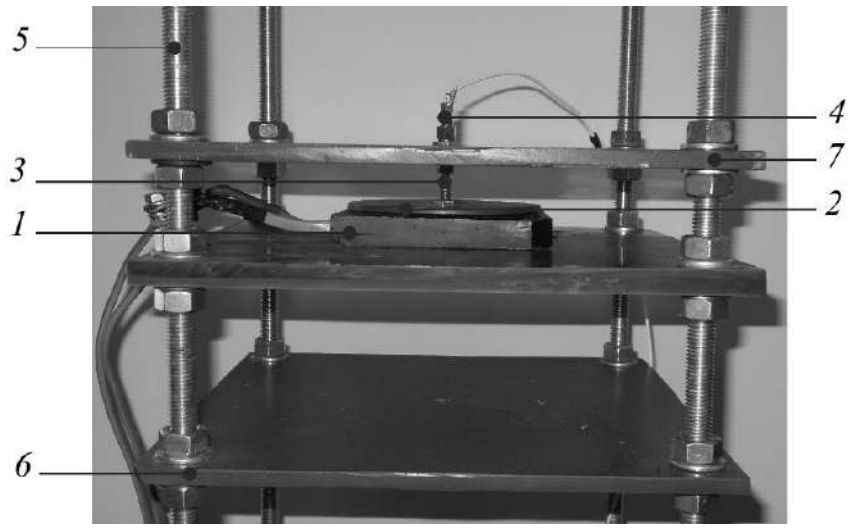
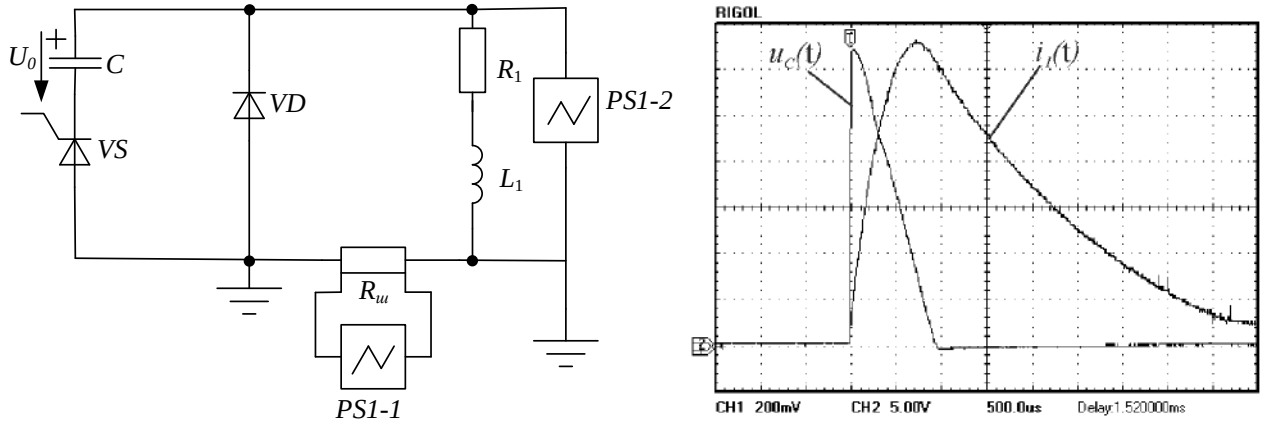


Рисунок 3.21 – Експериментальна установка для дослідження ЛІЕП силового призначення: *1* – котушка з ОІ; *2* – ЕЯ; *3* – бойок; *4* – п'єзодатчик Т-6000; *5* – регулювальні опори; *6* – опорна плита; *7* – ударна плита

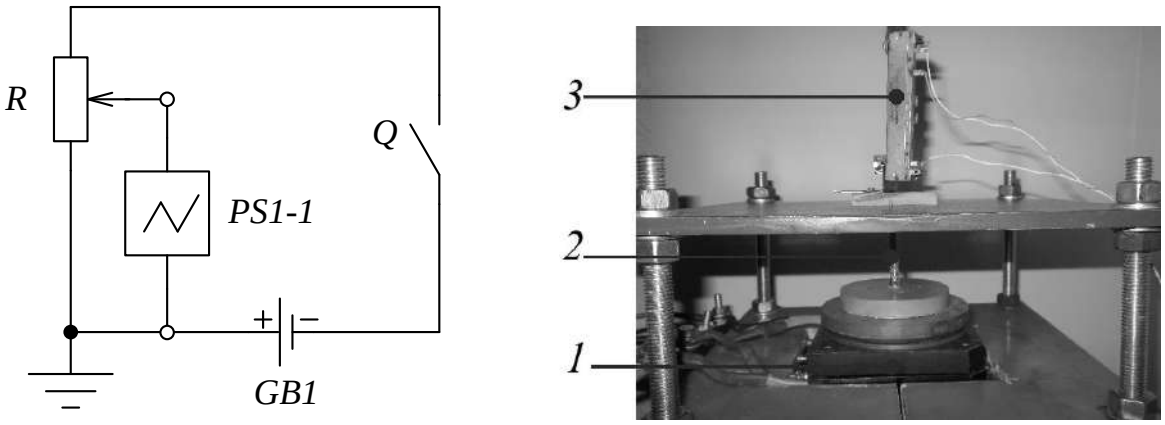
Вимірювання напруги $u_c(t)$ ЄНЕ і струму $i_1(t)$ в ОІ експериментальному ЛІЕП виконувалося за схемою рис. 3.22 *а*. Осцилограма одночасного вимірювання напруги і струму ОІ представлена на рис. 3.22 *б*. В якості реєстратора сигналів *N* використовувався цифровий осцилограф Rigol DS5022M. Датчиком струму являється шунт 75ШСМ, датчиком напруги – цифровий вимірювач PVP2150.



а *б*

Рисунок 3.22 – Електрична схема (*а*) та осцилограма напруги $u_c(t)$ і струму $i_1(t)$ (*б*) в ОІ експериментальному ЛІЕП

Вимірювання динаміки переміщення ЕЯ виконавчим елементом ЛІЕП виконувалося за схемою, представленою на рис. 3.23 *а*.



А *б*

Рисунок 3.23 – Схема вимірювання переміщення виконавчого елемента (*а*), фото експериментальної установки (*б*): *1* – експериментальний ЛІЕП швидкісного призначення; *2* – напрямний шток; *3* – резистивний датчик переміщення

В якості датчика переміщення використовувався змінний резистор повзункового типу СП3-23, який живиться від джерела постійного струму GB_1. Дана схема вимірювань забезпечила відслідковування динаміки переміщення виконавчого елемента Δz з синхронною реєстрацією струму в електричному колі ОІ i_1. Результати реєстрації переміщення ВЕ (напрямного штока) та електричних параметрів відображенні на рис. 3.24 [121].

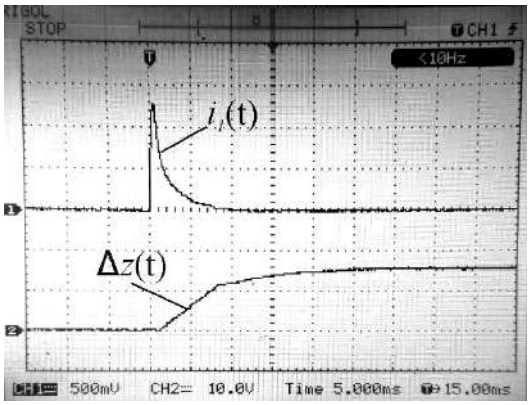
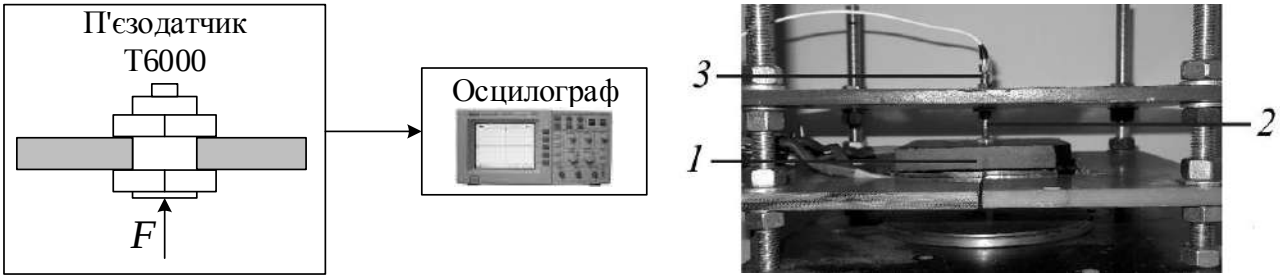


Рисунок 3.24 – Осцилограми переміщення $\Delta z(t)$ виконавчого елементу та струму $i_1(t)$ ОІ експериментального ЛІЕП швидкісного призначення

Реєстрація силового впливу експериментального ЛІЕП силового призначення виконувалася за схемою рис. 3.25 *а*.



А *б*

Рисунок 3.25 – Функціональна схема вимірювання сили п’єзодатчиком Т6000 (а), фото установки з п’єзодатчиком (б): *1* – експериментальний ЛІЕП силового призначення; *2* – бойок; *3* – п’єзодатчик Т6000

В якості датчика силового впливу використовувався п’єзодатчик Т6000. Принцип вимірювання силового впливу виконавчого елементу ЛІЕП заснований на прямому п’єзоефекті. Дана схема вимірювань забезпечила відслідковування динаміки силового впливу виконавчого елементу (бойка) з синхронною реєстрацією струму в ОІ. Результати реєстрації сили виконавчого елементу $f_z(t)$ та струму в ОІ $i_1(t)$ відображенні на рис. 3.26.

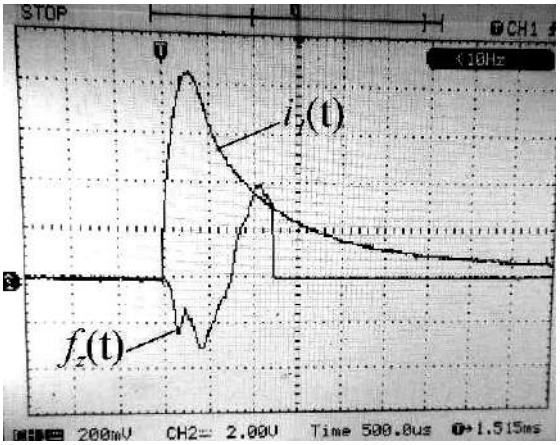


Рисунок 3.26 – Осцилограма сили виконавчого елементу, та струму ОІ експериментального ЛІЕП силового призначення

Для кількісної оцінки індукції магнітного поля розсіювання на певній відстані від експериментального ЛІЕП виконувалися вимірювання за

допомогою індукційного датчика. На рис. 3.27 показані функціональна схема вимірювання та розташування датчика й обмотки індуктора під час вимірювань.

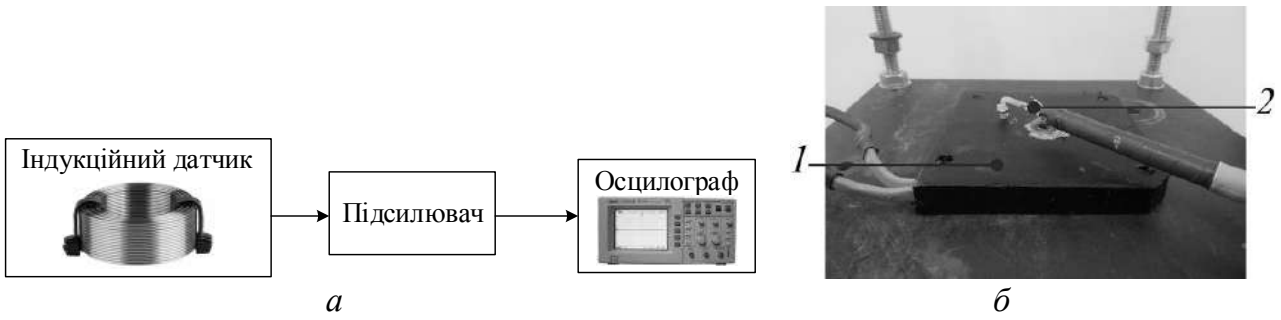


Рисунок 3.27 – Функціональна схема вимірювання індукції магнітного поля в робочій області (*а*), фото розташування індукційного датчика (*б*): *1* – котушка індуктора; *2* – індукційний датчик

На рис. 3.28 *а* зображена осцилограма напруги $u(t)$, отримана з індукційного датчика в процесі протікання аперіодичного струм в ОІ. Згідно індукційного методу вимірювання параметрів магнітного поля отримана напруга була проінтегрована. Отримана функція описує зміну нормальної складової індукції магнітного поля $B_z(t)$ в області розташування індукційного датчика.

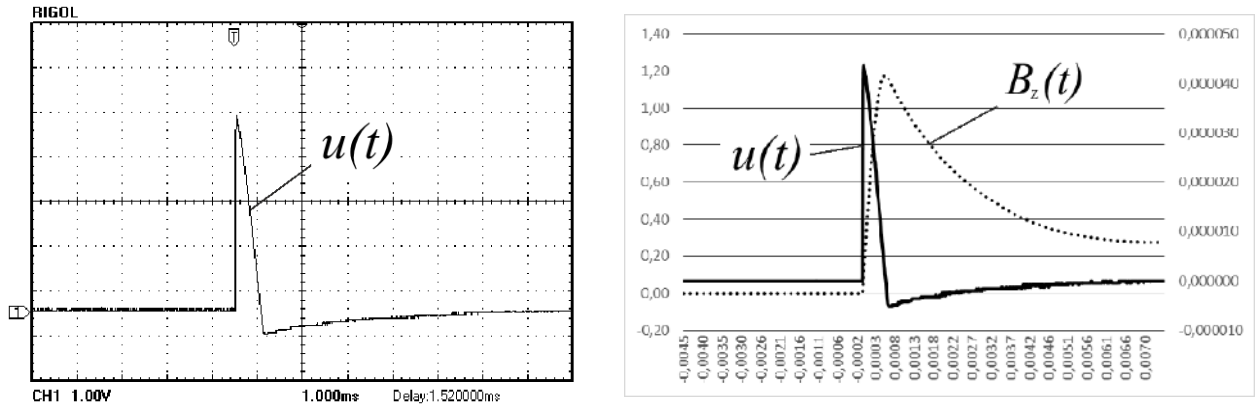
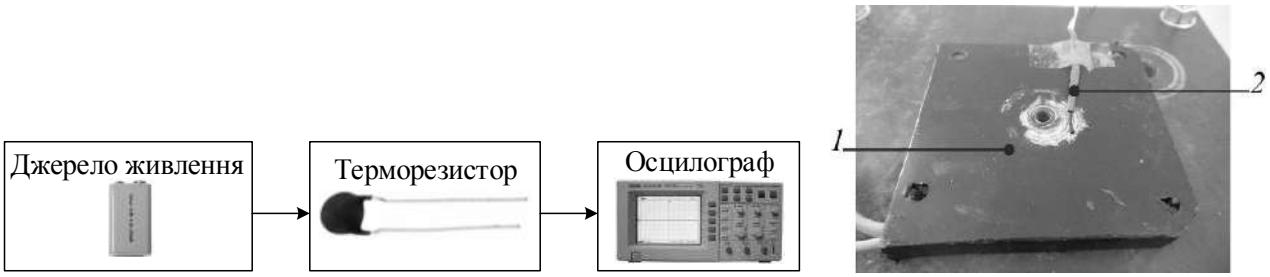


Рисунок 3.28 – Осцилограма вимірювань індукції магнітного поля за допомогою індукційного датчика: *а* – осцилограма напруги $u(t)$ індукційного датчика, *б* – характеристика напруги $u(t)$ та індукції магнітного поля $B_z(t)$

Реєстрація температури на поверхні котушки ОІ експериментального ЛІЕП виконувалася за допомого терморезистора. Функціональна схема вимірювання температури представлена на рис. 3.29 *а*, а розташування терморезистора щодо індуктора відображено на рис. 3.29 *б*.



а *б*

Рисунок 3.29 – Функціональна схема (*а*) та фото вимірювання температури на поверхні котушки індуктора (*б*) експериментального ЛІЕП:
1 – котушка індуктора; *2* – терморезистор

Таким чином, дана методика експериментальних досліджень дозволяє одночасно вимірювати струм в обмотці індуктора, швидкість переміщення виконавчого елементу, силу виконавчого елементу, індукцію магнітного поля та температуру в котушці індуктора під час роботи ЛІЕП.

3.5.2 Результати експериментальних та розрахункових досліджень

Експериментальні дослідження ЛІЕП (рис. 3.30) виконувались уніфікованим способом в два етапи. Комплектуючі деталі експериментальної установки, а саме: нерухома котушка з ОІ, рухомі КЯ, ЕЯ, ФЯ, феромагнітний екран та схема живлення були однотипними для всіх варіантів конструктивних схем електромеханічних перетворювачів (табл. 2.1).

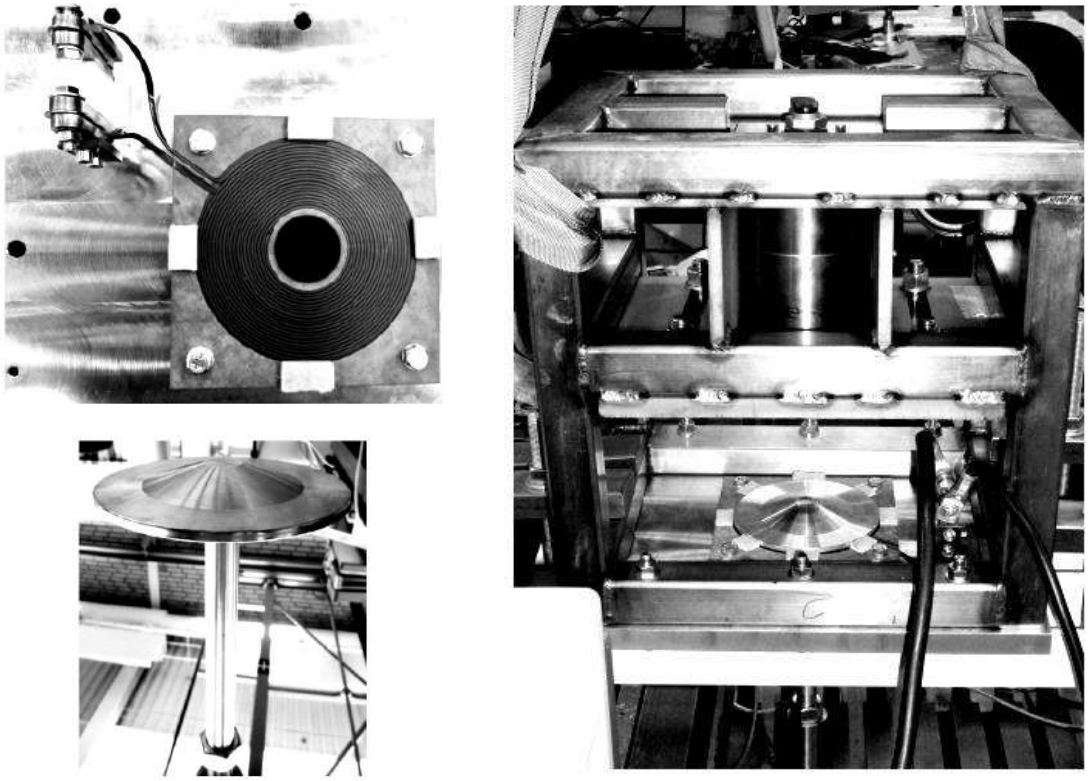


Рисунок 3.30 – Конструктивного виконання ЛІЕП індукційного типу

На рис. 3.31 представлені розрахункові та експериментальні струми в ОІ i_1 ЛІЕП силового призначення з різними конфігураціями якорів при U_0 = 250 В, C_0 = 2500 мкФ. На рис. 3.32 представлено розрахункові та експериментальні струми в ОІ i_1 ЛІЕП-К$_р$-Ф (рис. 3.32 *а*), ЛІЕП-К$_р$-Е (рис. 3.32 *б*), ЛІЕП-К$_р$-Е-Ф (рис. 3.32 *в*). У всіх перетворювачів КЯ паралельно з'єднаний з ОІ.

Як показує порівняльний аналіз розрахункові струми в ОІ з точністю до 4–7 % співпадають з експериментальними струмами в розглянутих перетворювачах, що свідчить про достовірність математичної моделі. Амплітудні значення розрахункових струмів вище, ніж експериментальних струмів на 4,8–5,5 %. Причому на передньому фронті імпульсів спостерігається практично повне співпадіння розрахункових та експериментальних значень струмів, а на задньому фронті імпульсів різниця між цими значеннями збільшується, причому експериментальні струми перевищують розрахункові.

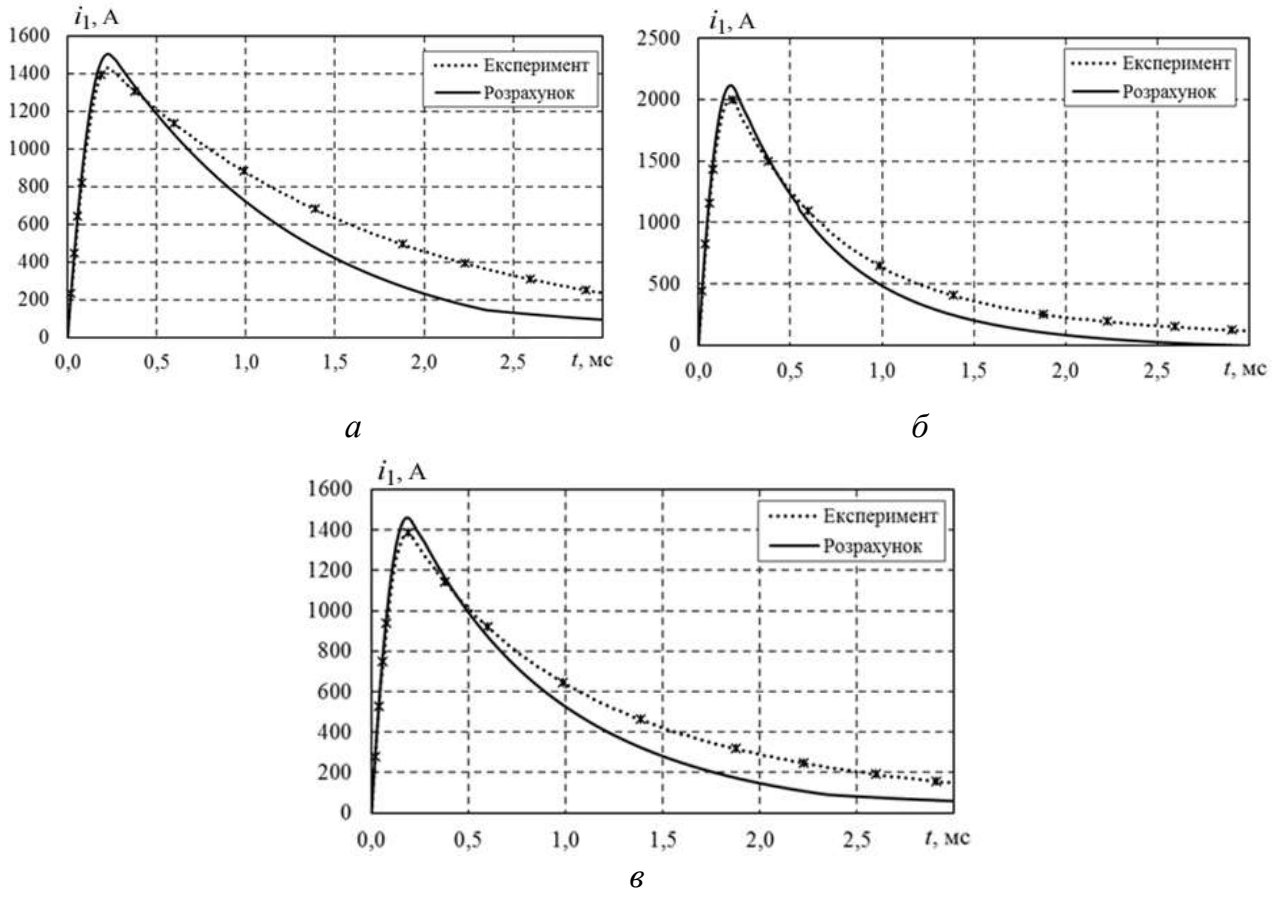


Рисунок 3.31 – Розрахункові та експериментальні струми в ОІ i_1 ЛІЕП-К$_p$-Ф (*а*), ЛІЕП-К$_p$-Е (*б*), ЛІЕП-К$_p$-Е-Ф (*в*) силового призначення при аперіодичному імпульсу збудження при U_0 = 250 В, C_0 = 2500 мкФ

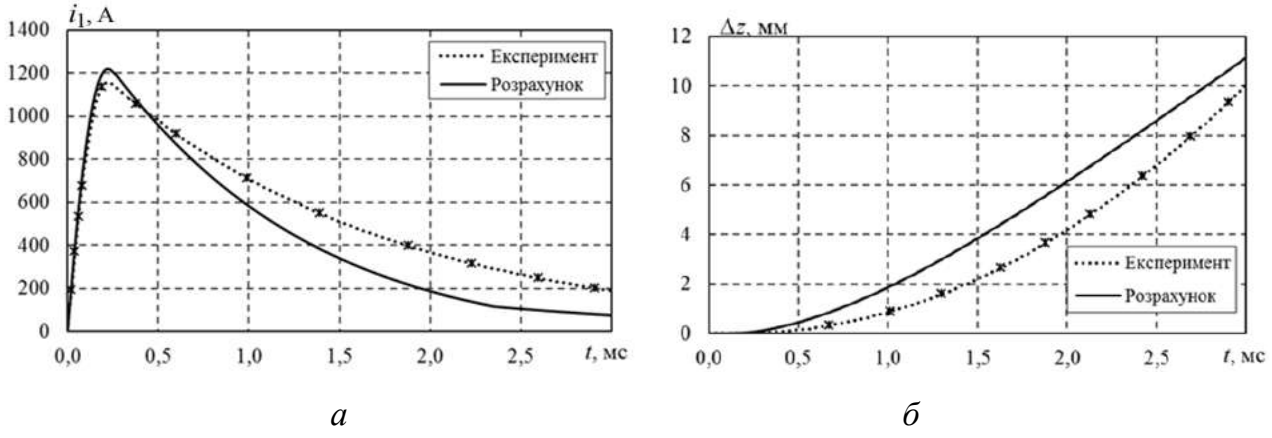


Рисунок 3.32 – Розрахункові та експериментальні струми в ОІ i_1 (*а*) та переміщення виконавчого елементу Δz (*б*) ЛІЕП-К$_p$-Ф швидкісного призначення

Фізичні параметри, які реєструвалися в процесі дослідження: амплітуда струму ОІ I_{1m}, амплітуда сили виконавчого елементу f_{zm} та максимальне

значення аксіальної складової магнітного поля розсіювання B_{zm} для експериментального ЛІЕП силового призначення з різними якорями зведені в табл. 3.1 – 3.3. В цілому також можна зазначити задовільне узгодження між розрахунковими та експериментальними фізичними параметрами експериментального ЛІЕП. Відносні похибки між розрахунковими та експериментальними амплітудами струму ОІ I_{1m} складають 3–7 %. Найбільші значення похибок (6,6 %) спостерігаються у ЛІЕП-Ф при C_0 = 2500 мкФ, а найменші (3 %) у ЛІЕП-Е-Ф при C_0 = 2500 мкФ.

Таблиця 3.1 – Результати вимірювань та розрахунку амплітуди струму ОІ експериментального ЛІЕП силового призначення при U_0 = 250 В

Тип ЛІЕП	Амплітуда струму обмотки індуктора ЛІЕП I_{1m}, А					
	C_0 = 2500 мкФ			C_0 = 5000 мкФ		
	Експери-мент	Розра-хунок	Відносна похибка, %	Експери-мент	Розра-хунок	Відносна похибка, %
ЛІЕП-Е	1120	1178	5,18	1730	1810	4,62
ЛІЕП-Ф	570	610	7,02	810	864	6,67
ЛІЕП-К$_p$	1370	1430	4,38	1830	1910	4,37
ЛІЕП-К$_s$	960	1000	4,17	1350	1415	4,81
ЛІЕП-Е-Ф	1008	1035	2,68	1570	1647	4,90
ЛІЕП-К$_p$-Ф	1420	1485	4,58	1680	1760	4,76
ЛІЕП-К$_s$-Ф	1105	1157	4,71	1390	1455	4,68
ЛІЕП-К$_p$-Е	2000	2085	4,25	2850	2990	4,91
ЛІЕП-К$_s$-Е	1100	1160	5,45	1560	1630	4,49
ЛІЕП-К$_p$-Е-Ф	1380	1453	5,29	2030	2127	4,78
ЛІЕП-К$_s$-Е-Ф	960	997	3,85	1500	1570	4,67

Відносні похибки між розрахунковими та експериментальними амплітудами сили виконавчого елементу f_{zm} складають 5–8 %. Найбільші значення похибок (8 %) спостерігаються у ЛІЕП-К$_p$ при C_0 = 5000 мкФ, а найменші (5 %) – у ЛІЕП-К$_s$ при C_0 = 2500 мкФ. Відносні похибки між розрахунковими та експериментальними амплітудами аксіальної складової

магнітного поля розсіювання B_{zm} складають 8–20 %. Найбільші значення похибок (20 %) спостерігаються у ЛІЕП-К$_s$-Ф, а найменші (8 %) у ЛІЕП-К$_p$-Е-Ф при C_0 = 2500 мкФ.

Таблиця 3.2 – Результати вимірювань та розрахунку амплітуди сили експериментального ЛІЕП силового призначення при U_0 = 250 В

Тип ЛІЕП	Амплітуда сили виконавчого елементу ЛІЕП f_{zm}, Н					
	C_0 = 2500 мкФ			C_0 = 5000 мкФ		
	Експери мент	Розра-хунок	Відносна похибка, %	Експери мент	Розра-хунок	Відносна похибка, %
ЛІЕП-Е	2200	2360	7,27	4590	4990	8,71
ЛІЕП-Ф	380	408	7,37	1150	1250	8,70
ЛІЕП-К$_p$	3550	3815	7,46	8000	8700	8,75
ЛІЕП-К$_s$	1740	1830	5,17	4250	4610	8,47
ЛІЕП-Е-Ф	2600	2780	6,92	6000	6500	8,33
ЛІЕП-К$_p$-Ф	3860	4140	7,25	8850	9540	7,80
ЛІЕП-К$_s$-Ф	1930	2065	6,99	4830	5200	7,66
ЛІЕП-К$_p$-Е	8500	9125	7,35	17300	18100	4,62
ЛІЕП-К$_s$-Е	4200	4510	7,38	8600	9240	7,44
ЛІЕП-К$_p$-Е-Ф	5280	5660	7,20	11250	12150	8,00
ЛІЕП-К$_s$-Е-Ф	3180	3454	8,62	7620	8090	6,17

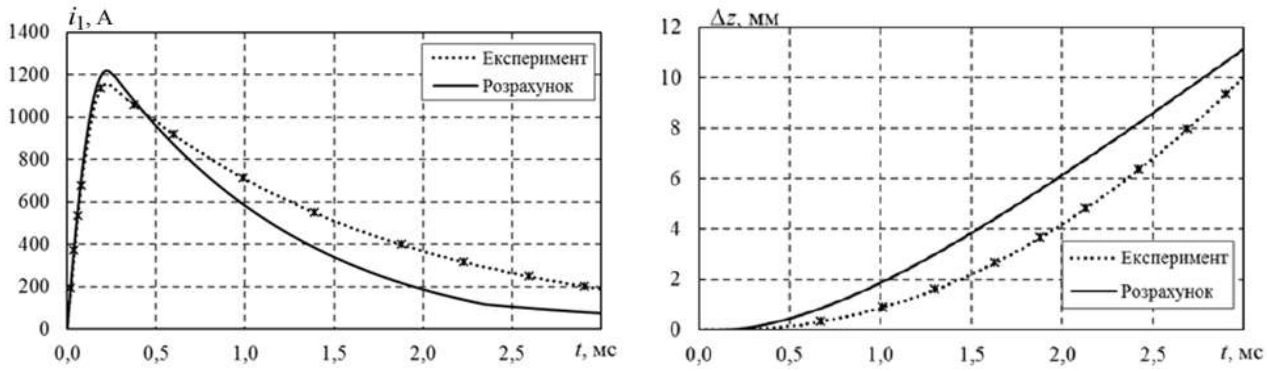
Таким чином, в експериментальних ЛІЕП силового призначення розрахункові та експериментальні показники найбільше (3 %) співпадають для амплітуди струму ОІ I_{1m}, а найменше (20 %) для амплітуди аксіальної складової магнітного поля розсіювання $B_{z\,m}$. При ємності ЄНЕ C_0 = 2500 мкФ відносна похибка між розрахунковими та експериментальними показниками більша (5,3 %), ніж при C_0 = 5000 мкФ (4,2 %).

На рис. 3.33 і рис. 3.34 представлені струми в ОІ i_1 та переміщення Δz виконавчого елементу ЛІЕП швидкісного призначення вертикально вверх з різними конфігураціями якорів. Розрахункові та експериментальні результати отримані при аперіодичному імпульсі збудження від ЄНЕ з параметрами U_0 = 250 В, C_0 = 2500 мкФ.

Таблиця 3.3 – Результати вимірювань та розрахунку максимального значення аксіальної складової магнітного поля розсіювання $B_{z\,m}$ ЛІЕП силового призначення при U_0 = 250 В, C_0 = 2500 мкФ

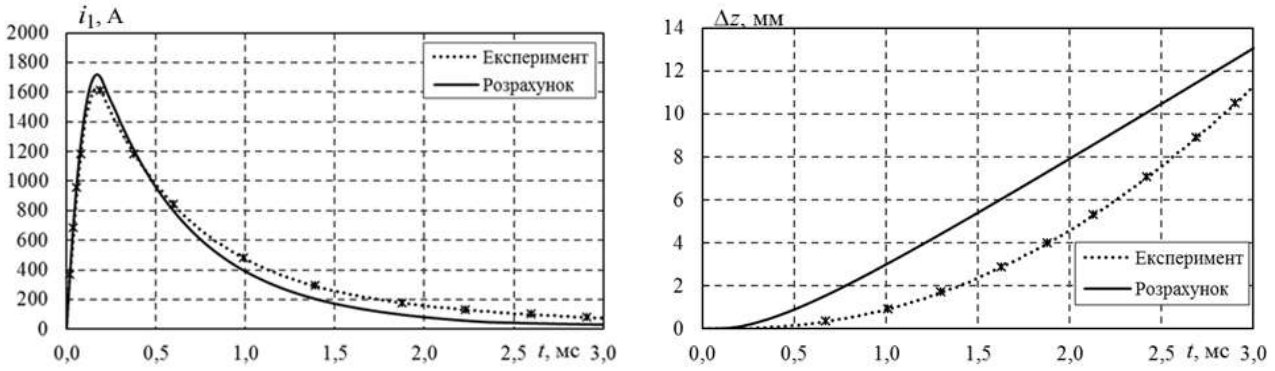
Тип ЛІЕП	Аксіальна складова магнітного поля розсіювання $B_{z\,m}$, мТл		
	Експеримент	Розрахунок	Відносна похибка, %
ЛІЕП-Е	20	24	20,00
ЛІЕП-Ф	17	20	17,65
ЛІЕП-К$_p$	28	32	14,29
ЛІЕП-К$_s$	30	34	13,33
ЛІЕП-Е-Ф	14	16	14,29
ЛІЕП-К$_p$-Ф	21	25	19,05
ЛІЕП-К$_s$-Ф	18	22	22,22
ЛІЕП-К$_p$-Е	19	21	10,53
ЛІЕП-К$_s$-Е	16	18	12,50
ЛІЕП-К$_p$-Е-Ф	22	24	9,09
ЛІЕП-К$_s$-Е-Ф	13	15	15,38

На рис. 3.33 представлені параметри ЛІЕП-К$_p$-Ф, на рис. 3.34 параметри ЛІЕП-К$_p$-Е, на рис. 3.35 параметри ЛІЕП-К$_p$-Е-Ф.



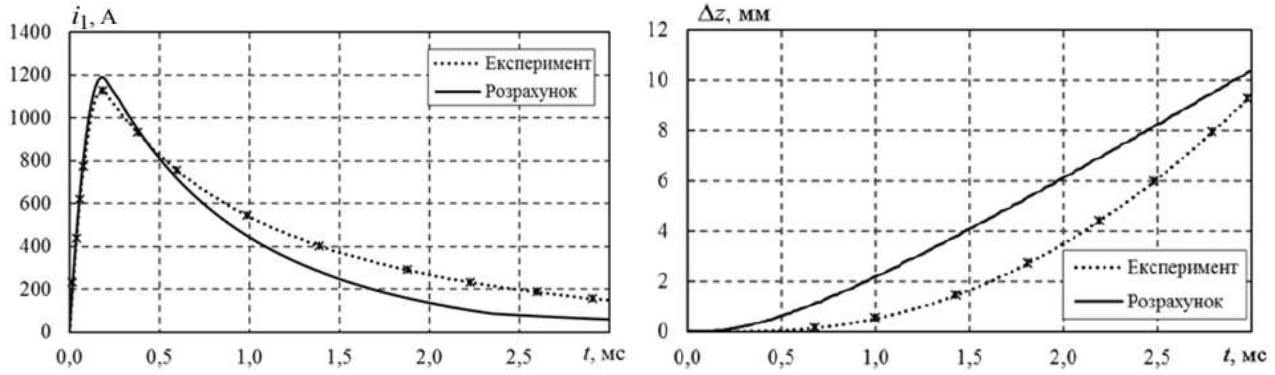
а *б*

Рисунок 3.33 – Розрахункові та експериментальні струми в ОІ i_1 (*а*) та переміщення виконавчого елементу Δz (*б*) ЛІЕП-К$_p$-Ф швидкісного призначення



а *б*

Рисунок 3.34 – Розрахункові та експериментальні струми в ОІ i_1 (*а*) та переміщення виконавчого елементу Δz (*б*) ЛІЕП-К$_p$-Е швидкісного призначення



а *б*

Рисунок 3.35 – Розрахункові та експериментальні струми в ОІ i_1 (*а*) та переміщення виконавчого елементу Δz (*б*) ЛІЕП-К$_p$-Е-Ф швидкісного призначення

Як показує порівняльний аналіз розрахункові струми в ОІ з точністю до 4–6 % співпадають з експериментальними струмами в розглянутих перетворювачах, що свідчить про достовірність математичної моделі. Амплітудні значення розрахункових струмів вище, ніж експериментальних струмів на 3–6 %. Експериментальні значення переміщення виконавчого елементу ЛІЕП швидкісного призначення відрізняються від розрахункових значень на 8–17 %. Найбільша різниця між зазначеними показниками є у ЛІЕП-К$_p$-Ф (16,8 %), а найменша різниця є у ЛІЕП-К$_p$-Е (7,5 %).

Фізичні параметри, які реєструвалися в процесі дослідження: амплітуда струму ОІ I_{1m}, максимальна швидкість виконавчого елементу v_{zm} та

максимальне значення аксіальної складової магнітного поля розсіювання B_{zm} для лабораторного ЛІЕП швидкісного призначення з різними якорями при $U_0 = 250$ В зведені в табл. 3.4 – 3.6. В цілому можна зазначити задовільне узгодження між розрахунковими та експериментальними фізичними параметрами лабораторного ЛІЕП. Відносні похибки між розрахунковими та експериментальними амплітудами струму ОІ I_{1m} складають 3–5 %. Найбільші значення похибок спостерігаються у перетворювачі ЛІЕП-Ф (5 %) при $C_0 = 2500$ мкФ, а найменше значення похибок у перетоврювачі ЛІЕП-К$_s$ (3 %) при $C_0 = 5000$ мкФ.

Таблиця 3.4 – Результати вимірювань та розрахунку амплітуди струму ОІ експериментального ЛІЕП швидкісного призначення

Тип ЛІЕП	Амплітуда струму обмотки індуктора ЛІЕП I_{1m}, А					
	$C_0 = 2500$ мкФ			$C_0 = 5000$ мкФ		
	Експери мент	Розра-хунок	Відносна похибка, %	Експери мент	Розра-хунок	Відносна похибка, %
ЛІЕП-Е	1015	1050	3,33	1500	1560	4,00
ЛІЕП-Ф	420	439	4,33	730	759	3,97
ЛІЕП-К$_p$	1160	1210	4,13	1750	1810	3,43
ЛІЕП-К$_s$	800	835	4,19	1270	1310	3,15
ЛІЕП-Е-Ф	860	899	4,34	1300	1350	3,85
ЛІЕП-К$_p$-Ф	1150	1200	4,17	1520	1580	3,95
ЛІЕП-К$_s$-Ф	730	760	3,95	1160	1205	3,88
ЛІЕП-К$_p$-Е	1625	1695	4,13	2325	2420	4,09
ЛІЕП-К$_s$-Е	895	925	3,24	1360	1410	3,68
ЛІЕП-К$_p$-Е-Ф	1125	1165	3,43	1660	1720	3,61
ЛІЕП-К$_s$-Е-Ф	760	785	3,18	1200	1245	3,75

Відносні похибки між розрахунковими та експериментальними значеннями максимальної швидкості виконавчого елементу v_{zm} складають 7–18 %. Найбільші значення похибок спостерігаються у ЛІЕП-К$_s$-Ф (18 %) при $C_0 = 2500$ мкФ, а найменші у ЛІЕП-К$_p$ (7 %) при $C_0 = 5000$ мкФ.

Таблиця 3.5 – Результати вимірювань та розрахунку максимальної швидкості виконавчого елементу експериментального ЛІЕП швидкісного призначення

Тип ЛІЕП	Максимальна швидкість виконавчого елементу ЛІЕП v_{zm}, м/с					
	C_0 = 2500 мкФ			C_0 = 5000 мкФ		
	Експеримент	Розрахунок	Відносна похибка, %	Експеримент	Розрахунок	Відносна похибка, %
ЛІЕП-Е	3	3,5	16,67	5	5,5	10,00
ЛІЕП-Ф	1,5	1,9	13,33	3	3,5	16,67
ЛІЕП-К$_p$	3	3,5	16,67	6,5	7	7,69
ЛІЕП-К$_s$	1,5	1,9	6,67	4,5	5	11,11
ЛІЕП-Е-Ф	1,6	1,8	12,50	5	5,5	10,00
ЛІЕП-К$_s$-Ф	2	2,5	15,00	5,5	6	9,09
ЛІЕП-К$_p$-Е	3,7	4	8,11	8	8,9	11,25
ЛІЕП-К$_s$-Е	2	2,5	20,00	5	5,5	10,00
ЛІЕП-К$_p$-Е-Ф	3,5	4	14,29	7	7,9	12,86
ЛІЕП-К$_s$-Е-Ф	2,5	3	20,00	6,5	7	7,69

Таблиця 3.6 – Результати вимірювань та розрахунку максимального значення аксіальної складової магнітного поля розсіювання B_{zm} ЛІЕП швидкісного призначення при C_0 = 2500 мкФ

Тип ЛІЕП	Аксіальна складова магнітного поля розсіювання $B_{z\,m}$, мТл		
	Експеримент	Розрахунок	Відносна похибка, %
ЛІЕП-Е	22	25	13,64
ЛІЕП-Ф	17	20	17,65
ЛІЕП-К$_p$	30	35	16,67
ЛІЕП-К$_s$	32	39	21,88
ЛІЕП-Е-Ф	14	16	14,29
ЛІЕП-К$_p$-Ф	13	15	15,38
ЛІЕП-К$_s$-Ф	9	11	22,22
ЛІЕП-К$_p$-Е	20	23	15,00
ЛІЕП-К$_s$-Е	19	21	10,53
ЛІЕП-К$_p$-Е-Ф	48	53	10,42
ЛІЕП-К$_s$-Е-Ф	15	18	13,33

Відносні похибки між розрахунковими та експериментальними амплітудами аксіальної складової магнітного поля розсіювання B_{zm} складають 8–20 %. Найбільші значення похибок спостерігаються у ЛІЕП-К$_s$-Ф (20 %), а найменші – у ЛІЕП-К$_s$ (8 %) при C_0 = 2500 мкФ.

Таким чином, в експериментальних ЛІЕП швидкісного призначення розрахункові та експериментальні показники найбільше (3 %) співпадають для амплітуди струму ОІ I_{1m}, а найменше (20 %) для амплітуди аксіальної складової магнітного поля розсіювання B_{zm}. При ємності ЄНЕ C_0 = 2500 мкФ похибка між розрахунковими та експериментальними показниками більша (4,5 %), ніж при C_0 = 5000 мкФ (3,8 %). Отримані похибки є прийнятними для інженерних досліджень в лабораторних умовах і в цілому показують правомірність розрахункових досліджень. Практично всі перетворювачі мультиякірних конфігурацій мають більш високу ефективність, у порівнянні з перетворювачем з одним якорем. Так, у порівнянні з перетворювачем з одним електропровідним якорем перетворювач силового призначення з котушковим і суцільним електропровідним якорями забезпечує збільшення амплітуди електродинамічних зусиль в 1,46 рази та величину імпульсу електродинамічних зусиль в 2,09 рази.

Встановлено вплив геометричних параметрів рухомого і нерухомого електропровідних якорів на електромеханічні процеси лінійного імпульсного електромеханічного перетворювача швидкісного призначення з рухомою обмоткою індуктора. Встановлено, що в початковий момент робочого процесу струми в якорях мають протилежну до струму індуктора полярність. Визначені параметри активних елементів перетворювача, при яких рухомий якір забезпечує найбільшу швидкість виконавчому елементу.

За допомогою інтегрального показника ефективності, який враховує силові, швидкісні, екологічні показники, встановлено, що за всіма варіантами стратегій оцінки конструктивні схеми перетворювача ЛІЕП-Е-Ф більш ефективні у порівнянні з перетворювачами ЛІЕП-Е і ЛІЕП-Ф.

РОЗДІЛ 4
ВПЛИВ ФОРМИ СТРУМУ ЗБУДЖЕННЯ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

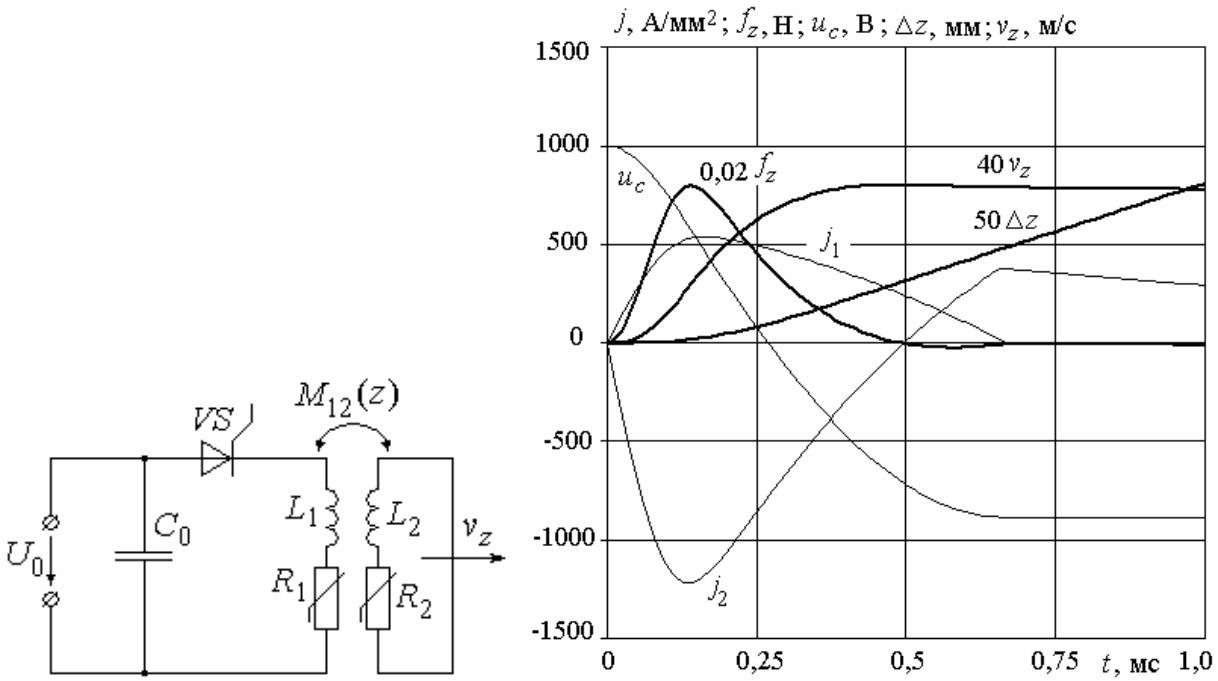
4.1 Електромеханічні характеристики ЛІЕП індукційного типу при різних формах струму збудження індуктора

Відомо, що форма струму збудження в ОІ істотно впливає на ефективність роботи ЛІЕП [112]. Відповідна форма струму збудження забезпечується за допомогою різних напівпровідникових приладів в імпульсному джерелі з ЄНЕ. Дослідженням цієї задачі займається ряд наукових колективів [113, 114]. Для того, щоб дослідити загальні закономірності впливу форми струму збудження на ОІ розглянемо перетворювач ЛІЕП-Е. Параметри цього перетворювача можна використовувати в якості базового для наступної оцінки ефективності ЛІЕП мультиякірних конфігурацій.

Проведемо аналіз впливу форми струму збудження ОІ на ефективність ЛІЕП індукційного типу швидкісного призначення, який найбільш широко використовується для різних практичних і наукових задач. Розглянемо перетворювач ЛІЕП-Е з параметрами, представленими в табл. 2.1, при цьому використовується ЄНЕ з параметрами $U_0 = 1$ кВ; $C_0 = 1$ мФ; висота ЕЯ $H_2 = 2{,}5$ мм; коефіцієнт пружності зворотної пружини $K_р = 25$ кН/м; маса виконавчого елементу $m_e = 0{,}25$ кг. Вважаємо, що в схемах живлення індуктора ЛІЕП опір діодів *VD* і пускового тиристора *VS* в прямому напрямку дорівнює нулю, а в зворотному напрямку їх провідність настільки ж мала.

При однополярній формі струму збудження ЛІЕП-Е від ЄНЕ ємністю C_0, зарядженого до напруги U_0, в схемі живлення використовується лише пусковий тиристор *VS* (рис. 4.1 *а*) [115]. На схемах цього підрозділу позначено R_1, L_1 – активний опір та індуктивність ОІ; R_2, L_2 – активний опір та індуктивність ЕЯ, який рухається зі швидкістю v_z; $M_{12}(z)$ – взаємна індуктивність між ОІ та ЕЯ.

При подачі сигналу на пусковий тиристор *VS* в ОІ виникає струм густиною j_1, який індукує струм в ЕЯ густиною j_2. При цьому напруга в ЄНЕ u_c після завершення струму в ОІ лишається незмінною (рис. 4.1 *б*).



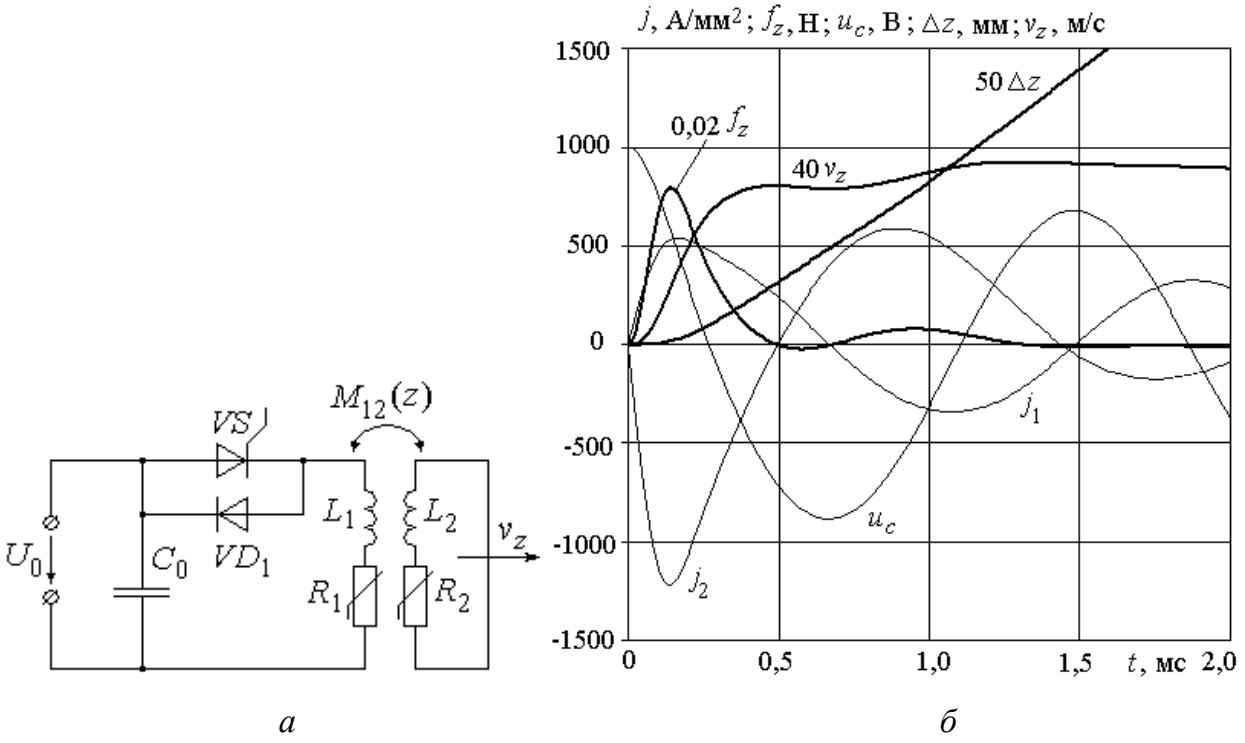
а *б*

Рисунок 4.1 – Електрична схема (*а*) і електромеханічні характеристики ЛІЕП-Е (*б*) при однополярній формі струму збудження

Однополярна форма струму збудження в ОІ має відносно невелику тривалість переднього фронту і більшу тривалість заднього фронту. Така форма струму ОІ обумовлена індукційним впливом струму ЕЯ, який зміщує максимум до початку процесу збудження. Зауважимо, що при відсутності ЕЯ форма струму ОІ близька до напівсінусоїди. Максимальні значення струму ЕЯ і ОІ через магнітний зв'язок виникають практично в один і той же момент часу. Індукований струм в ЕЯ через 0,5 мс змінює полярність, що обумовлює виникнення незначних гальмівних ЕДЗ, які діють до закінчення протікання струму в ОІ. Амплітуда густини струму складає: в ОІ j_{1m} = 538,7 А/мм^2, в ЕЯ j_{2m} = 1218,5 А/мм^2. В момент максимуму густин струмів виникає і максимум ЕДЗ, який досягає величини f_{zm} = 39,8 кН. Розглянутий ЛІЕП-Е

забезпечує величину імпульсу сили F_z = 7,6 Н·с, під дією якого якір разом з виконавчим елементом досягає швидкості v_z = 17,9 м/с. До кінця робочого циклу перевищення температури ОІ становить θ_1 = 0,5ºС, а перевищення температури ЕЯ θ_2 = 2,0ºС. ККД даного ЛІЕП-Е становить η = 16,66%.

Коливально-загасаюча форма струму збудження в ЛІЕП-Е формується за допомогою шунтування пускового тиристора *VS* зворотним діодом VD_1 (рис. 4.2) [116].



а *б*

Рисунок 4.2 – Електрична схема (*а*) і електромеханічні характеристики ЛІЕП-Е (*б*) при коливально-згасаючій формі струму збудження

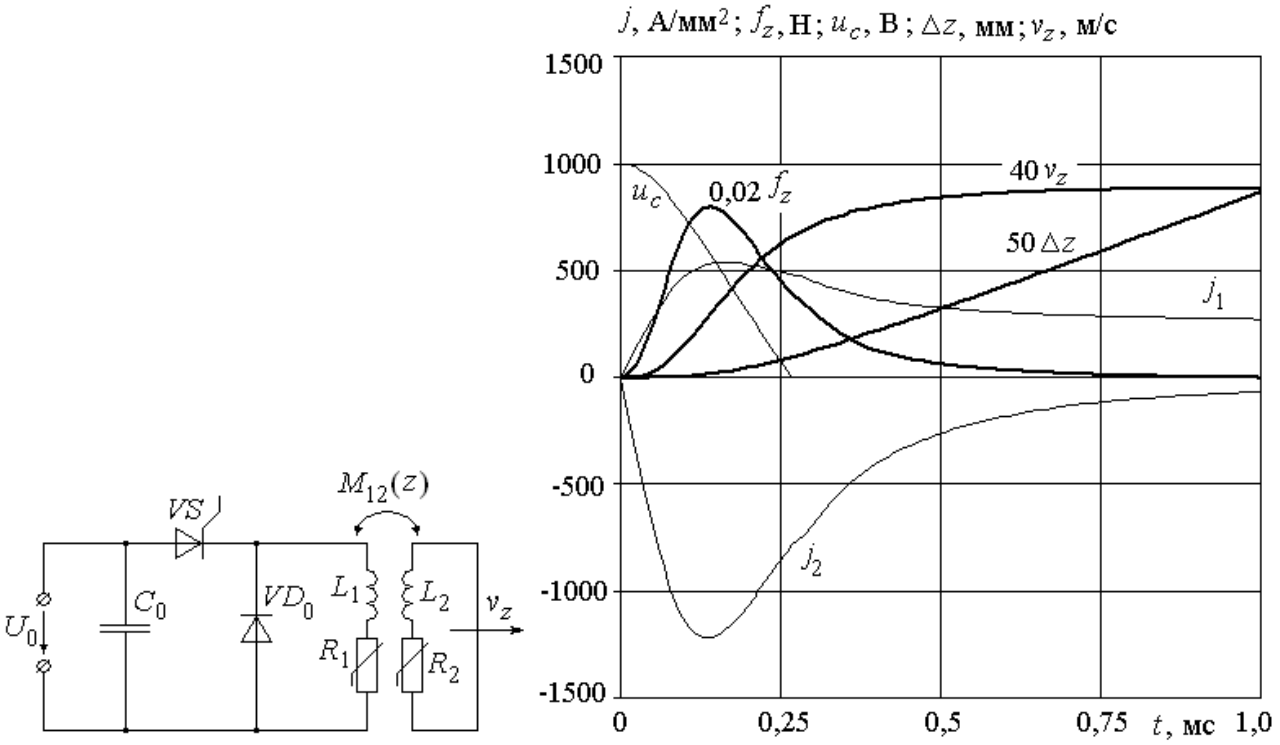
Збудження індуктора ЛІЕП-Е коливально-згасаючою формою струму призводить до істотної зміни його електромеханічних характеристик. Через несинхронну зміну полярностей струмів ОІ і ЕЯ між ними виникають як ЕДЗ відштовхування, що переміщують якір з виконавчим елементом уздовж осі *z*, так і ЕДЗ притягнення, які гальмують якір. Можна відзначити наявність основних (до 0,5 мс) і додаткових (в інтервалі 0,7–1,3 мс) ЕДЗ відштовхування. Додаткові ЕДЗ відштовхування значно менше основних зусиль, перш за все

через послаблення магнітного зв'язку між індуктором і віддаленим від нього якорем.

При збудженні індуктора коливально-згасаючою формою струму на якір діє збільшена величина імпульсу ЕДЗ F_z = 9,46 Н·с, внаслідок чого він разом з виконавчим елементом досягає швидкості v_z = 22,3 м/с. До кінця робочого циклу перевищення температури ОІ становить θ_1 = 1,0 ºС, а перевищення температури ЕЯ θ_2 = 2,4 ºС. ККД цього ЛІЕП-Е підвищується до величини η = 24,88%.

Однак в схемах живлення індуктора, що формують однополярну і коливально-загасаючу форму струму збудження, напруга ЄНЕ u_c змінює полярність, що вимагає використання спеціальних різнополярних конденсаторів в ЄНЕ.

Аперіодична форма струму збудження ЛІЕП-Е реалізується під час шунтування індуктора зворотним діодом VD_0 (рис. 4.3 *а*) [117].



а *б*

Рисунок 4.3 – Електрична схема *(а)* і електромеханічні характеристики ЛІЕП-Е (*б*) при аперіодичній формі струму збудження

Дана схема дозволяє використовувати електролітичні конденсатори з підвищеними питомими енергетичними показниками. При аперіодичній формі струму збудження індуктора ЛІЕП-Е зберігаються як полярність напруги u_c ЄНЕ, так і полярності струмів індуктора і якоря (рис. 4.3 б). Після досягнення напруги ЄНЕ u_c=0 струм в індукторі починає протікати через зворотний діод VD_0. Через збереження полярності струмів на якір діють тільки ЕДЗ відштовхування, величина імпульсу яких становить F_z = 8,85 Н·с. Якір разом з виконавчим елементом досягає швидкості v_z = 20,8 м/с. До кінця робочого циклу перевищення температури ОІ θ_1 становить 1,1 ºС, а перевищення температури якоря θ_2 становить 1,7 ºС. ККД ЛІЕП-Е η становить 22,23 %.

Розглянемо збудження ЛІЕП-Е аперіодичною з підживленням формою струму збудження. Збереження полярності напруги u_c в схемі збудження ЛІЕП, яка формує аперіодичну форму струму, відкриває перспективи щодо вдосконалення даної схеми, наприклад, за рахунок підключення додаткового ЄНЕ-1 в процесі розряду вихідного ЄНЕ-0 з параметрами C_0 і U_0. Додатковий ЄНЕ-1 ємністю C_1 попередньо заряджається до напруги U_1, яка менше напруги U_0 вихідного ЄНЕ-0 (рис. 4.4).

В процесі розряду ЄНЕ-0, коли напруга $U_0<U_1$, через діод VD_1 підключається ЄНЕ-1, збільшуючи розрядну ємність до величини C_0+C_1.

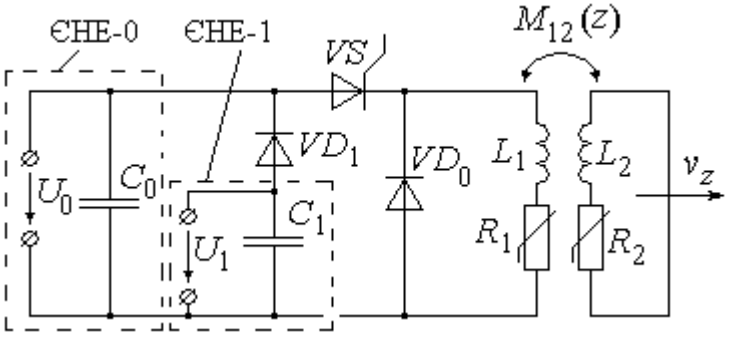


Рисунок 4.4 – Електрична схема ЛІЕП, що формує аперіодичну з підживленням форму струму збудження

Оскільки збудження ОІ аперіодичною з підживленням формою струму збудження практично не досліджено, розглянемо вплив параметрів додаткового ЄНЕ-1 на електромеханічні показники ЛІЕП-Е. Спочатку проаналізуємо вплив величини напруги U_1 додаткового ЄНЕ-1 на показники ЛІЕП-Е, оскільки його величина визначає момент підключення до вихідного ЄНЕ-0. Розглянемо варіанти підключення додаткового ЄНЕ-1: до ($U_1 = 0{,}7 \cdot U_0$) і після ($U_1 = 0{,}5 \cdot U_0$) досягнення максимуму ЕДЗ, що діють на ЕЯ. Будемо використовувати додатковий ЄНЕ-1, у якого $C_1 = C_0$. ККД ЛІЕП-Е з даною схемою живлення будемо оцінювати співвідношенням:

$$\eta = \frac{(m_2 + m_в) \cdot v_z^2 + K_p \Delta z^2}{C_0 U_0^2 + C_1 U_1^2} \cdot 100, \qquad (4.1)$$

В момент підключення додаткового ЄНЕ-1 до досягнення максимуму ЕДЗ ($U_1 = 0{,}7 \cdot U_0$) на передньому фронті струмів ОІ і ЕЯ спостерігаються збурення (рис. 4.5 *а*). При цьому виникає відповідне збурення і на передньому фронті кривої ЕДЗ. Після підключення додаткового ЄНЕ-1 напруга u_c починає знижуватися більш повільно. У порівнянні з варіантом використання тільки вихідного ЄНЕ-0 амплітуди густини струму підвищилися: в індукторі до 603,6 А/мм^2, в якорі до 1324,6 А/мм^2. Це призвело до збільшення амплітуди ЕДЗ до 47,2 кН, величини імпульсу ЕДЗ до 11,5 Н·с, швидкості якоря з виконавчим елементом до 27,1 м/с. Однак за рахунок енергії додаткового ЄНЕ-1 ККД ЛІЕП знижується до 18,8 %. Крім того, при збудженні ЛІЕП аперіодичним з підживленням імпульсом спостерігаються більш високі перевищення температур ($\theta_n = T_n - T_0$) індуктора θ_1 = 2,1 ºС і якоря θ_2 = 2,2 ºС, в порівнянні з розглянутими раніше схемами.

При підключенні ЄНЕ-1 після моменту виникнення максимуму ЕДЗ ($U_1 = 0{,}5 \cdot U_0$) спостерігається локальні зростання величин струмових імпульсів індуктора і якоря на їх задньому фронті (рис. 4.5 *б*). Після підключення ЄНЕ-1 струм в ОІ починає повільніше спадати після моменту $u_c = 0$.

Таким чином, додатковий ЄНЕ-1, як з малим, так із високим значеннями напруг U_1, які підключаються, відповідно на задньому і передньому фронтах ЕДЗ, дозволяє підвищити електромеханічні показники ЛІЕП-Е. Так, при підключенні ЄНЕ-1 з напругою ($U_1 = 0{,}15 \cdot U_0$) швидкість якоря зростає на 27 %, величина імпульсу ЕДЗ зростає на 27 %, а ККД знижується на 25 %. При підключенні ЄНЕ-1 з високою напругою ($U_1 = 0{,}75 \cdot U_0$) швидкість якоря зростає на 29,7 %, величина імпульсу ЕДЗ зростає на 29,6 %, а ККД знижується на 18,7 %.

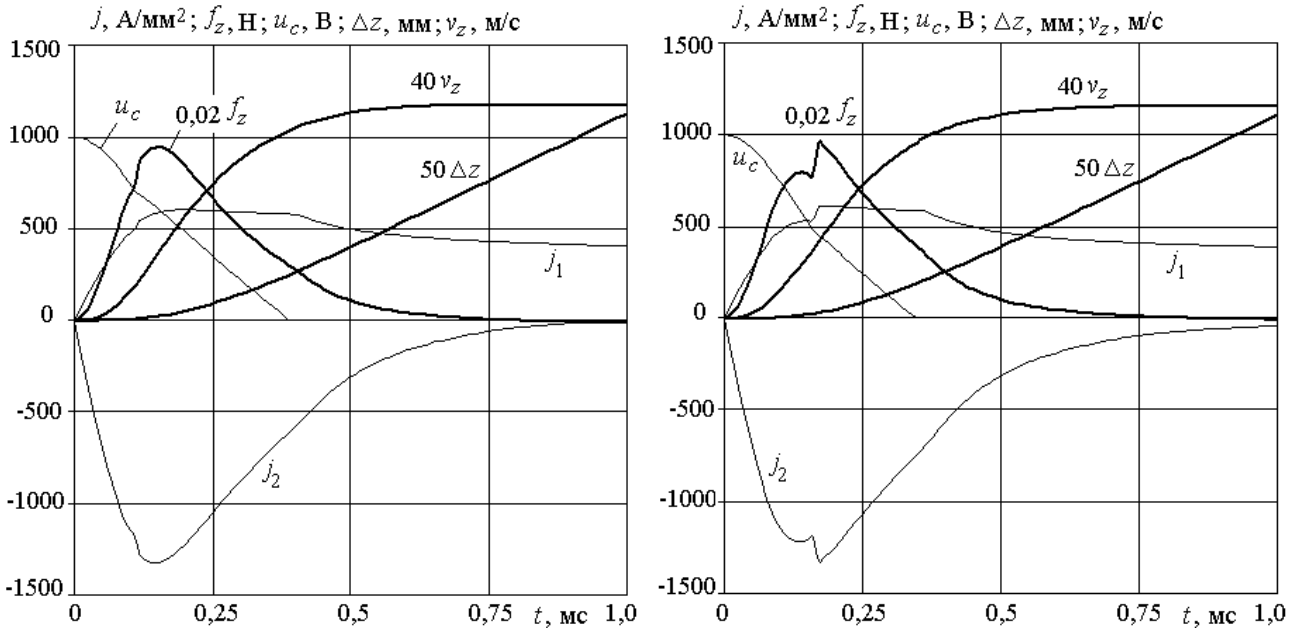


Рисунок 4.5 – Електромеханічні характеристики ЛІЕП при підключенні додаткового ЄНЕ-1, зарядженого до напруги U_1: $0{,}7U_0$ (*а*), $0{,}5U_0$ (*б*)

При аперіодичній з підживленням формі струму збудження всі електромеханічні показники ЛІЕП-Е вище в порівнянні зі збудженням коливально-згасаючою формою струму. Так, при використанні ЄНЕ-1 з напругою $U_1 = 0{,}6 \cdot U_0$ максимальна величина ЕДЗ f_{zm} підвищується на 20 %, а величина імпульсу ЕДЗ F_z і швидкість якоря v_z на 21,6 %. При цьому зростає перевищення температури індуктора θ_1 в 2,12 раз, а перевищення температури якоря θ_2 зменшується на 11,3 %. ККД ЛІЕП η знижується на 32,2 %. Зауважимо,

що електромеханічні показники ЛІЕП, що використовує додатковий ЄНЕ-1 з напругою $U_1 = 0{,}6 \cdot U_0$, вище, ніж в ЛІЕП зі схемою живлення, яка формує аперіодичний струмовий імпульс збудження індуктора з вихідною ємністю $C_0 = 2$ мФ. Показники ЛІЕП залежать також від ємності C_1 додаткового ЄНЕ-1 (рис. 4.6).

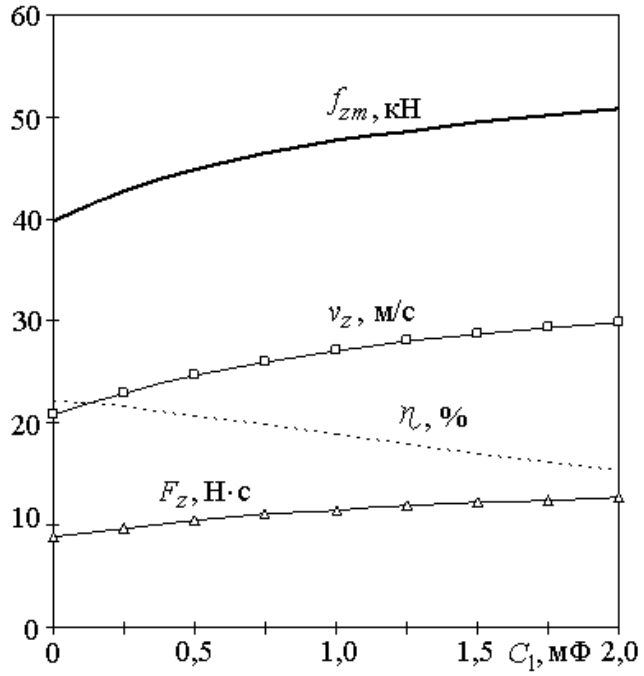


Рисунок 4.6 – Залежність електромеханічних показників ЛІЕП-Е від ємності C_1 ЄНЕ-1 при $U_1 = 0{,}6U_0$

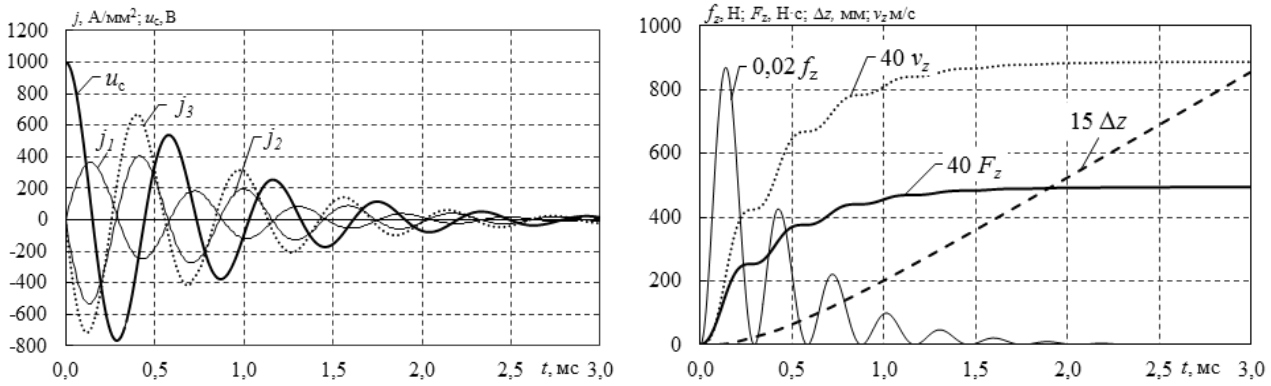
Зі збільшенням ємності C_1 зростають всі основні електромеханічні показники ЛІЕП-Е. Так при збільшенні ємності C_1 від нуля до 2 мФ амплітуда густини струму індуктора j_{1m} збільшується на 24,3 %, струму якоря j_{2m} на 12,8 %, амплітуда ЕДЗ f_{zm} на 27,6 %, величина імпульсу ЕДЗ F_z і швидкість якоря v_z на 43,6 %. Однак при цьому зростають перевищення температур індуктора θ_1 в 2,7 рази, та якоря θ_2 на 40,7 %, а ККД η знижується на 45,2 %.

Таким чином, електромеханічні показники при збудженні ЛІЕП-Е аперіодичною формою струму кращі, ніж при збудженні однополярною формою струму, але гірше, ніж при збудженні коливально-згасаючою формою струму. У перетворювачі з аперіодичною формою струму збудження найбільш

сильно нагрівається індуктор, а найменш якір. При збудженні аперіодичною з підживленням формою струму ЛІЕП-Е всі електромеханічні показники вище в порівнянні з ЛІЕП-Е, який збуджується коливально-згасаючою формою струму. При цьому спостерігається підвищене нагрівання активних елементів, особливо індуктора, і відбувається зниження ККД.

4.2 Дослідження ЛІЕП мультиякірних конфігурацій при різних формах струму збудження індуктора

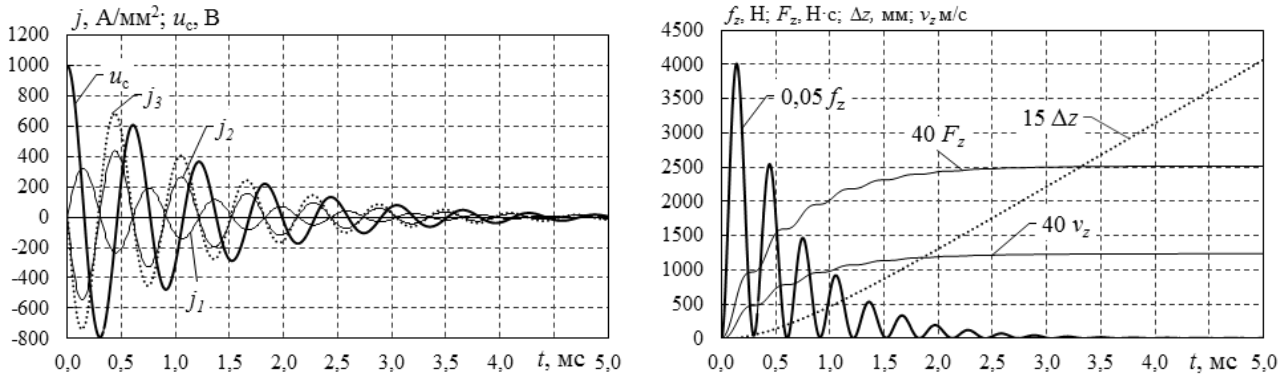
Розглянемо електромеханічні характеристики двох ЛІЕП мультиякірних конфігурацій швидкісного призначення при різних формах струму збудження індуктора. Як об’єкт дослідження використаємо перетворювач ЛІЕП-К-Е, що включає нерухому ОІ, з якою паралельно з’єднано КЯ та ЕЯ, а також перетворювач ЛІЕП-К-Е-Ф, який додатково включає і ФЯ. При цьому використовувались параметри елементів, які представлені в табл. 2.1. При збудженні коливально-загасаючою формою струму амплітуда густини струму в ОІ на першому півперіоду коливання в перетворювачі ЛІЕП-К-Е сягає j_{1m} = 363,2 А/мм^2, а в ЛІЕП-К-Е-Ф j_{1m} = 288 А/мм^2 (рис. 4.7) [116].



а *б*

Рисунок 4.7 – Електричні (*а*) та механічні (*б*) характеристики перетворювача ЛІЕП-К-Е при збудженні коливально-загасаючою формою струму

При цьому зменшується й амплітуда густини струму в ЕЯ у порівнянні з ЛІЕП-Е, який використаємо як базовий для порівняльного аналізу. Максимальна швидкість ЕЯ з виконавчим елементом в ЛІЕП-К-Е сягає V_{zm} = 22 м/с, що менше, ніж в ЛІЕП-Е, а в ЛІЕП-К-Е-Ф V_{zm} = 30,9 м/с що перевищує цей показник. Обидва перетворювачі мультиякірних конфігурацій забезпечують підвищені силові показники. В ЛІЕП-К-Е амплітуда ЕДЗ становить f_{zm} = 42,76 кН, а величина імпульсу ЕДЗ F_z = 12,35 Н·с. Перетворювач ЛІЕП-К-Е-Ф забезпечує значно збільшені силові показники амплітуду ЕДЗ f_{zm} = 80 кН, та величину імпульсу ЕДЗ F_z = 31,45 Н·с. При цьому, перетворювачі мультиякірних конфігурацій утворюють менший рівень магнітних полів розсіювання. Так середній рівень поля розсіювання при максимальному струмі в ОІ на заданому контурі становить в ЛІЕП-К-Е $B_{ex\,m}$ = 22 мТл, а в ЛІЕП-К-Е-Ф $B_{ex\,m}$ = 19 мТл, що нижче, ніж в ЛІЕП-Е.

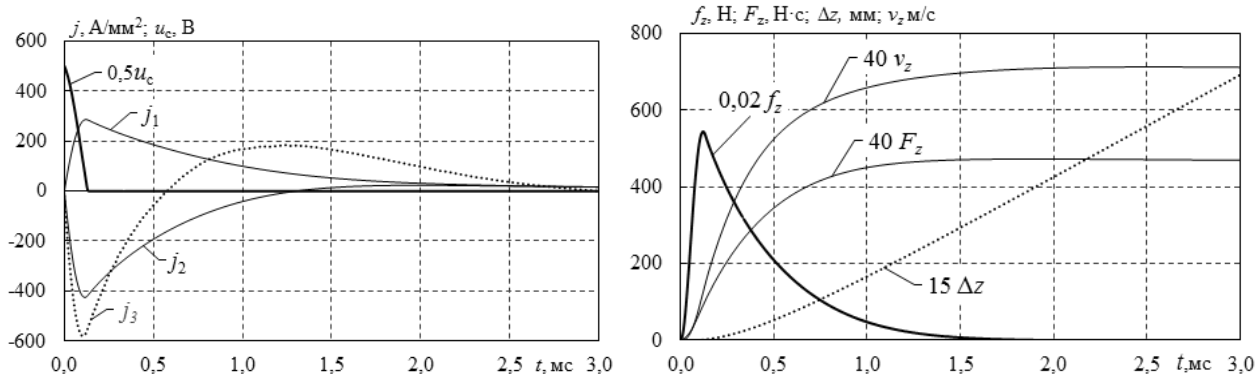


а *б*

Рисунок 4.8 – Електричні (*а*) та механічні (*б*) характеристики перетворювача ЛІЕП-К-Е-Ф (б) при збудженні коливально-загасаючою формою струму

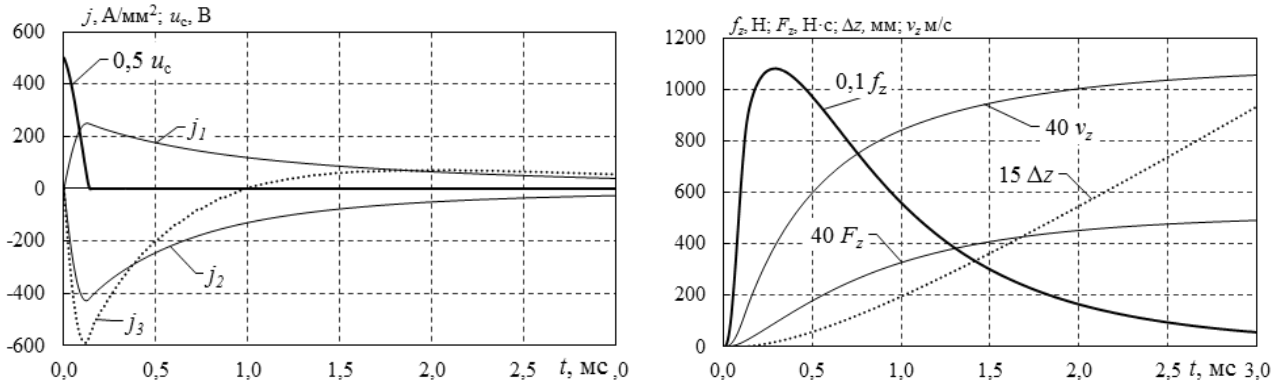
При збудженні аперіодичною формою струму амплітуда густини струму в ОІ на першому півперіоду коливання в ЛІЕП-К-Е зменшується до величини j_{1m} = 285,3 А/мм^2, а в ЛІЕП-К-Е-Ф до величини j_{1m} = 250 А/мм^2 (рис. 4.9). При цьому зменшуються й амплітуда густини струму в ЕЯ. Внаслідок цього зменшуються як швидкісні показники: максимальна швидкість ЕЯ в ЛІЕП-К-Е сягає V_{zm} = 17,8 м/с, а в ЛІЕП-К-Е-Ф V_{zm} = 27,1 м/с, так і силові показники: величина імпульсу сили в ЛІЕП-К-Е сягає F_z = 11,75 Н·с, а в ЛІЕП-К-Е-Ф –

F_z = 12,76 Н·с. При аперіодичному імпульсу збудження зменшується і середній рівень поля розсіювання при максимальному струмі в ОІ на заданому контурі: B_{exm} = 18 мТл в ЛІЕП-К-Е, $B_{ex\,m}$ = 9,5 мТл в ЛІЕП-К-Е-Ф.



а *б*

Рисунок 4.9 – Електричні (*а*) та механічні (*б*) характеристики перетворювача ЛІЕП-К-Е при збудженні аперіодичною формою струму

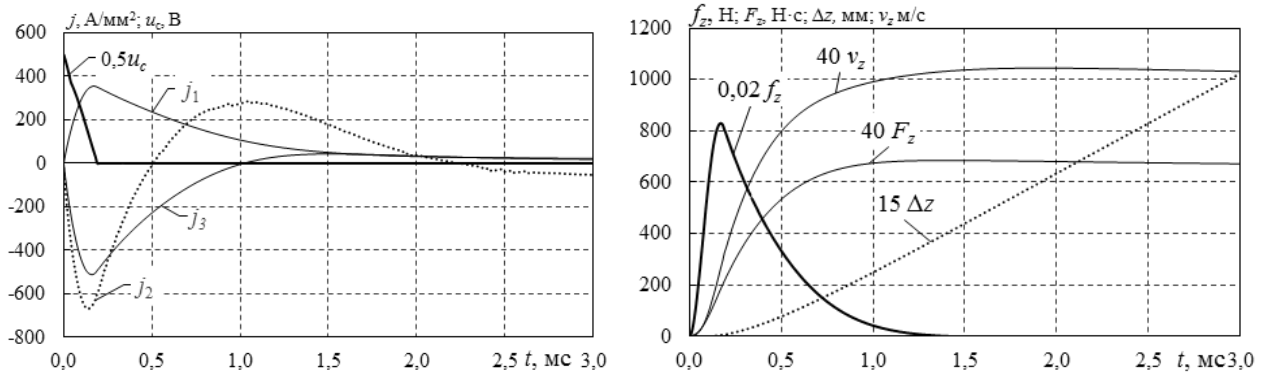


а *б*

Рисунок 4.10 – Електричні (*а*) і механічні (*б*) характеристики перетворювача ЛІЕП-К-Е-Ф при збудженні аперіодичною формою струму

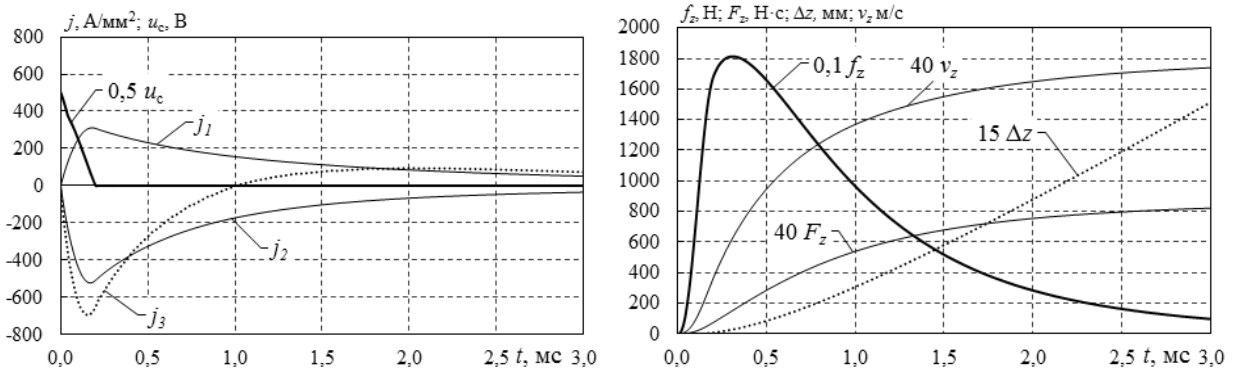
При збудженні аперіодичним імпульсом з підживленням при умові $C_1 = C_0$, $U_1 = 0{,}7 \cdot U_0$ відбуваються наступні зміни в перетворювачах мультиякірних конфігурацій у порівнянні зі збудженням аперіодичною формою збудження ОІ. Амплітуда густини струму в ОІ на першому півперіоду коливання збільшуються в ЛІЕП-К-Е до величини j_{1m} = 355 А/мм^2, а в ЛІЕП-К-Е-Ф до величини j_{1m} = 310,9 А/мм^2 (рис. 4.11). При цьому збільшуються й амплітуди густини струму в ЕЯ. Внаслідок цього збільшуються як швидкісні

показники: максимальна швидкість ЕЯ в ЛІЕП-К-Е сягає V_{zm} = 26,1 м/с, а в ЛІЕП-К-Е-Ф V_{zm} = 44,7 м/с, так і силові показники: величина імпульсу сили в ЛІЕП-К-Е сягає F_z = 17,12 Н·с, а в ЛІЕП-К-Е-Ф – F_z = 21,36 Н·с. Але при цьому збільшується середній рівень поля розсіювання на заданому контурі при максимальну струмі в ОІ: $B_{ex\,m}$=21 мТл в ЛІЕП-К-Е, $B_{ex\,m}$=15 мТл в ЛІЕП-К-Е-Ф.



а *б*

Рисунок 4.11 – Електричні (*а*) і механічні (*б*) характеристики перетворювача ЛІЕП-К-Е при збудженні аперіодичною з підживленням формою струму при $U_1 = 0{,}7 \cdot U_0$, $C_1 = C_0$

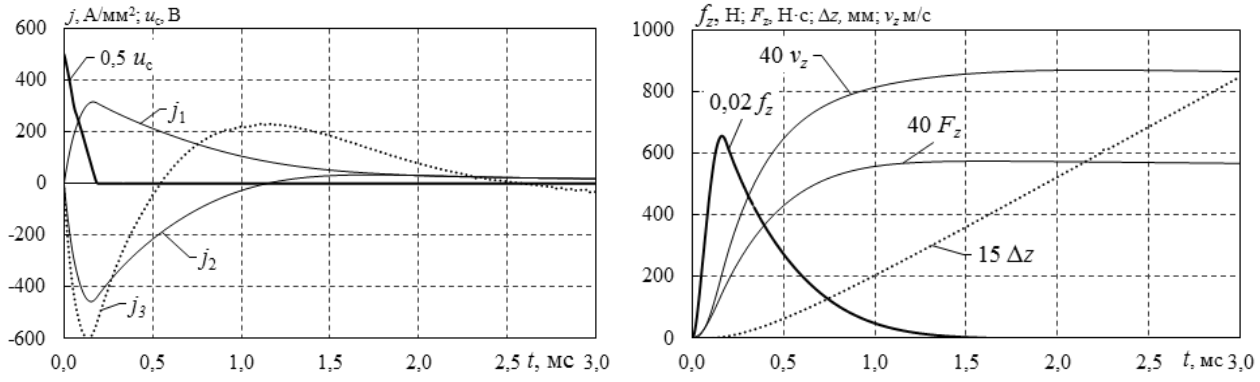


а *б*

Рисунок 4.12 – Електричні (*а*) і механічні (*б*) характеристики перетворювача ЛІЕП-К-Е-Ф при збудженні аперіодичною з підживленням формою струму при $U_1 = 0{,}7 \cdot U_0$, $C_1 = C_0$

Розглянемо збудження перетворювачів мультиякірних конфігурацій аперіодичною формою струму у випадку, коли підживлення починається при напрузі $U_1 = 0{,}5 \cdot U_0$. У порівнянні з варіантом збудження з підживленням $U_1 = 0{,}7 \cdot U_0$ відбуваються наступні зміни електромеханічних показників.

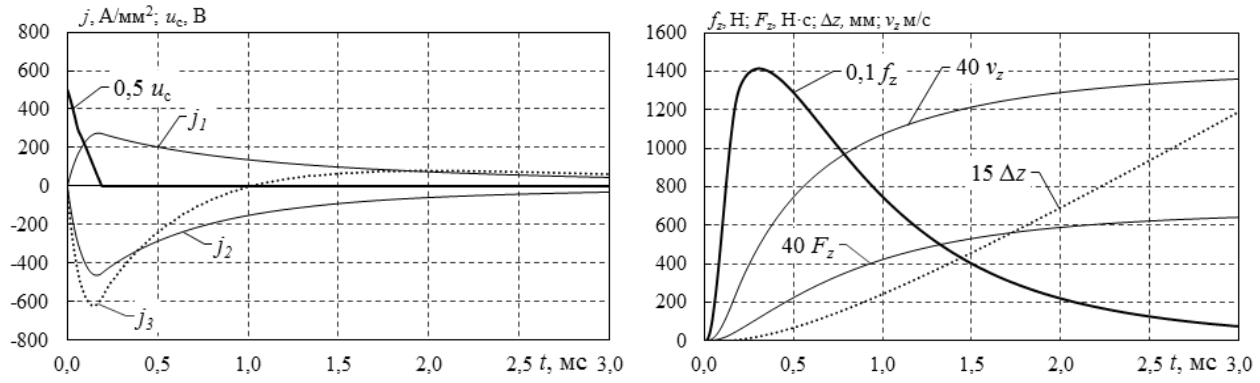
Амплітуда густини струму в ОІ на першому півперіоду коливання зменшуються в ЛІЕП-К-Е до величини j_{1m} = 315 А/мм^2, а в ЛІЕП-К-Е-Ф до величини j_{1m} = 275 А/мм^2 (рис. 4.13).



а *б*

Рисунок 4.13 – Електричні (*а*) і механічні (*б*) характеристики перетворювача ЛІЕП-К-Е при збудженні аперіодичною з підживленням формою струму при $U_1 = 0{,}5U_0$, $C_1 = C_0$

При цьому зменшуються й амплітуда густини струму в ЕЯ. Внаслідок цього зменшуються як швидкісні показники: максимальна швидкість ЕЯ в ЛІЕП-К-Е сягає V_{zm} = 21,7 м/с, а в ЛІЕП-К-Е-Ф V_{zm} = 35 м/с, так і силові показники: величина імпульсу сили в ЛІЕП-К-Е сягає F_z = 14,36 Н·с, а в ЛІЕП-К-Е-Ф F_z = 16,7 Н·с (рис. 4.14).



а *б*

Рисунок 4.14 – Електричні (*а*) і механічні (*б*) характеристики перетворювача ЛІЕП-К-Е-Ф при збудженні аперіодичною з підживленням формою струму при $U_1 = 0{,}5U_0$, $C_1 = C_0$

Але при цьому зменшується і середній рівень магнітного поля розсіювання при максимальному струмі в ОІ на заданому контурі: $B_{ex\,m}$ = 18 мТл в ЛІЕП-К-Е, $B_{ex\,m}$ = 11 мТл в ЛІЕП-К-Е-Ф. Таким чином, в залежності від форми струму збудження істотно змінюються електричні, магнітні, швидкісні та силові показники ЛІЕП мультиякірних конфігурацій.

При цьому силові та швидкісні показники перетворювача ЛІЕП-К-Е-Ф вищі, ніж у перетворювача ЛІЕП-К-Е, що обумовлено наявністю ФЯ. За рахунок цього ФЯ відбувається затягування електромагнітних процесів, зменшення амплітуд струмів в активних елементах перетворювачів та магнітних полів розсіювання.

Проведемо оцінку ефективності розглянутих вище двох ЛІЕП мультиякірних конфігурацій при різних формах струму збудження індуктора в порівнянні з аналогічним збудженням ЛІЕП-Е індукційного типу [119]. В табл. 4.1 представлені відносні значення показників ЛІЕП-К-Е та ЛІЕП-К-Е-Ф при різних формах струму збудження ($C_1 = C_0$), а в табл. 4.2 відносні значення ЛІЕП мультиякірних конфігурацій при збудженні аперіодичною з підживленням формою струму при U_0 = 1,0 кВ, C_0 = 1 мФ, $U_1 = 0{,}6 \cdot U_0$. В табл. 4.1 представлені показники ЛІЕП мультиякірних конфігурацій при різних формах струму збудження індуктора, які нормовані показниками ЛІЕП-Е з аналогічною формою струму збудження.

Аналізуючи вплив форми струму збудження на показники перетворювачів мультиякірних конфігурацій у порівнянні з ЛІЕП-Е аналогічного збудження можна зазначити наступне:

– амплітуда струму в ОІ зменшується в перетворювача ЛІЕП-К-Е, за винятком аперіодичної форми струму збудження, та зменшується в перетворювача ЛІЕП-К-Е-Ф при усіх формах струму збудження;

– амплітуда струму в ЕЯ зменшується в обох перетворювачах мультиякірних конфігурацій при усіх формах імпульсу збудження;

Таблиця 4.1 – Відносні значення ЛІЕП мультиякірних конфігурацій при різних формах струму збудження індуктора

Форма струму збудження		Тип ЛІЕП	j_{1m}^*	j_{2m}^*	j_{3m}^*	V_{zm}^*	f_{zm}^*	F_z^*	$B_{ex\,m}^*$
1	Однополярна	ЛІЕП-К-Е	0,91	1,33	0,85	0,55	1,09	1,31	0,67
		ЛІЕП-К-Е-Ф	0,80	1,35	0,88	0,63	0,55	1,22	0,40
2	Коливально-загасаюча	ЛІЕП-К-Е	0,91	1,26	0,85	0,91	1,05	1,02	0,61
		ЛІЕП-К-Е-Ф	0,72	1,36	0,88	1,28	0,97	2,60	0,53
3	Аперіодична	ЛІЕП-К-Е	1,03	1,45	0,97	1,55	1,36	2,09	0,75
		ЛІЕП-К-Е-Ф	0,91	1,55	0,99	2,36	0,54	2,27	0,40
4	Аперіодична з підживленням при $U_1 = 0{,}7 \cdot U_0$	ЛІЕП-К-Е	1,07	1,52	0,96	1,58	1,52	2,13	0,75
		ЛІЕП-К-Е-Ф	0,94	1,57	1,00	2,71	0,66	2,65	0,54
5	Аперіодична з підживленням при $U_1 = 0{,}6 \cdot U_0$	ЛІЕП-К-Е	1,06	1,51	0,96	1,59	1,51	2,09	0,77
		ЛІЕП-К-Е-Ф	0,93	1,57	0,99	2,64	0,65	2,52	0,50
6	Аперіодична з підживленням при $U_1 = 0{,}5 \cdot U_0$	ЛІЕП-К-Е	1,07	1,53	0,96	1,58	1,51	2,09	0,69
		ЛІЕП-К-Е-Ф	0,93	1,55	1,00	2,55	0,65	2,43	0,42

– швидкість ЕЯ з виконавчим елементом збільшується при аперіодичній формі струму збудження, причому в перетворювача ЛІЕП-К-Е-Ф більш суттєво. А при однополярній формі струму збудження зазначена швидкість зменшується;

– амплітуда ЕДЗ, що розвивається перетворювачем ЛІЕП-К-Е, збільшується, а в перетворювача ЛІЕП-К-Е-Ф зменшується;

– значення імпульсу ЕДЗ, що розвивають перетворювачі мультиякірних конфігурацій, збільшується, причому більш суттєво в ЛІЕП-К-Е-Ф.

Таблиці 4.2 – Відносні значення ЛІЕП мультиякірних конфігурацій при збудженні аперіодичною з підживленням формою струму індуктора при U_0 = 1,0 кВ, C_0 = 1 мФ, $U_1 = 0{,}6 \cdot U_0$

Ємність C_1, Мф	Тип ЛІЕП	j_{1m}^*	j_{2m}^*	j_{3m}^*	V_{zm}^*	f_{zm}^*	F_z^*	$B_{ex\,m}^*$
0	ЛІЕП-К-Е	1,01	1,54	0,95	-1,55	1,35	2,10	0,71
	ЛІЕП-К-Е-Ф	0,89	1,55	0,98	2,79	0,85	2,89	0,42
0,5	ЛІЕП-К-Е	1,05	1,53	0,96	1,59	1,43	2,08	0,77
	ЛІЕП-К-Е-Ф	0,91	1,56	0,98	2,52	0,60	2,38	0,40
1,0	ЛІЕП-К-Е	1,07	1,54	0,96	1,05	1,51	3,17	0,84
	ЛІЕП-К-Е-Ф	0,94	1,57	0,99	2,65	0,66	2,52	0,43
1,5	ЛІЕП-К-Е	1,09	1,55	0,95	1,61	1,58	2,10	0,92
	ЛІЕП-К-Е-Ф	0,96	1,60	1,03	2,78	0,72	2,65	0,49
2,0	ЛІЕП-К-Е	1,11	1,53	0,97	1,61	1,67	2,12	0,71
	ЛІЕП-К-Е-Ф	0,98	1,62	1,03	2,90	0,78	2,84	0,46

Розглянемо ефективність перетворювачів мультиякірних конфігурацій за допомогою комплексного критерію ефективності, який враховує амплітуду струму в ОІ, максимальну швидкість, що розвиває ЕЯ, величину імпульсу ЕДЗ, середній рівень поля розсіювання при максимальному струмі в ОІ на заданому контурі та ККД:

$$K^* = \alpha_1 \cdot \frac{1}{j_{1m}^*} + \alpha_2 \cdot v_{zm}^* + \alpha_3 \cdot F_{zm}^* + \alpha_4 \cdot \frac{1}{B_{ex1m}^*} + \alpha_5 \cdot \eta^*, \ \sum_i^5 \alpha_i = 1. \qquad (4.2)$$

Для оцінки ефективності ЛІЕП введемо наступні стратегії:

I – всі показники оцінюються однаково ($\alpha_1 – \alpha_5$=0,2);

II – пріоритет в оцінюванні віддано ККД;

III – пріоритет в оцінюванні віддано мінімальному значенню середнього рівня поля розсіювання при максимальному струмі в ОІ на заданому контурі;

IV – пріоритет в оцінюванні віддано імпульсу сили;

V – пріоритет в оцінюванні віддано максимальній швидкості;

VI – пріоритет в оцінюванні віддано мінімальній густині струму ОІ.

Пріоритетний *i*-ий параметр оцінюється ваговим коефіцієнтом α_i=0,4, а інші непріоритетні *j*-і параметри оцінюються однаково ваговими коефіцієнтами α_j = 0,15. Для прийнятого за базовий ЛІЕП-Е значення комплексного критерію ефективності $K^* = 1$. Значення комплексних критеріїв ефективності K^* ЛІЕП мультиякірних конфігурацій при різних формах струму збудження індуктора представлено в табл. 4.3 ($C_1 = C_0$) та табл. 4.4.

Таблиця 4.3 – Значення комплексних критеріїв ефективності ЛІЕП мультиякірних конфігурацій при різних формах струму збудження індуктора

Форма струму збудження		ЛІЕП	Стратегія оцінки					
			1	2	3	4	5	6
1	Однополярна	ЛІЕП-К-Е	0,96	0,79	1,09	1,05	0,86	0,99
		ЛІЕП-К-Е-Ф	1,20	1,00	1,52	1,21	1,06	1,21
2	Коливально-загасаюча	ЛІЕП-К-Е	1,10	1,03	1,23	1,08	1,05	1,10
		ЛІЕП-К-Е-Ф	1,76	1,72	1,79	1,97	1,64	1,66
3	Аперіодична	ЛІЕП-К-Е	1,67	1,85	1,58	1,77	1,64	1,49
		ЛІЕП-К-Е-Ф	2,77	3,47	2,71	2,64	2,66	2,35
4	Аперіодична з підживленням при $U_1 = 0{,}7 \cdot U_0$	ЛІЕП-К-Е	1,70	1,90	1,61	1,80	1,67	1,51
		ЛІЕП-К-Е-Ф	3,13	4,18	2,81	3,01	3,02	2,61
5	Аперіодична з підживленням при $U_1 = 0{,}6 \cdot U_0$	ЛІЕП-К-Е	1,69	1,90	1,59	1,79	1,66	1,50
		ЛІЕП-К-Е-Ф	3,05	4,03	2,79	2,92	2,95	2,55
6	Аперіодична з підживленням при $U_1 = 0{,}5 \cdot U_0$	ЛІЕП-К-Е	1,71	1,91	1,65	1,81	1,68	1,52
		ЛІЕП-К-Е-Ф	2,99	3,87	2,83	2,85	2,88	2,51

На рис. 4.15 показані гістограми комплексних критеріїв ефективності ЛІЕП мультиякірних конфігурацій при різних формах струму збудження індуктора та при різних стратегіях. А на рис. 4.16 показані гістограми комплексних критеріїв ефективності ЛІЕП при збудженні аперіодичною з підживленням формою струму при U_0 = 1,0 кВ, C_0 =1 мФ, $U_1 = 0{,}6 \cdot U_0$ при різних стратегіях.

Таблиця 4.4 – Значення комплексних критеріїв ефективності ЛІЕП мультиякірних конфігурацій при збудженні аперіодичною з підживленням формою струму при U_0 = 1,0 кВ, C_0 =1 мФ, $U_1 = 0{,}6 \cdot U_0$

Ємність C_1, мФ	ЛІЕП	Стратегія					
		1	2	3	4	5	6
0	ЛІЕП-К-Е	1,07	1,41	1,16	1,33	0,42	1,05
	ЛІЕП-К-Е-Ф	3,40	4,50	3,15	3,27	3,25	2,83
0,5	ЛІЕП-К-Е	1,69	1,90	1,59	1,78	1,66	1,50
	ЛІЕП-К-Е-Ф	2,98	3,82	2,86	2,83	2,86	2,51
1,0	ЛІЕП-К-Е	1,49	1,39	1,41	1,91	1,38	1,35
	ЛІЕП-К-Е-Ф	3,12	4,09	2,92	2,97	3,00	2,60
1,5	ЛІЕП-К-Е	1,66	1,89	1,52	1,77	1,65	1,47
	ЛІЕП-К-Е-Ф	3,26	4,38	2,96	3,11	3,14	2,70
2,0	ЛІЕП-К-Е	1,73	1,95	1,65	1,83	1,70	1,52
	ЛІЕП-К-Е-Ф	3,46	4,69	3,13	3,30	3,32	2,85

На основі проведених розрахунків можна зробити висновок, що ефективність обох ЛІЕП мультиякірних конфігурацій при всіх стратегіях оцінки вище, ніж в ЛІЕП-Е. Винятком є ЛІЕП-К-Е при збудженні однополярною формою струму. Найбільша ефективність перетворювачів мультиякірних конфігурацій є при збудженні аперіодичною формою струму та використанні стратегії оцінки № 2, при якій пріоритет в оцінюванні віддано ККД. При однополярній формі струму збудження найбільшу ефективність проявляють перетворювачі, що оцінюються стратегією № 3, при якій пріоритет

в оцінюванні віддано мінімальному значенню середнього рівня поля розсіювання на заданому контурі.

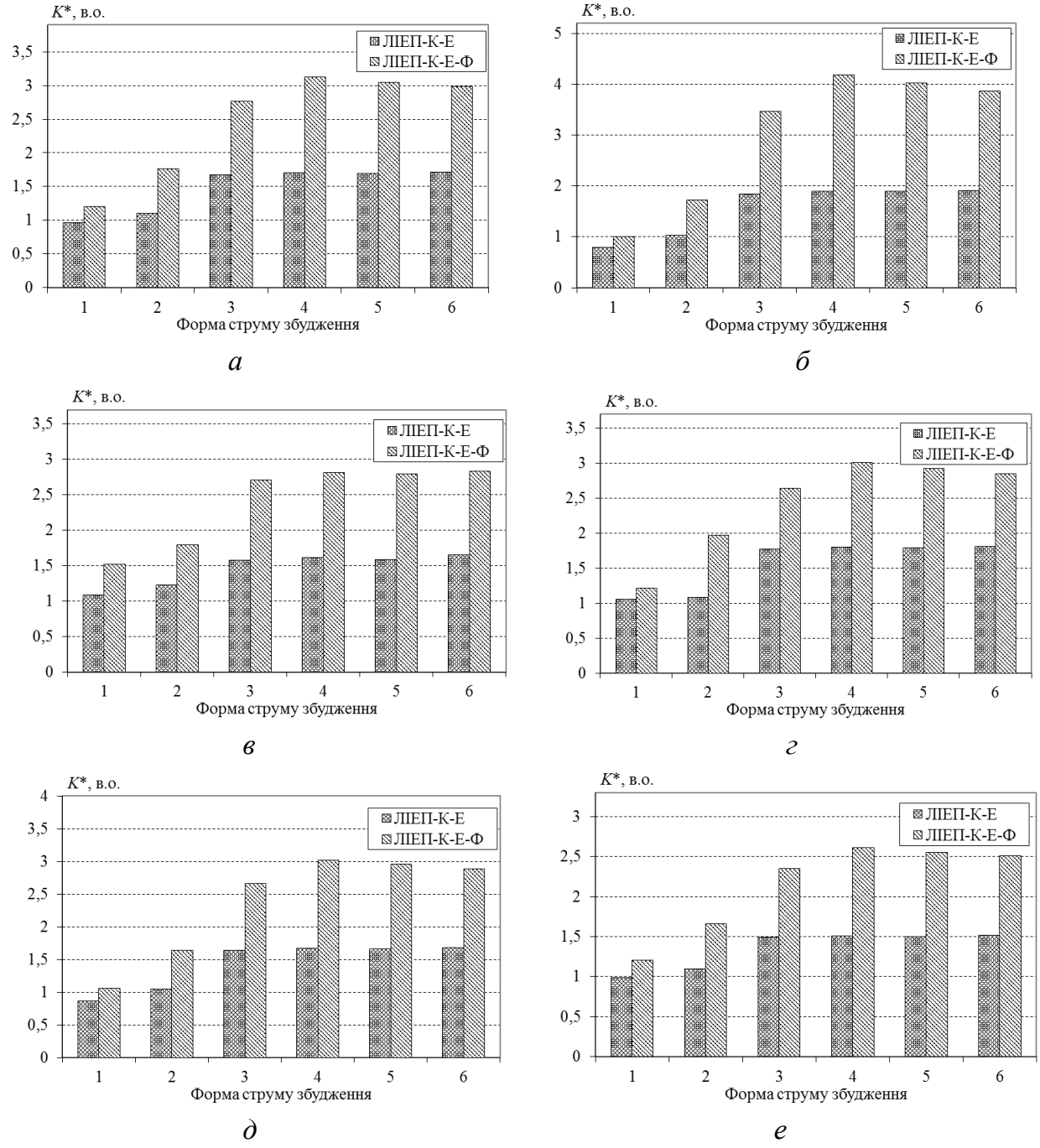


Рисунок 4.15– Гістограми комплексних критеріїв ефективності ЛІЕП мультиякірних конфігурацій при різних формах струму збудження індуктора та при різних стратегіях: стратегія I (*а*), стратегія II (*б*), стратегія III (*в*), стратегія IV (*г*), стратегія V (*д*), стратегія VI (*е*)

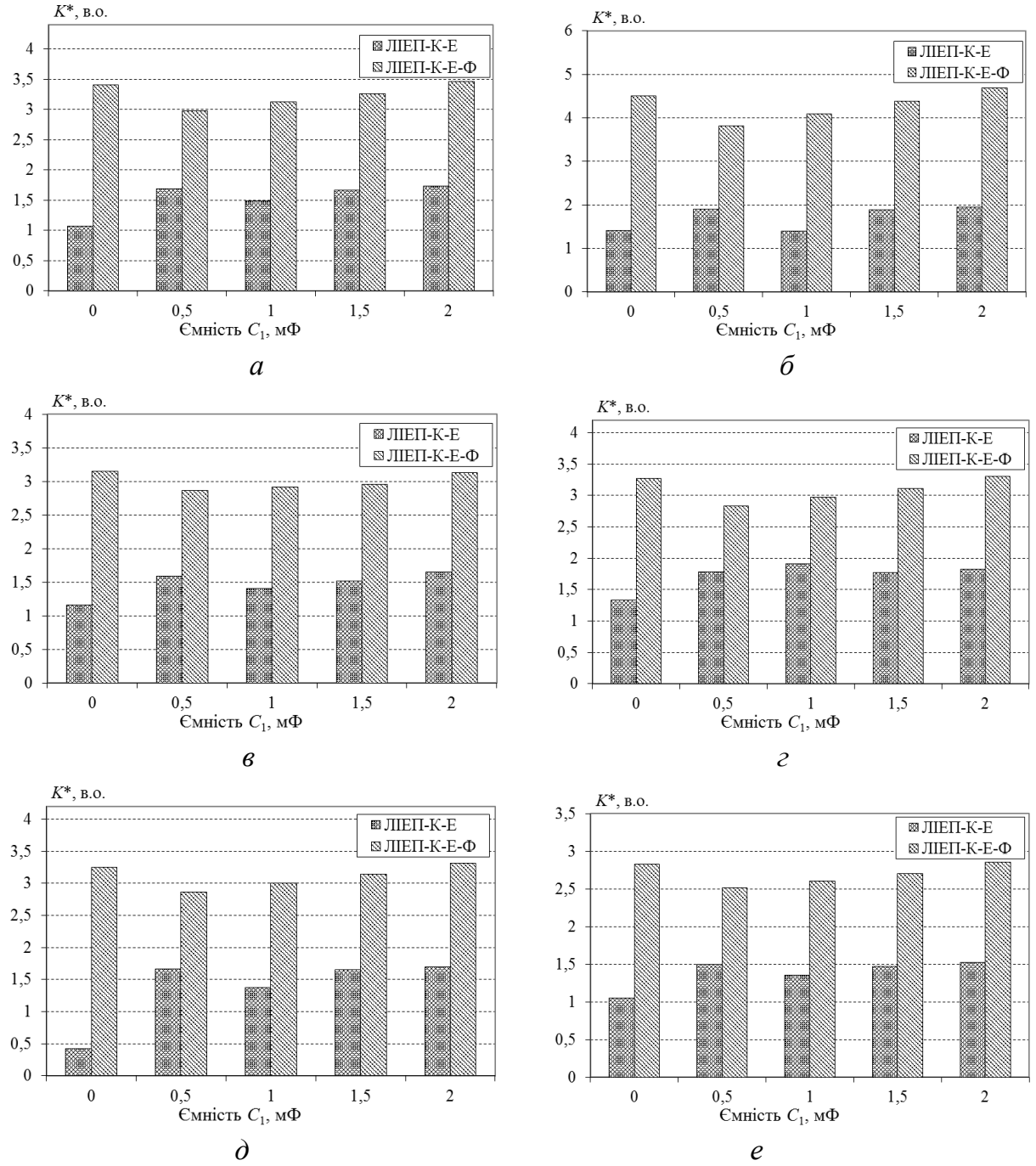


Рисунок 4.16 – Гістограми комплексних критеріїв ефективності ЛІЕП мультиякірних конфігурацій при збудженні аперіодичною з підживленням формою струму при U_0 = 1,0 кВ, C_0 =1 мФ, $U_1 = 0{,}6 \cdot U_0$ при різних стратегіях: стратегія I (*а*), стратегія II (*б*), стратегія III (*в*), стратегія IV (*г*), стратегія V (*д*), стратегія VI (*е*)

При коливально-загасаючій формі струму збудження найбільша ефективність ЛІЕП-К-Е виникає при стратегії оцінки № 3, а ЛІЕП-К-Е-Ф при стратегії оцінки № 4, при якій найбільший пріоритет в оцінюванні віддано величині імпульсу сили. Зазначимо, що при всіх стратегіях

оцінки ефективність перетворювача ЛІЕП-К-Е-Ф II рівня в 1,7–2,1 рази вище, ніж у перетворювача ЛІЕП-К-Е.

Таким чином форма струму збудження ОІ істотно впливає на електромеханічні характеристики та показники ЛІЕП мультиякірних конфігурацій. В порівнянні з ЛІЕП індукційного типу ці перетворювачі мають більшу ефективність. Встановлено, що для всіх форм струму збудження при всіх стратегіях оцінки ефективність ЛІЕП-К-Е-Ф в 1,7–2,1 рази вище, ніж ефективність ЛІЕП-К-Е.

4.3 Вплив обмеження тривалості струму обмотки якоря на робочі показники ЛІЕП індукційного типу

У ЛІЕП-Е короткозамкнена обмотка якоря (ОЯ) може бути виконана одно- або багатовитковою. При одновитковому виконанні ОЯ представляє собою, як правило, масивний електропровідний диск. Однак індукований струм по такому диску розподілений суттєво нерівномірно. При багатовитковому виконанні ОЯ щільно намотана проводом відносно малого поперечного перерізу і просочена компаундом на основі епоксидної смоли. У такій обмотці індукований струм розподіляється рівномірно по всьому перерізу, що забезпечує більш рівномірний силовий вплив на виконавчий елемент.

Як показують дослідження, через фазовий зсув між струмом збудження в ОІ і індукованим струмом в короткозамкненій ОЯ крім початкових ЕДЗ відштовхування виникають і наступні ЕМЗ тяжіння [128]. Внаслідок цього робочі показники перетворювача знижується [129]. ЕМЗ тяжіння виникають через зміну полярності індукованого струму в ОЯ, тоді як полярність струму збудження в ОІ може залишатися незмінною.

Усунути ЕМЗ тяжіння можна шляхом обмеження тривалості індукованого струму в ОЯ до зміни його полярності. Для цього в обмотку якоря можна підключити випрямний діод *VD* (рис. 4.17). Обмеження струму в магнітно-імпульсній установці для зміни впливу ЕДЗ на вторинний електропровідний

елемент з використанням керованого вакуумного розрядника описано в роботі [130]. Але в тому дослідженні метою було збільшення ЕМЗ тяжіння, тоді як для ЛІЕП такі сили є небажаними.

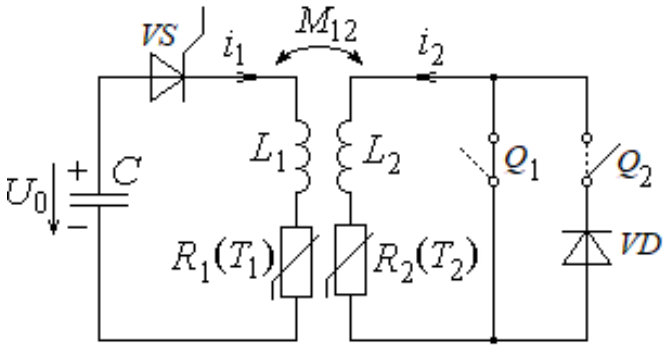


Рисунок. 4.17 – Електрична схема ЛІЕП за відсутності (Q_1, Q_2 – суцільні лінії) та наявності (Q_1, Q_2 – штрихові лінії) діода *VD* в обмотці якоря

Забезпечення однієї полярності індукованого струму можна реалізувати шляхом підключення діода *VD* до багатовиткової ОЯ, тому в подальшому будемо саме її розглядати. Однак при цьому не досліджено доцільність обмеження тривалості індукованого струму в обмотці якоря до зміни його полярності в ЛІЕП силового і швидкісного призначення [131].

Будемо вважати, що при роботі ЛІЕП силового призначення в якості ударно-силового пристрою переміщення обмотки якоря з виконавчим елементом відсутнє, а при роботі ЛІЕП швидкісного призначення в якості електромеханічного прискорювача якір переміщається на значну відстань з виконавчим елементом, який має відносно малу масу. Для збудження ЛІЕП-Е від ЄНЕ використовуємо однополярний імпульс струму в ОІ, що формується пусковим тиристором *VS* (рис. 4.17). Це дозволяє зберігати частину енергії в ЄНЕ до кінця робочого циклу. Для обмеження тривалості індукованого струму в ОЯ до зміни його полярності використовуємо випрямний діод *VD*. Вважаємо, що для напівпровідникових приладів *VS* і *VD* опори в прямому напрямку рівні нулю, а в зворотному напрямку – нескінченно великі.

Розглянемо ЛІЕП, у якого ОІ (n=1) і ОЯ (n=2) виконані у вигляді монолітних дискових котушок, щільно намотаних мідним проводом круглого перерізу діаметром d_0=1,3 мм і просочених епоксидним компаундом. Зовнішній діаметр обмоток D_{ex}=100 мм, їх внутрішній діаметр D_{in}=10 мм. Аксіальна висота ОІ H_1=6 мм і ОЯ H_2=3 мм. Число витків ОІ N_1=120 і ОЯ N_2=60. Початкова відстань між обмотками h_{z0}=1 мм. ЄНЕ має енергію W_0=500 Дж і його ємність C_0 змінюється в діапазоні від 0,5 до 5,0 мФ при відповідній зміні початкової напруги $U_0 = \sqrt{2W_0C_0^{-1}}$. При роботі ЛІЕП в якості прискорювача маса виконавчого елемента m_a=0,5 кг.

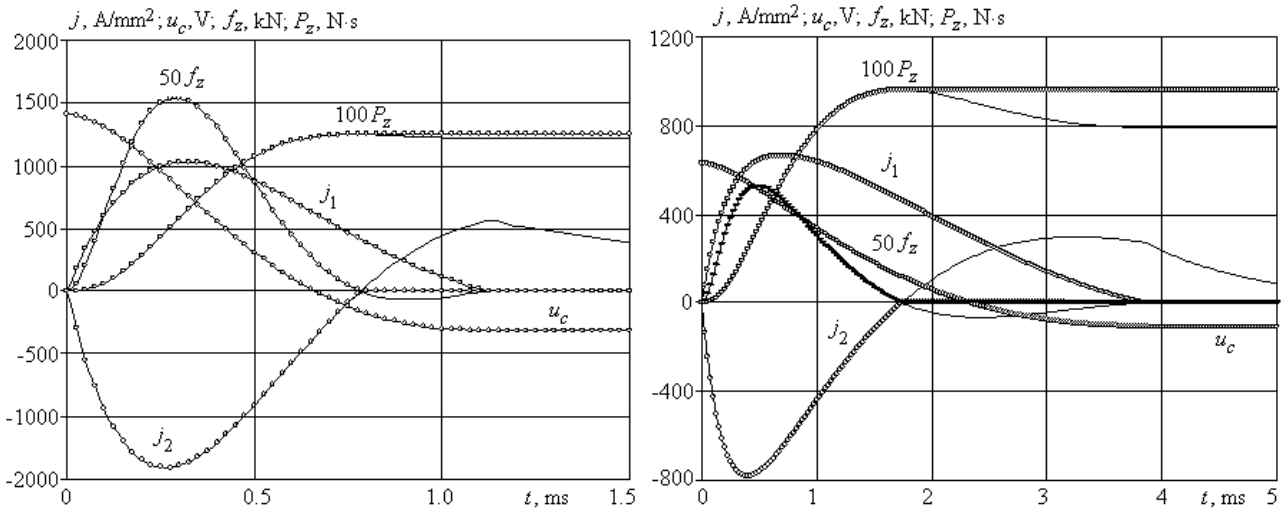
Проведемо аналіз електромеханічних характеристик і робочих показників ЛІЕП-Е, у якого в ОЯ здійснюється обмеження тривалості індукованого струму до зміни його полярності (Q_1 розімкнений, Q_2 замкнений), порівняно з ЛІЕП, у якого відсутнє таке обмеження (Q_1 замкнений, Q_2 розімкнений) (рис. 4.17).

При аналізі роботи ЛІЕП враховуватимемо наступні робочі показники: струм збудження, температуру нагрівання обмоток і силу віддачі. Максимальний струм збудження пропорційний амплітуді щільності струму в ОІ j_{1m}, температура нагрівання ОІ – перевищенню її температури θ_1, а сила віддачі – амплітуді ЕДЗ f_{zm}. Максимальний струм збудження впливає на параметри електронного джерела, температура нагрівання на тривалість роботи перетворювача в циклічному режимі, а сила віддачі на механічну надійність. Так, для ручних ударних інструментів і різних автономних пускачів сила віддачі негативно впливає як на сам пристрій, так і на обслуговуючий персонал. Особливо негативно сила віддачі проявляється у вимірювальних пристроях. Так, у балістичному лазерному гравіметрі, призначеному для вимірювання прискорення вільного падіння, використовується електромеханічна катапульта, яка забезпечує вертикальне підкидання кутового оптичного відбивача [134]. Сила віддачі викликає автосейсмічні коливання, що знижують точність вимірювання гравіметру [135].

При роботі ЛІЕП в якості ударно-силового пристрою його ефективність будемо оцінювати найбільшою величиною імпульсу ЕДС

$P_z = \int_0^t f_z(t)dt$ при мінімальних величинах сили віддачі, струму збудження та температури нагрівання ОІ.

На рис. 4.18 представлені електромеханічні характеристики ЛІЕП за відсутності (суцільні лінії) та наявності (лінії з кружками) обмеження тривалості індукованого струму в ОЯ до зміни його полярності.



а *б*

Рисунок 4.18 – Електромеханічні характеристики ЛІЕП при роботі як ударно-силовий пристрій при C_0: 0,5 мФ (*а*) та 2,5 мФ (*б*)

При використанні ЄНЕ ємністю C_0=0,5 мФ максимальна щільність струму в обмотці індуктора становить j_{1m}=1,03 кА/мм^2, а обмотці якоря – j_{2m}=1,41 кА/мм^2 (рис. 4.18, а). Амплітуда ЕДЗ f_{zm}=30,85 кН. За відсутності обмеження індукованого струму в короткозамкненій ОЯ (без діода *VD* на рис.1) до кінця робочого циклу перевищення температури ОІ становить θ_1=1,58 ºС, а перевищення ОЯ θ_2=2,87 ºС. За рахунок ЕДЗ тяжіння величина імпульсу цих силь, досягаючи максимального значення P_{zm} =12,5 Н·с, до кінця робочого циклу знижується до P_{zf} =12,19 Н·с.

При використанні ЄНЕ підвищеної ємності (C_0=2,5 мФ), а значить і зниженої напруги U_0, максимальні значення густин струму в ОІ знижується до j_{1m}=0,67 кА/мм^2, в ОЯ до j_{2m}=0,78 кА/мм^2, ЕДЗ до f_{zm}=10,58 кН (рис. 4.18,б). Але

до кінця робочого циклу перевищення температури ОІ збільшується до θ_1=2,15 ºС, а перевищення температури ОЯ зменшується до θ_2=1,86 ºС. При цьому величина імпульсу ЕДЗ, досягаючи максимального значення P_{zm}=9,61 Н·с, до кінця робочого циклу знижується до P_{zf}=7,94 Н·с. При збільшенні ємності C_0 ЄНЕ і незмінної енергії W_0=500 Дж напруга U_0 зменшується, що зумовлює зміну основних робочих показників ЛІЕП (рис. 4.19, а).

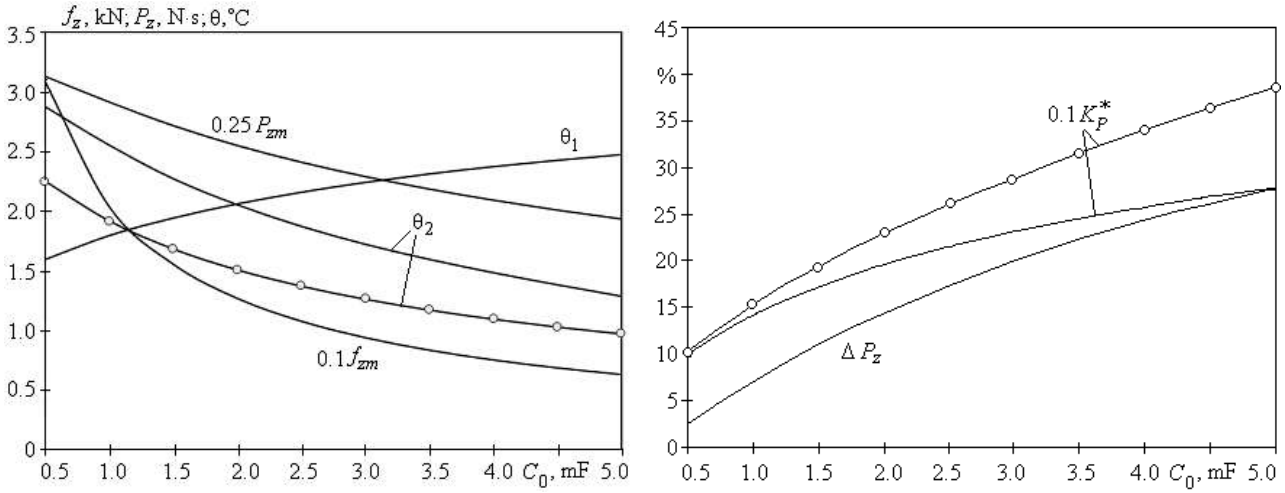


Рисунок 4.19 – Залежність робочих показників ЛІЕП при роботі в якості ударно-силового пристрою від ємності ЄНЕ при W_0=500 Дж

При збільшенні C_0 від 0,5 до 5,0 мФ амплітуда ЕДЗ f_{zm} зменшується приблизно в 5 разів (від 30,85 до 6,06 кН), але величина максимального імпульсу ЕДЗ P_{zm} зменшується приблизно в 1,5 рази (від 12,5 до 7,7 Н·с). За такого збільшення ємності C_0 перевищення температури обмотки індуктора θ_1 збільшується від 1,58 до 2,47 ºС. Зазначені показники практично не залежать від наявності або відсутності обмеження тривалості індукованого струму в ОЯ до зміни його полярності. Однак обмеження тривалості струму впливає на перевищення температури ОЯ θ_2. У перетворювачі без обмеження струму короткозамкненої обмотки якоря величина θ_2 зменшується від 2,87 до 1,27 ºС. За наявності зазначеного обмеження за рахунок підключення діода *VD* величина θ_2 нижче, ніж за його відсутності, і зменшується від 2,24 до 0,96 ºС.

Для того, щоб оцінити ефективність роботи ЛІЕП в якості ударно-силового пристрою в залежності від величини ємності C_0 ЄНЕ при W_0=500 Дж використовуємо величину відносного зменшення імпульсу ЕДЗ $\Delta P_z = 100\left(P_{zm} - P_{zf}\right)P_{zm}^{-1},\%$ і відносний критерій ефективності $K_P^* = 100\dfrac{P_{zf}^*}{j_{1m}^* f_{zm}^* \theta_1^*},\%$.

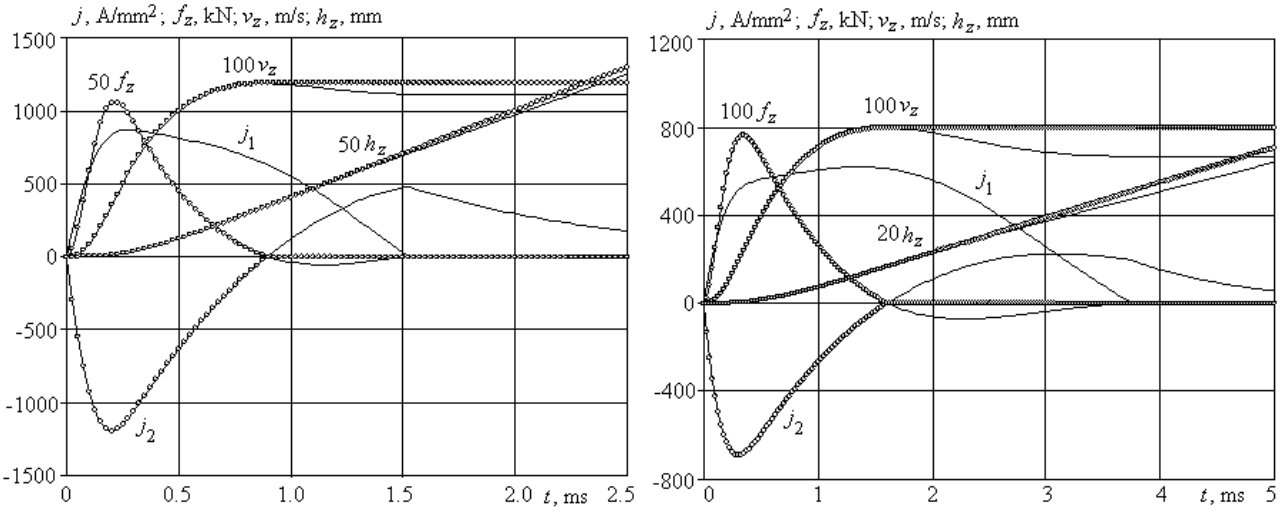
Як базовий варіант для K_P^* використовуємо перетворювач, що збуджується від ЄНЕ ємністю C_0=0,5 мФ без обмеження струму в короткозамкненій обмотці якоря. При збільшенні C_0 від 0,5 до 5,0 мФ та відсутності обмеження струму в ОЯ відносне зменшення імпульсу ЕРС ΔP_z зростає від 2,5 до 27,6% (рис. 4.19, б). Однак критерій ефективності ЛІЕП K_P* при цьому збільшується в 2,78 разів насамперед за рахунок зменшення амплітуди щільності струму в обмотці індуктора j_{1m} і амплітуди ЕРЗ f_{zm}.

За наявності обмеження тривалості струму в ОЯ за рахунок підключення діода *VD* через відсутність зменшення імпульсу ЕДЗ величина критерію ефективності K_P* підвищується (на 38,6 % при C_0=0,5 мФ) Це показує перспективність даного технічного рішення щодо усунення ЕДЗ тяжіння при роботі ЛІЕП в якості ударно-силового пристрою.

При роботі ЛІЕП в якості електромеханічного прискорювача його ефективність оцінюватимемо найбільшою величиною ККД

$$\eta = 100C_0^{-1}\left(m_2 + m_a\right)v^2\left(U_0^2 - U_1^2\right)^{-1},\%, \qquad (4.3)$$

який враховує кінетичну енергію якоря разом із виконавчим елементом та залишкову напругу ЄНЕ в кінці робочого циклу U_1. На рис. 4.20 представлені електромеханічні характеристики ЛІЕП за відсутності (суцільні лінії) і наявності (лінії з кружками) обмеження індукованого струму в обмотці якоря. При використанні ЄНЕ ємністю C_0=0,5 мФ максимальна щільність струму в ОІ становить j_{1m}=0,87 кА/мм^2, а в ОЯ – j_{2m}=1,19 кА/мм^2 (рис. 4.20, а), тобто вони нижче, ніж при роботі ЛІЕП в якості ударно-силового устрою. Відповідно менше і амплітуда ЕДЗ f_{zm}=21,16 кН.



а *б*

Рисунок 4.20 – Електромеханічні характеристики ЛІЕП при роботі в якості електромеханічного прискорювача при C_0: 0,5 мФ (*а*) та 2,5 мФ (*б*)

У перетворювачі без обмеження струму в короткозамкненій обмотці якоря максимальна швидкість v_m=11,86 м/с до кінця робочого циклу практично не зменшується, що забезпечує ККД електромеханічного прискорювача η=14,24 %. Перевищення температури ОІ становить θ_1=1,84 ºС, а перевищення ОЯ θ_2=2,02 ºС. При використанні ЄНЕ ємністю C_0=2,5 мФ максимальне значення щільності струму в ОІ знижується до j_{1m}=0,621 кА/мм^2, а в ОЯ - до j_{2m}=0,69 кА/мм^2, ЕДЗ - до f_{zm}=7, 62 кН (рис. 4.20, б). До кінця робочого циклу перевищення температури ОІ збільшується до θ_1=2,6 ºС, а в ОЯ знижується до θ_2=1,12 ºС. Швидкість обмотки якоря, досягаючи максимального значення v_{zm}=7,97 м/с, до кінця робочого циклу помітно знижується, складаючи v_{zf} =6,69 м/с. В результаті ККД перетворювача, досягаючи максимального значення η_m=5,29%, до кінця робочого циклу знижується до η_f =3,65%.

Для того, щоб оцінити ефективність ЛІЕП при роботі в якості електромеханічного прискорювача використовуємо величини відносного зменшення швидкості $\Delta v = 100\left(v_{zm} - v_{zf}\right)v_f^{-1},\%$ і ККД $\Delta\eta = 100\left(\eta_m - \eta_f\right)\eta_m^{-1},\%$, також відносний критерій ефективності $K_v^* = 100\dfrac{v_f^*}{j_{1m}^* f_{zm}^* \theta_1^*},\%$. У якості базового

варіанту використаний ЄНЕ ємністю C_0=500 мкФ при відсутності обмеження струму в короткозамкненій ОЯ.

При збільшенні ємності C_0 від 0,5 до 5,0 мФ (W_0=500 Дж) та відсутності обмеження струму обмотки якоря (гладкі лінії на рис. 4.21), максимальна швидкість v_{zm} зменшується від 11,86 до 6,19 м/с, що призводить до зменшення максимального ККД η_m від 14,24 до 4,02 %, збільшення перевищення температури ОІ θ_1 від 1,84 до 2,87 ºС і зменшення аналогічної величини для ОЯ θ_2 від 2,02 до 0,78 ºС. Величина відносного зменшення швидкості ОЯ Δv збільшується від 5,9 до 21,97 %. Величина відносного зменшення ККД $\Delta\eta$ проявляється лише після збільшення ємності C_0 понад 1 мФ. Вона збільшується до $\Delta\eta$=57 % при C_0=5 мФ. Відносний критерій ефективності перетворювача K_v^* збільшується практично вдвічі насамперед за рахунок зменшення амплітуди щільності струму в ОІ j_{1m} від 870,1 до 551,5 А/мм^2 і амплітуди ЕДС f_{zm} від 21,16 до 4,62 кН.

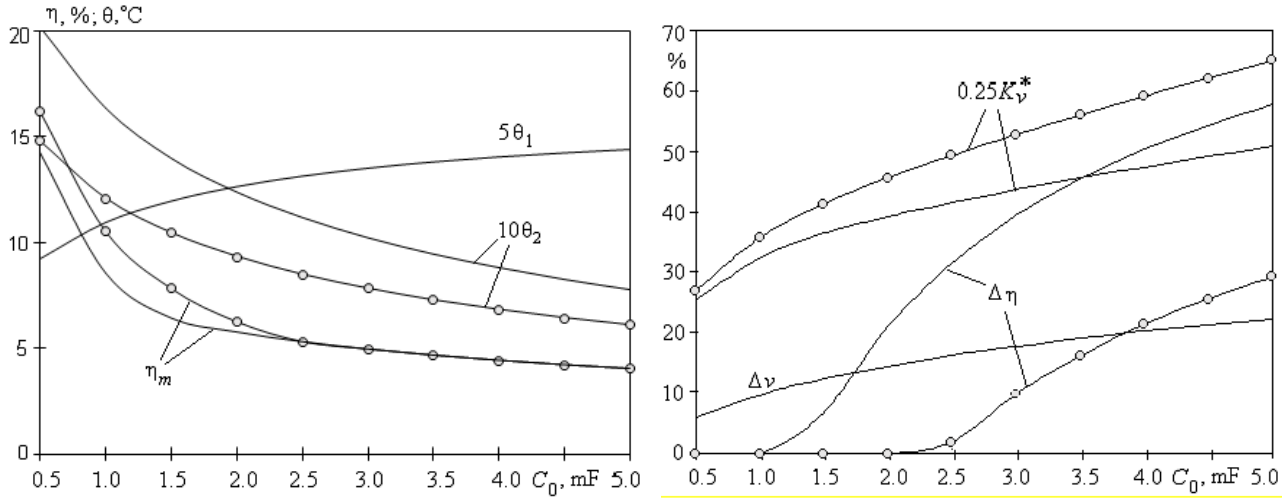


Рисунок 4.21 – Залежність робочих показників ЛІЕП при роботі в якості електромеханічного прискорювача від ємності ЄНЕ при W_0=500 Дж

За наявності обмеження струму в ОЯ за рахунок підключення діода *VD* (лінії з кружками на рис. 4.21) критерій ефективності K_v* підвищується, причому більшою мірою при збільшенні ємності накопичувача енергії. Так при C_0=5,0 мФ та відсутності діода K_v*=2,01, а за наявності діода K_v*=2,56.

Величина відносного зменшення ККД Δη істотно зменшується. Вона виникає лише після збільшення ємності понад C_0=2,5 мФ та збільшується до Δη=28,86 % при C_0=5,0 мФ. Максимальний ККД η_m збільшується тільки в діапазоні C_0 від 0,5 до 2,0 мФ, становлячи η_m=16,16% при C_0=0,5 мФ. Перевищення температури ОЯ θ_2 зменшується, змінюючись у вказаному діапазоні від 1,48 до 0,61 ºС.

Таким чином, обмеження тривалості індукованого струму в обмотці якоря до зміни його полярності шляхом підключення до неї випрямного діода забезпечує підвищення силових показників при роботі ЛІЕП в якості ударно-силового пристрою і збільшення швидкісних показників при роботі перетворювача в якості електромеханічного прискорювача.

4.4 Підвищення ефективності ЛІЕП за рахунок збудження серією імпульсів

Одним із шляхів підвищення швидкісних показників ЛІЕП є формування струмових імпульсів в ОІ за допомогою електронної системи імпульсного джерела.

Розглянемо **ЛІЕП індукційного типу** пр роботі в якості катапульти, яка забезпечує вертикальне підкидання виконавчого елемента. Основною проблемою катапульти є механічна дія, яка виникає при підкиданні. Через короткочасний і значний за амплітудою імпульс ЕДЗ між ОІ та ЕЯ виникають автосейсмічні коливання, які від ОІ передаються на фундамент. Подібна проблема виникає у всіх ЛІЕП, яка проявляється у вигляді сили віддачі.

Зменшити силу віддачі можна шляхом збільшення тривалості та зменшення амплітуди імпульсу ЕДЗ між ОІ та ЕЯ [136]. Це можна зробити за рахунок створення серії короткочасних силових імпульсів знижених амплітуд. Причому тривалість цієї серії переважно визначається періодом проходження імпульсів. Зауважимо, що подібний спосіб живлення ЛІЕП від ЄНЕ почав вивчатися фахівцями [137, 138].

Розглянемо коаксіальний ЛІЕП індукційного типу, що забезпечує вертикальне підкидання ЕЯ з ВЕ (рис. 4.22). Прискорювач живиться від імпульсного джерела, який містить ЄНЕ, характеризується ємністю C_0 і напругою заряду U_0. Пусковий тиристор *VS* забезпечує однополуперіодний струмовий імпульс в ОІ. Під дією ЕДЗ ЕЯ разом з ВЕ переміщається вертикально нагору зі швидкістю v_z на висоту h вздовж осі z. При такому живленні ЛІЕП-Е відбувається збереження частини енергії в ЄНЕ, яка в подальшому може використовуватися для плавного гальмування ЕЯ при падінні вниз на ОІ [136].

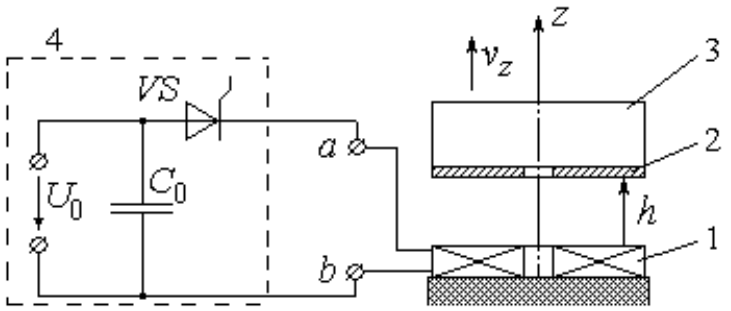


Рисунок 4.22 – Схема ЛІЕП-Е в якості катапульти: 1 – ОІ; 2 – ЕЯ; 3 – ВЕ; 4 – імпульсне джерело живлення; *a*, *b* – клеми джерела

Розглянемо математичну модель ЛІЕП, у якій використовуються зосереджені параметри активних елементів ОІ та ЕЯ [139]. Для врахування взаємопов'язаних електричних, магнітних, механічних та теплових процесів, а також низки нелінійних залежностей розв'язання рівнянь, що описують зазначені процеси, представимо у рекурентному вигляді. Для розрахункової моделі використовуємо такі припущення: усі елементи ЛІЕП, крім його активних елементів, виготовлені з ізоляційного чи непровідного матеріалу; струм розподілений за перерізом ЕЯ та провідниками ОІ рівномірно; впливом підвідних та сполучних проводів нехтуємо; усі елементи ЛІЕП виконані абсолютно жорсткими; ЕЯ встановлений та переміщається щодо ОІ аксіально; опір пускового тиристора *VS* у прямому напрямку дорівнює нулю, а у зворотному напрямку його провідність дорівнює нулю (рис. 4.22).

Електричні процеси в активних елементах (ОІ та ЕЯ) ЛІЕП можна описати системою рівнянь [139]:

$$R_1(T_1)i_1 + L_1\frac{di_1}{dt} + u_c + M_{12}(z)\frac{di_2}{dt} + i_2 v_z(t)\frac{dM_{21}}{dz} = 0,\ u_c = U_0 + \frac{1}{C_0}\int_0^t i_1 dt, \tag{4.4}$$

$$R_2(T_2)\cdot i_2 + L_2\frac{di_2}{dt} + M_{21}(z)\frac{di_1}{dt} + i_1 v_z(t)\frac{dM_{12}}{dz} = 0, \tag{4.5}$$

де n = 1, 2 – індекси ОІ та ЕЯ відповідно; R_n, L_n, T_n, i_n – активний опір, індуктивність, температура та струм n-го активного елемента відповідно; $M_{12}(z)$ – взаємна індуктивність між ОІ та ЕЯ; u_c – напруга ЄНЕ.

Введемо позначення:

$$R_1 = R_1(T_1); R_2 = R_2(T_2); M_{12} = M_{12}(z) = M_{21}(z);\ v_z = v_z(t).$$

Система рівнянь (4.4) – (4.5) після низки перетворень наводиться до рівняння:

$$a_3\frac{d^3 i_1}{dt^3} + a_2\frac{d^2 i_1}{dt^2} + a_1\frac{di_1}{dt} + a_0 i_1 = 0, \tag{4.6}$$

де $a_3 = \upsilon;\ a_2 = \chi - 2M_{12}\iota;\ a_0 = \frac{R_2}{C_0};\ \iota = v_z\frac{dM_{12}}{dz};$

$a_1 = R_1R_2 + L_2C_0^{-1} - \iota^2;\ \upsilon = L_1L_2 - M_{12}^2;\ \ \chi = R_1L_2 + L_1R_2.$

Характеристичне рівняння, що відповідає диференційному рівнянню (4.6), подається у вигляді:

$$x^3 + r_* x^2 + s_* x + t_* = 0, \tag{4.7}$$

де $r_* = a_2/a_3$; $s_* = a_1/a_3$; $t_* = a_0/a_3$.

Використовуючи заміну $y = x + r_*/3$, рівняння (4.7) наводиться до вигляду:

$$y^3 + p_* y + q_* = 0, \tag{4.8}$$

де $p_* = s_* - r_*^2/3;\ q_* = 2(r_*/3)^3 - r_* s_*/3 + t_*.$

Корені рівняння (4.8) знаходяться з використанням формули Кардано:

$$y_1 = u_* + v_*;\ y_2 = \varepsilon_1 u_* + \varepsilon_2 v_*;\ y_3 = \varepsilon_2 u_* + \varepsilon_1 v_*, \tag{4.9}$$

де $u_* = \sqrt[3]{D^{0,5} - 0{,}5q_*}$; $v_* = \sqrt[3]{-D^{0,5} - 0{,}5q_*}$; $\varepsilon_{1,2} = 0{,}5\left(-1 \pm j\sqrt{3}\right)$; $D = (p_*/3)^3 + (q_*/2)^2$ – дискримінант рівняння (4.8).

Якщо $D<0$, то кубічне рівняння (4.8) має три (p=1, 2, 3) дійсних кореня:

$$y_p = 2\sqrt[6]{-p_*^3/27}\cos\left[\frac{1}{3}\arccos\left(-\frac{q_*}{2\sqrt{-p_*^3/27}}\right)+\frac{2}{3}\pi(p-1)\right]. \qquad (4.10)$$

Після низки перетворень отримуємо вираз струмів в активних елементах ЛІЕП:

$$i_n(t_{k+1}) = \delta^{-1}\left\{\left[i_n(t_k)-\frac{i_m(t_k)\iota^2}{R_1R_2}\right](\alpha_1\beta_2\beta_3+\alpha_2\beta_1\beta_3+\alpha_3\beta_1\beta_2)+\right.$$
$$+(\Omega_n - R_n^{-1}\Omega_m\iota)[\alpha_1(\beta_2+\beta_3)+\alpha_2(\beta_1+\beta_3)+\alpha_3(\beta_1+\beta_2)]+$$
$$\left.+(\Lambda_n - R_n^{-1}\Lambda_m\iota)(\alpha_1+\alpha_2+\alpha_3)\right\}[1-\iota^2R_1^{-1}R_2^{-1}]^{-1}, \qquad (4.11)$$

де m=1, 2 при n=2, 1; $\Omega_n = B_n + R_n^{-1}B_m\iota$; $\Lambda_n = E_n + R_n^{-1}E_m\iota$;

$\beta_p = \left\{2(a_2^2-3a_1a_3)^{0,5}\cos[2\pi(p-1)/3+\varsigma]-a_2\right\}/3a_3$; $\delta = \beta_1\beta_2(\beta_2-\beta_1)+\beta_1\beta_3(\beta_1-\beta_3)+\beta_2\beta_3(\beta_3-\beta_2)$;

$\alpha_1 = (\beta_3-\beta_2)\exp(\beta_1\Delta t)$; $\alpha_2 = (\beta_1-\beta_3)\exp(\beta_2\Delta t)$; $\alpha_3 = (\beta_2-\beta_1)\exp(\beta_3\Delta t)$; $\Delta t = t_{k+1}-t_k$;

$\varsigma = \arccos\left|(a_2^2-3a_1a_3)^{-1,5}(4{,}5a_1a_2a_3-a_2^3-13{,}5a_0a_3^2)\right|$;

$B_n = \upsilon^{-1}[i_n(t_k)(M_{12}\iota - R_nL_m)+i_m(t_k)(R_mM_{12}-L_m\iota)-\gamma_k u_c(t_k)]$;

$E_1 = \upsilon^{-2}\{i_1(t_k)[R_1(R_2M_{12}^2+R_1L_2^2-C^{-1}L_2\upsilon)-M_{12}\iota(\chi+2R_1L_2)+$

$+\iota^2(L_1L_2+M_{12}^2)]+i_2(t_k)[(L_2\chi+2R_2M_{12}^2)\iota-M_{12}R_2\chi-\iota^2M_{12}L_2]+;$

$+u_c(t_k)(R_2M_{12}^2+L_2^2R_1-2L_2M_{12}\iota^2)\}$;

$E_2 = \upsilon^{-2}\{i_1(t_k)[M_{12}(C^{-1}\upsilon-R_1\chi)+(2R_1M_{12}^2+L_1\chi)\iota-2L_1M_{12}\iota^2]+$

$+i_2(t_k)[R_2(R_1M_{12}^2+R_2L_1^2)-M_{12}(2L_1R_2+\chi)\iota+(L_1L_2+M_{12}^2)\iota^2]+,$

$+u_c(t_k)[(L_1L_2+M_{12}^2)\iota-M_{12}\chi]\}$; $\gamma_1 = L_2$; $\gamma_2 = -M_{12}$.

Якщо $D>0$, то один корінь рівняння (4.8) є дійсним, а два інших – комплексно пов'язані $x_{2,3} = f \pm jg$. Після низки перетворень отримуємо вираз струмів в активних елементах:

$$i_n(t_{k+1}) = \left(\xi_n - \frac{\xi_m v_z\iota}{R_n}\right)\Bigg/\left[1-\frac{\iota^2}{R_1R_2}\right], \qquad (4.12)$$

де $\xi_n = g^{-1}\left[g^2+(f-d)^2\right]^{-1}\left\langle g\cdot\exp(d\Delta t)\left[(g^2+f^2)\Theta_n - 2f\Omega_n+\Lambda_n\right]+\right.$

$$\left.+\exp(f\Delta t)\{\sin(g\Delta t)d(f^2-g^2-fd)\Theta_n+(g^2+d^2-f^2)\Omega_n+\right.$$

$$+\left(f-d\right)\Lambda_n+g\cdot\cos(g\Delta t)\left[d\left(d-2f\right)\Theta_n+2f\Omega_n-\Lambda_n\right]\Big\rangle;\ \Theta_n=i_n(t_k)+R_n^{-1}i_m(t_k)\imath.$$

Аксіальне переміщення ЕЯ з ВЕ виникає під дією ЕДЗ:

$$f_z=i_1(t_k)i_2(t_k)\frac{dM_{12}}{dz}(z). \tag{4.13}$$

Враховуючи аеродинамічний опір, переміщення ЕЯ з ВЕ можна описати рекурентним співвідношенням:

$$h(t_{k+1})=h(t_k)+v_z(t_k)\Delta t+\vartheta\Delta t^2/\left(m_{\text{a}}+m_2\right), \tag{4.14}$$

де $v_z(t_{k+1})=v_z(t_k)+\vartheta\Delta t/\left(m_{\text{a}}+m_2\right)$ – швидкість ЕЯ;

$\vartheta=i_1(t_k)i_2(t_k)\frac{dM_{12}}{dz}(z)-g(m_a+m_2)-0{,}125\pi\gamma_{\text{a}}\beta_{\text{a}}D_{2\text{m}}^2v^2(t_k)$; m_2, m_{a} – маса ЕЯ та ВЕ відповідно; γ_{a} – щільність середовища переміщення; β_{a} – коефіцієнт аеродинамічного опору; D_{2m} – зовнішній діаметр ВЕ.

Температури активних елементів ЛІЕП описуються рекурентними співвідношеннями, представленими у роботі [140]. Для розрахунку показників та показників ЛІЕП використовуємо розрахунковий алгоритм циклічного впливу [141]. Робочий процес розбивається на ряд чисельно малих інтервалів часу $\Delta t=t_{k+1}-t_k$, у яких всі величини вважаються постійними. На кожному розрахунковому етапі проводиться розрахунок поточних значень параметрів за результатами розрахунку на попередньому етапі. Потім здійснюється розрахунок нелінійних та змінюваних параметрів.

Початкові умови математичної моделі: $T_{\text{n}}(0)=T_0$ температура n-ого активного елемента (довкілля), $i_{\text{n}}(0)=0$ струм n-ого активного елемента, $h(0)=h_0$ – осьова відстань між ОІ та ЕЯ , $u_{\text{c}}(0)=U_0$ – напруга ЄНЕ, $v_{\text{z}}(0)=0$ – швидкість ЕЯ вздовж осі z.

Ефективність ЛІЕП оцінимо такими показниками: мінімальним значенням амплітуди ЕДЗ f_{zm}, максимальним значенням коефіцієнта ефективності $K_V=v_{zm}f_{zm}^{-1}$, де v_{zm} - максимальна швидкість ЕЯ та ВЕ, що забезпечує максимальну висоту підкидання $h_{\text{m}}=60-90$ мм, і мінімальними перевищеннями температури активних елементів $\theta_n=T_n-T_0$. Для оцінки силової

взаємодії між активними елементами використовуватимемо величину імпульса ЕДЗ $P_I = \int f_z(z,t)dt$.

Розглянемо ЛІЕП, у якого ОІ виконана багатовитковою, а ЕЯ виконаний у вигляді мідного диска. Зовнішній діаметр *n*-ого активного елемента D_{en}=100 мм, його внутрішній діаметр D_{in}=10 мм. Висота ОІ H_1 = 10 мм, висота ЕЯ H_2 = 2 мм. ОІ містить 46 витків мідної шини прямокутного перерізу a×b=1.8×4.4 мм^2. Початкова відстань між активними елементами h_0 = 1 мм. Маса ВЕ m_a = 0.5 кг.

Розглянемо електромеханічні характеристики ЛІЕП при живленні одиночним однополуперіодним імпульсом від ЄНЕ з параметрами: C_0=320 мкФ, U_0=0.5 кВ (рис. 4.23).

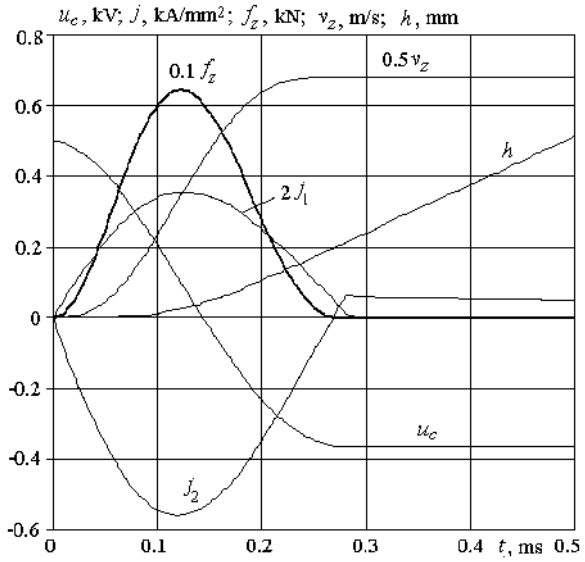


Рисунок 4.23 – Електромеханічні характеристики ЛІЕП при збудженні одиночним імпульсом від ЄНЕ

Енергія ЕНЭ становить W_0=40 Дж. При такому збудженні ЛІЕП напруга ЄНЕ u_c у процесі розряду змінює полярність. Щільність струму в ОІ j_1 набуває форми однополуперіодного імпульсу з амплітудою j_{1m}=178 А/мм^2. Щільність струму ЕЯ j_2 має протилежну полярність і досягає амплітуди j_{2m}=556.4 А/мм^2. Через певний час струм в ЕЯ змінює полярність, плавно згасаючи після припинення струмового імпульсу в ОІ. Однак величина затухаючого струму протилежної полярності в ЕЯ мала порівняно з основним імпульсом. ЕРС f_z

також має вигляд вираженого імпульсу з амплітудою f_{zm} = 6,64 кН. Під дією цієї сили ЕЯ разом з ВЕ досягає максимальної швидкості v_{zm}=1,36м/с, що забезпечує їхнє переміщення на максимальну висоту h_m= 89,5 мм. Перевищення температури ЕЯ становить θ_2=0.22˚С, а перевищення ОІ θ_1=0.027˚С на порядок нижче. При одиночному імпульсі збудження від ЕНЭ ЛІЕП характеризується коефіцієнтом ефективності K_V=0.21 мм/(с·Н).

Розглянемо електромеханічні характеристики ЛІЕП при збудженні серією з п'яти імпульсів, які випливають з періодом T_p. Така серія імпульсів забезпечується шляхом паралельного приєднання до клем джерела *a, b* п'яти секцій ЄНЕ, кожна з яких підключається до ОІ із затримкою часу, що дорівнює T_p. Для того, щоб забезпечити діапазон величин підкидання h_m = 60 ... 90 мм розглянемо однакові перші секції ЄНЕ з параметрами C_{0i} = 100 мкФ, U_{0i} = 0.5 кВ. Сумарна енергія ЄНЕ становить W=62.5 Дж, де W_i - енергія і-ої секції ЄНЕ. На рис. 4.24 представлені електромеханічні характеристики ЛІЕП, що збуджується серією імпульсів, що наслідують період T_p=0.3 мс. Зауважимо, що при збудженні одиночним імпульсом на цей момент часу силова взаємодія між активними елементами закінчується (рис. 4.23).

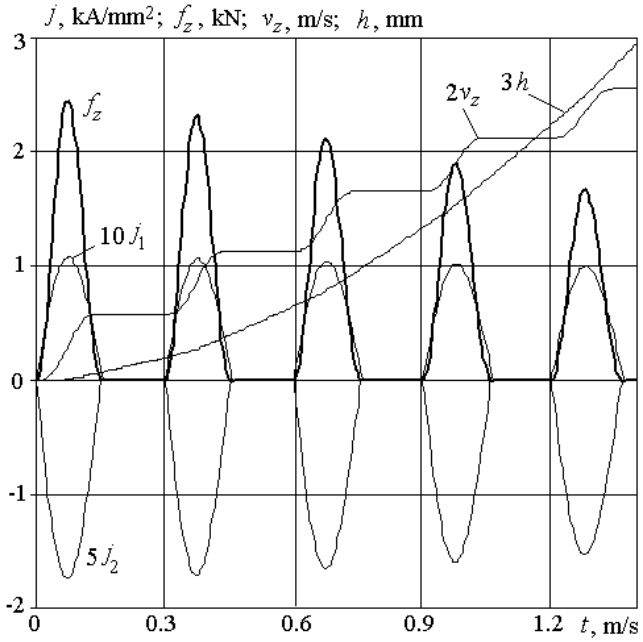


Рисунок 4.24 – Електромеханічні характеристики ЛІЕП при збудженні серією імпульсів від однакових секцій ЄНЕ

За рахунок переміщення ЕЯ в процесі силової взаємодії з ОІ амплітуди щільностей струмів серії імпульсів послідовно зменшуються. Найбільша амплітуда щільності струму виникає у першому імпульсі ЕЯ j_{2m}=347.2 А/мм^2. За рахунок індукційного впливу амплітуди щільностей струму в ОІ також послідовно зменшується, але меншою мірою. У першому імпульсі серії амплітуда щільності струму ОІ становить j_{1m}=107.6 А/мм^2. Найбільша амплітуда імпульсу ЕДЗ також виникає у першому імпульсі серії і становить f_{zm}=2.43 кН. Це в 2,63 рази менше, ніж при збудженні ЛІЕП одиночним імпульсом. При запропонованому способі збудження ЛІЕП максимальна швидкість якоря становить v_{zm}=1,2 м/с. Внаслідок меншої швидкості ЕЯ разом з ВЕ підкидаються на нижчу висоту h_m = 69,1 мм. Однак коефіцієнт ефективності ЛІЕП при живленні серією імпульсів суттєво вищий, ніж при живленні поодиноким імпульсом, становлячи K_V=0.49 мм/(с·Н).

Період проходження імпульсів T_P впливає ефективність ЛІЕП. При збільшенні T_P від 0.3 до 0.8 мс величина імпульсу ЕДЗ та коефіцієнт ефективності ЛІЕП зменшуються приблизно на 15 %, що є негативним фактом (рис. 4.25). А зменшення перевищення температури ЕЯ θ_2 на 8% є позитивним.

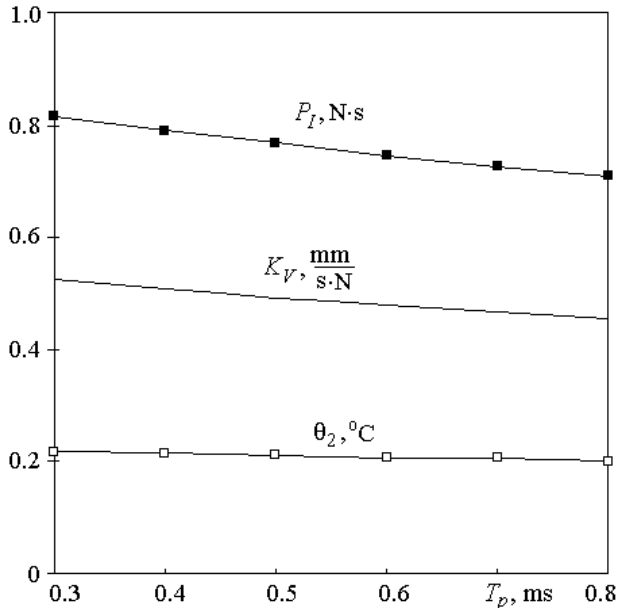
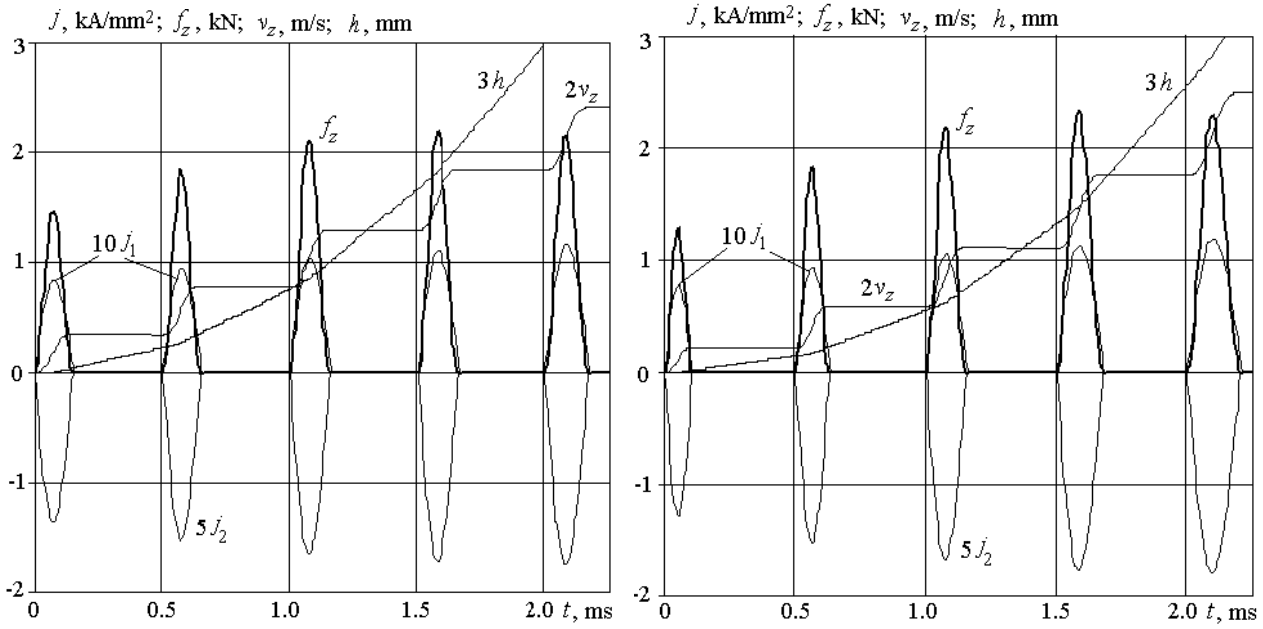


Рисунок 4.25 – Залежність показників ЛІЕП від періоду проходження імпульсів при збудженні від однакових секцій ЄНЕ

Для того щоб зменшити амплітуду ЕРС у першому імпульсі серії розглянемо живлення ЛІЕП, при якому секції ЄНЕ послідовно збільшують свою енергію W_1 від мінімального значення першої секції W_1 до максимального значення в останній секції W_5 за рахунок напруги U_{0i}. При однаковій ємності кожної секції ЄНЕ C_{0i}=100 мкФ напруга секції визначається співвідношенням. Сумарна енергія ЄНЕ залишається незмінною 62.5 Дж. Розподіл енергії між секціями ЄНЕ будемо характеризувати коефіцієнтом

$$K_W = 2\frac{W_5 - W_1}{W_5 + W_1}. \qquad (4.15)$$

На рис. 4.26 представлені електромеханічні характеристики ЛІЕП під час живлення секціями ЄНЕ з коефіцієнтом розподілу енергій K_W=0.8.



а *б*

Рисунок 4.26 – Електромеханічні характеристики ЛІЕП при збудженні серією імпульсів від секцій ЄНЕ з коефіцієнтом розподілу енергії K_W: 0.8 (*а*), 1.0 (*б*)

При такому збудженні послідовно зростають амплітуди густин струмів в ОІ, максимальне значення яких j_{1m}=116 А/мм^2 досягається в п'ятому імпульсі серії. Амплітуди густин струмів в ЕЯ також послідовно збільшуються до четвертого імпульсу серії, досягаючи j_{2m}=349.2 А/мм^2, після чого зростання

припиняється. Найбільша амплітуда імпульсу ЕДЗ f_{zm}=2.18 кН спостерігається у четвертого імпульсу серії. Ця величина сили менша, ніж при збудженні ЛІЕП при живленні від однакових секцій ЄНЕ на 11%. При даному способі живлення від секцій ЄНЕ практично всі основні показники ЛІЕП залишаються незмінними, але коефіцієнт ефективності підвищується K_V=0.55 мм/(с·Н).

На рис. 4.27 представлені залежності електромеханічних показників ЛІЕП від коефіцієнта розподілу енергії K_W між секціями ЄНЕ при T_p=0.5 мс. При збільшенні коефіцієнта K_W щільності струмів активних елементах зростають, але максимальна швидкість ЕЯ v_{zm} і величина інтеграла ЕДЗ. Оскільки амплітуда імпульсу ЕДЗ f_{zm} найменша при K_W=0.5, то при цьому забезпечується і найбільша величина коефіцієнта ефективності K_V=0.585 мм/(с·Н).

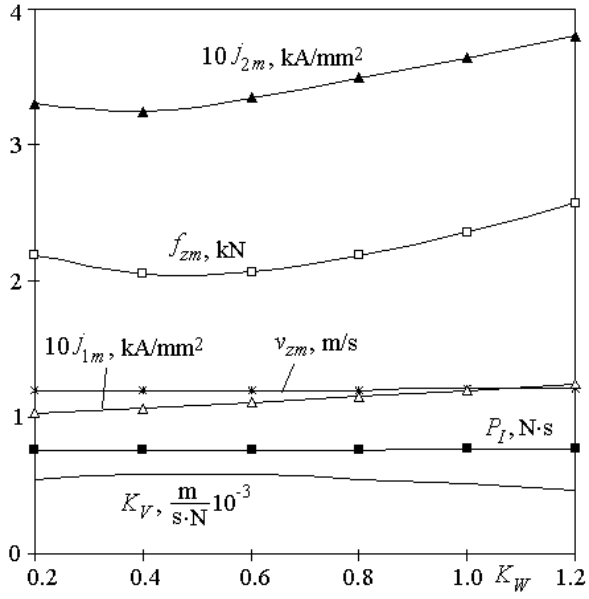


Рисунок 4.27 – Залежність електромеханічних показників ЛІЕП при збудженні серією імпульсів від коефіцієнта розподілу енергії між секціями ЄНЕ

Розглянемо живлення ЛІЕП від секцій ЄНЕ, енергія яких збільшується за рахунок підвищення ємності C_{0i} при W_Σ=62.5 Дж. Розподіл ємності між секціями ЄНЕ будемо характеризувати коефіцієнтом

$$K_C = 2\frac{C_{05} - C_{01}}{C_{05} + C_{01}}, \qquad (4.16)$$

де C_{01}, C_{05} – ємності першої та останньої п'ятої секції ЕНЕ відповідно.

При послідовному збільшенні енергії секцій ЄНЕ за допомогою ємностей відбувається збільшення амплітуд щільностей струмів ОІ. Найбільша амплітуда j_{1m}=118.8 А/мм^2 має місце у останньому п'ятому імпульсі серії. Амплітуди щільностей струмів ЕЯ також послідовно збільшуються до четвертого імпульсу серії, досягаючи j_{2m}=357.1 А/мм^2. Тривалість струмових імпульсів серії послідовно збільшується. Найбільша амплітуда імпульсу ЕДЗ f_{zm}=2.33 кН спостерігається у четвертого імпульсу серії. При даному способі живлення від секцій ЄНЕ всі основні показники ЛІЕП підвищуються.

На рис. 4.28 представлені залежності електромеханічних показників ЛІЕП від коефіцієнта розподілу ємностей секцій ЄНЕ K_C. Збільшення коефіцієнта K_C в інтервалі [0.2; 2.0] амплітуди густин струмів в ОІ зростають. При цьому збільшується максимальна швидкість v_{zm} ЕЯ. Але амплітуда щільності струму в ЕЯ зростає лише в інтервалі [0.4; 2.0], а амплітуда імпульсу ЕДЗ f_{zm} зростає в інтервалі K_C=[0.6; 2.0]. Це обумовлює найбільше значення коефіцієнта ефективності K_V=0.58 мм/(с·Н) при значенні K_C=0.6.

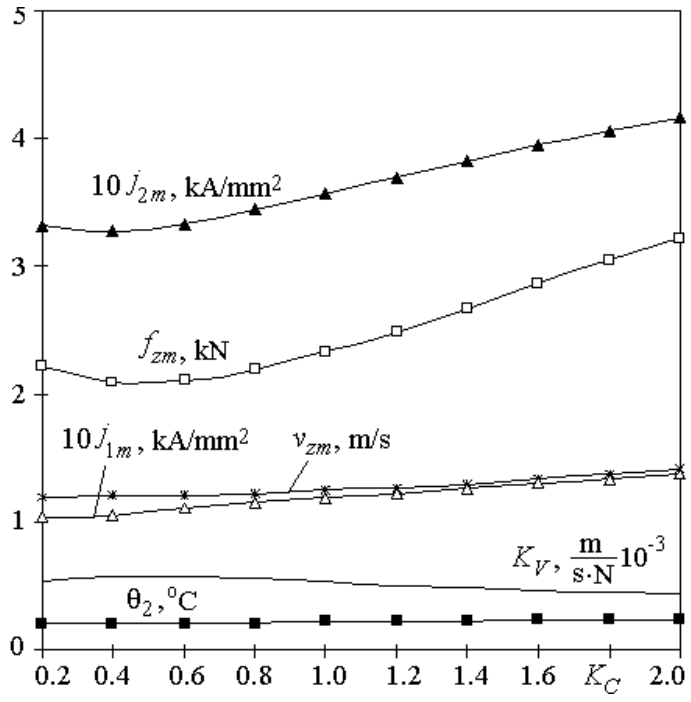


Рисунок 4.28 – Залежність електромеханічних показників ЛІЕП від коефіцієнта розподілу ємності між секціями ЄНЕ

При збільшенні коефіцієнта розподілу ємності між секціями ЄНЕ K_C ЕЯ та ВЕ за рахунок збільшення максимальної швидкості v_{zm} підкидаються на більшу висоту (рис. 4.29).

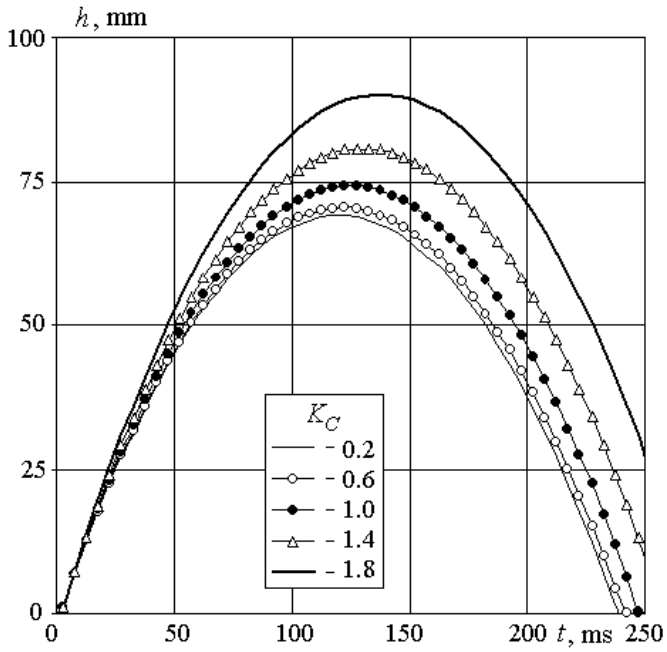


Рисунок. 4.29 – Переміщення ЕЯ разом з ВЕ після серії силових імпульсів за різних коефіцієнтів розподілу ємності між секціями ЄНЕ

Таким чином, збудження ЛІЕП від секцій ЄНЕ серією імпульсів дозволяє за рахунок розтягування у часі процесу силового впливу суттєво зменшити амплітуду ЕДЗ, яка проявляється як сила віддачі. За допомогою такого збудження можна більш ніж у 2 рази збільшити коефіцієнт ефективності ЛІЕП порівняно з живленням його одиночним імпульсом, що забезпечує аналогічну висоту вертикального підкидання ЕЯ разом із ВЕ. Однак для цього потрібна більша енергія ЄНЕ.

Розглянемо **ЛІЕП електродинамічного типу**, який містить КЯ у вигляді багатовиткової обмотки і нерухому ОІ. Ці обмотки з'єднані послідовно і збуджуються від ЄНЕ. Оскільки обидві обмотки намотані зустрічно по магнітному полю, між ними виникають ЕДЗ відштовхування. Обмотки ЛІЕП виконані у формі дисків, коаксіально встановлених один навпроти одного (рис. 4.30).

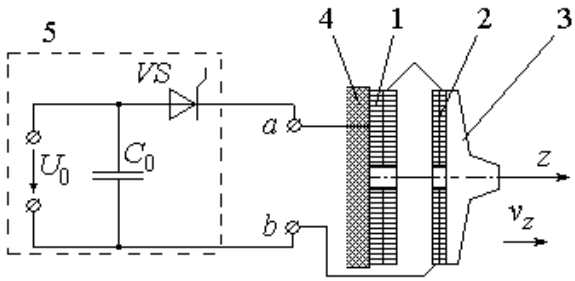


Рисунок 4.30 – Схема ЛІЕП електродинамічного типу:
1 – ОІ, 2 – КЯ, 3 – ВЕ, 4 – упор, 5 – ЄНЕ

Для збудження ЛІЕП від ЕНЭ використовуємо однополуперіодний полярний імпульс, що формується пусковим тиристором *VS*, вважаючи, що його опір у прямому напрямку нехтує мало, а у зворотному напрямку його провідність настільки ж мала. Зауважимо, що з такому імпульсі живлення до кінця робочого циклу частина енергії зберігається в ЄНЕ, що дозволяє її подальше використання.

Розглянемо математичну модель ЛІЕП-К, в якій використовуються зосереджені параметри ОІ і КЯ. Така ланцюгова модель дозволяє оперативно здійснювати розрахунок показників ЛІЕП під час живлення серією послідовних імпульсів. Електричні процеси в ЛІЕП електродинамічного типу при збудженні одиночним струмовим імпульсом від ЄНЕ можна описати рівнянням [141]:

$$\left[R_1(T_1)+R_2(T_2)\right]\cdot i+\frac{d\psi}{dt}+\frac{1}{C_0}\int_0^t idt=0,\ \ u_C(0)=U_0, \tag{4.17}$$

де n = 1, 2 – індекси ОІ та КЯ відповідно; R_n, T_n - активний опір і температура n-ої обмотки відповідно; i – струм ОІ та КЯ; C_0 – ємність ЄНЕ, зарядженого до напруги U_0; u_C – напруга ЄНЕ;

$$\frac{d\psi}{dt}=\left[L_1-2M_{12}(z)+L_2\right]\frac{di}{dt}-2iv_z(t)\frac{dM_{12}}{dz}; \tag{4.18}$$

L_n - індуктивність n-ої обмотки; M_{12}(z) – взаємна індуктивність між ОІ та КЯ, що переміщається вздовж осі z зі швидкістю v_z.

На чисельно малому інтервалі часу Δt вважаємо, що це функціональні залежності незмінні:

$$R_1(T_1) = R_1,\ R_2(T_2) = R_2,\ M_{12}(z) = M_{12},\ v_z(t) = v_z. \tag{4.19}$$

Підставляючи рівняння (4.18) до (4.17) отримуємо:

$$\left(R_1 + R_2 - 2v_z \frac{dM_{12}}{dz}\right) \cdot i + \left[L_1 - 2M_{12} + L_2\right]\frac{di}{dt} + \frac{1}{C_0}\int_0^t i dt = 0. \tag{4.20}$$

Рішення рівняння (4.20) шукатимемо у вигляді:

$$i = A_1 \exp(\alpha_1 t) + A_2 \exp(\alpha_2 t), \tag{4.21}$$

де $\alpha_{1,2} = -0{,}5\frac{\Theta}{\Xi} \pm \left[0{,}25\left(\frac{\Theta}{\Xi}\right)^2 - \frac{1}{C_0\Xi}\right]^{0{,}5}$ - коріння характеристичного рівняння; A_1, A_2 – довільні постійні; $\Xi = L_1 - 2M_{12} + L_2$; $\Theta = R_1 + R_2 - 2v_z \frac{dM_{12}}{dz}$.

Якщо $\Theta > 2\sqrt{\Xi C_0^{-1}}$, то після ряду перетворень отримуємо вирази для довільних постійних моменту t_k:

$$A_{1,2} = \frac{u_C(t_k) + \Theta \cdot i(t_k) + \alpha_{2,1}\Xi \cdot i(t_k)}{\Xi \exp\left(\alpha_{1,2} t_k\right)\left(\alpha_{2,1} - \alpha_{1,2}\right)}. \tag{4.22}$$

Підставляючи вирази (4.22) в рівняння (4.21), отримуємо вираз струму в рекурентному вигляді:

$$i(t_{k+1}) = \frac{u_C(t_k) + \Theta \cdot i(t_k)}{\Xi\left(\alpha_2 - \alpha_1\right)}\left[\exp\left(\alpha_1 \Delta t\right) - \exp\left(\alpha_2 \Delta t\right)\right] +$$

$$+ \frac{i(t_k)}{\alpha_2 - \alpha_1}\left[\alpha_2 \exp\left(\alpha_1 \Delta t\right) - \alpha_1 \exp\left(\alpha_2 \Delta t\right)\right]. \tag{4.23}$$

Напруга на ЄНЕ:

$$u_C(t_{k+1}) = \frac{u_C(t_k) + \Theta \cdot i(t_k)}{\alpha_2 - \alpha_1}\left[\alpha_2 \exp\left(\alpha_1 \Delta t\right) - \alpha_1 \exp\left(\alpha_2 \Delta t\right)\right] +$$

$$+ \Xi \frac{i(t_k)}{\alpha_2 - \alpha_1}\left[\alpha_2^2 \exp\left(\alpha_1 \Delta t\right) - \alpha_1^2 \exp\left(\alpha_2 \Delta t\right)\right]. \tag{4.24}$$

Якщо $\Theta < 2\sqrt{\Xi C_0^{-1}}$, то коріння характеристичного рівняння представимо у вигляді:

$$\alpha_{1,2} = -\delta \pm j\omega_1 = \omega_0 \exp\left(j(\pi \pm \theta)\right), \tag{4.25}$$

де $\delta = 0{,}5\Theta\Xi^{-1}$; $\theta = arctg\left(4\Xi\Theta^{-2}C_0^{-1} - 1\right)^{0,5}$; $\omega_0 = \left(\Xi C_0\right)^{-0,5}$; $\omega_1 = \left(\Xi^{-1}C_0^{-1} - 0.25\Theta^2\Xi^{-2}\right)^{0,5}$.

Підставляючи значення коренів (4.25) у рівняння (4.23) та враховуючи, що

$$2j\sin(\omega_1\Delta t) = \exp(j\omega_1\Delta t) - \exp(-j\omega_1\Delta t),$$

отримуємо:

$$i(t_{k+1}) = -\omega_1^{-1}\exp(-\delta\Delta t)\left\{\Xi^{-1}\left[u_C(t_k) + \Theta\cdot i(t_k)\right]\sin(\omega_1\Delta t) + \omega_0 i(t_k)\sin(\omega_1\Delta t - \theta)\right\}. \tag{4.26}$$

Напруга на ЄНЕ при цьому:

$$u_C(t_{k+1}) = -\omega_0\omega_1^{-1}\exp(-\delta\Delta t)\left\{\left[u_C(t_k) + \Theta\cdot i(t_k)\right]\times\right.$$
$$\left.\times\sin(\omega_1\Delta t - \theta) + i(t_k)\omega_0\Xi\sin(\omega_1\Delta t - 2\theta)\right\}. \tag{4.27}$$

Якщо $\Theta = 2\sqrt{\Xi C_0^{-1}}$, то $\delta = \omega_0$ і струм дорівнює:

$$i(t_{k+1}) = \exp(-\delta\Delta t)\Delta t\left\{i(t_k)\delta - \Xi^{-1}\left[u_C(t_k) + \Theta\cdot i(t_k)\right]\right\}. \tag{4.28}$$

Напруга на ЄНЕ при цьому:

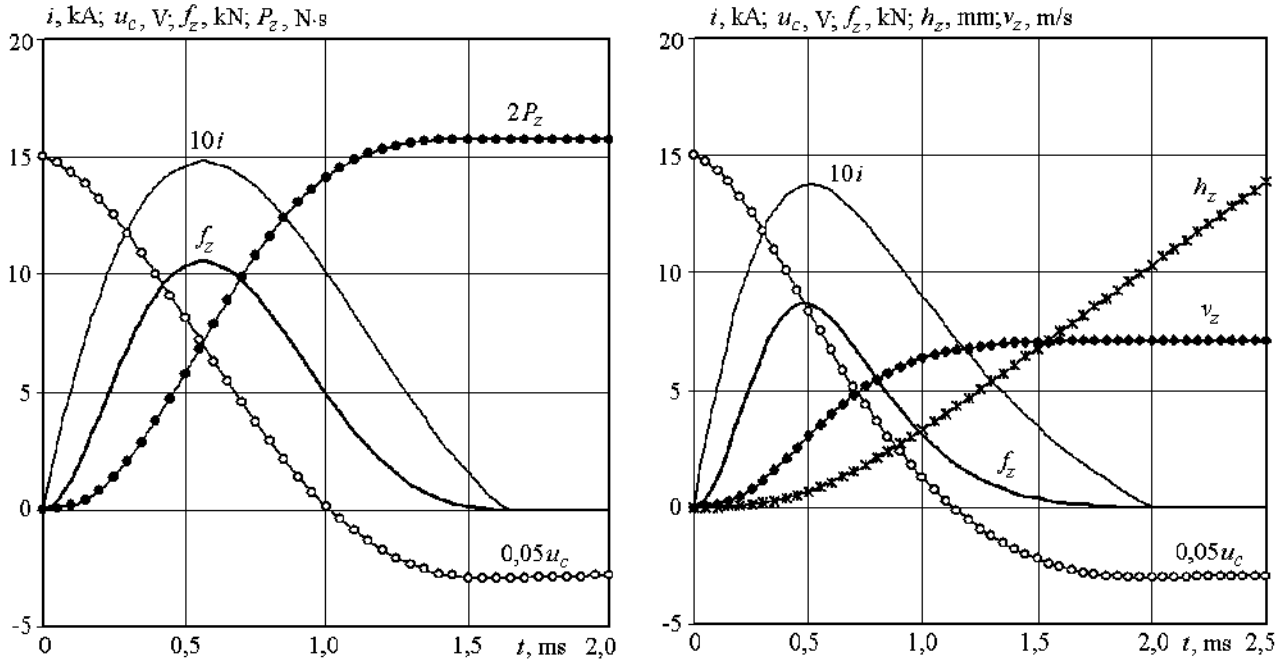
$$u_C(t_{k+1}) = \left[u_C(t_k) - i(t_k)\Xi\delta + \Theta\cdot i(t_k)\right](\delta\Delta t + 1)\exp(-\delta\Delta t) + i(t_k)(\Xi\delta - \Theta). \tag{4.29}$$

Розглянемо ЛІЕП електродинамічного типу, у якого ОІ (n=1) та КЯ (n=2) виконані у формі двошарових дискових котушок. ОІ намотана мідною шиною перетином 1,2×5,0 мм^2, а КЯ – мідною шиною перетином 1,2×2,5 мм^2. Число витків n-ої обмотки N_n = 60, зовнішній діаметр D_{en}=100 мм, внутрішній діаметр D_{in}=8 мм. ЄНЕ: енергія W_0=180 Дж, напруга U_0=300 В. Початкова відстань між обмотками h_{z0}=1 мм.

При роботі ЛІЕП у швидкісному режимі застосуємо ВЕ масою m_a= 0,5 кг, а його ефективність оцінюватимемо максимальною швидкістю v_{zm} при мінімальній силі віддачі. При роботі ЛІЕП в силовому режимі вважатимемо відсутність переміщення КЯ з ВЕ ($m_a = \infty$). Ефективність оцінюватимемо максимальною величиною імпульсу ЕДЗ при мінімальній силі віддачі.

Живлення ЛІЕП електродинамічного типу одиночним імпульсом здійснюється від ЄНЕ ємністю C_0 = 4 мФ. При роботі в силовому режимі (рис. 4.31) амплітуда струму в обмотках ЛІЕП становить i_m=1,478 кА, що

призводить до виникнення між обмотками ЕДЗ амплітудою f_{zm}=10,56 кН. Величина імпульсу ЕДЗ до кінця робочого процесу (1,65 мс) становить P_z=7,88 Н·с. Зауважимо, що перевищення температур обмоток $\theta_n=T_0-T_n$ незначні (θ_1=0,2 ˚С, θ_2=0,7 ˚С).



а *б*

Рисунок 4.31 – Електродинамічні характеристики ЛІЕП електродинамічного типу при роботі в силовому (*а*) та швидкісному (*б*) режимах

При роботі у швидкісному режимі відбувається затягування робочого процесу до 2 мс із зменшенням усіх основних показників (рис. 4.31). Амплітуда струму в обмотках зменшується до i_m=1,375 кА, що призводить до зменшення амплітуди ЕДЗ між обмотками до величини f_{zm}=8,67 кН. Розмір імпульсу ЕДЗ до кінця робочого процесу становить P_z=6,2 Н·с. Зменшуються і перевищення температур обмоток (θ_1=0,18˚С, θ_2=0,6˚С). Така зміна робочого процесу обумовлена переміщенням КЯ з ВЕ, які досягають максимальної швидкості v_{zm} = 7,1 м/с.

Збудження ЛІЕП серією імпульсів здійснюється шляхом послідовного в часі підключення до клем *a* і *b* секцій ЄНЕ. Так утворюється паралельне підключення секцій ЄНЕ до обмоток перетворювача. Зауважимо, що

паралельне підключення секцій ЄНЕ до ОІ лінійного імпульсного прискорювача індукційного типу досліджено у роботах. Однак у цих дослідженнях всі секції ЄНЕ підключаються до ОІ одночасно.

Сумарна величина ємностей секцій дорівнює C_0 = 4 мФ. Час затримки підключення секцій визначає період проходження імпульсів струму збудження. При такому способі збудження ефективність ЛІЕП у силовому та швидкісному режимах оцінюватимемо безрозмірними критеріями:

$$K_p^* = \frac{P_z}{f_{zm}} \frac{f_{zm}^0}{P_z^0}, \quad K_v^* = \frac{v_{zm}}{f_{zm}} \frac{f_{zm}^0}{v_{zm}^0}, \tag{4.30}$$

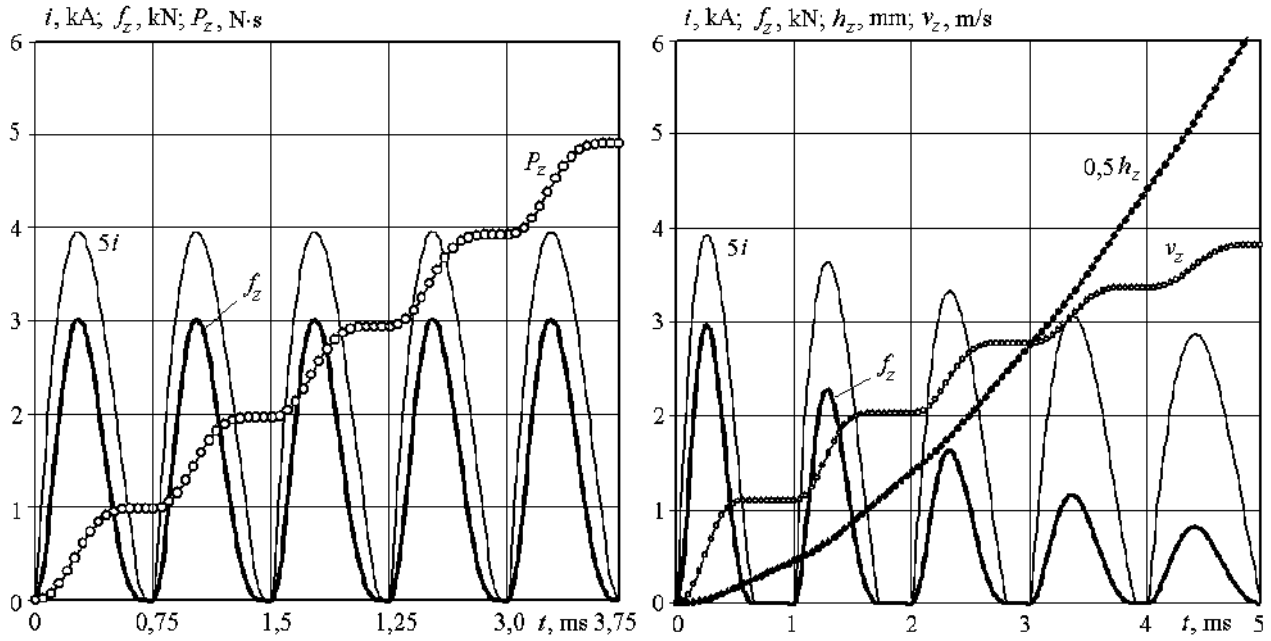
де $f_{zm}^0, P_z^0, v_{zm}^0$ - максимальні значення амплітуди та величини імпульсу ЕДЗ, швидкості КЯ з ВЕ відповідно при збудженні одиночним імпульсом.

Суть зазначених критеріїв полягає у забезпеченні найбільшої величини імпульсу ЕДЗ для силового режиму, та найбільшої швидкості КЯ з ВЕ для швидкісного режиму при мінімальній амплітуді ЕДЗ, яка визначає силу віддачу. Ці критерії оцінюють ефективність ЛІЕП при живлені серією імпульсів по відношенню до живлення одиночним імпульсом.

На рис. 4.32,а показані електродинамічні характеристики ЛІЕП при роботі в силовому режимі від п'яти однакових секцій ЄНЕ, що підключаються до обмотки послідовно із затримкою 0,75 мс. При кожному імпульсі збудження амплітуда струму практично незмінна і становить i_m = 0,788 кА, що майже в 2 рази менше ніж при збудженні одиночним імпульсом. Ще більшою мірою зменшується амплітуда ЕДЗ, становлячи f_{zm}=3,0 кН. Величина імпульсу ЕДЗ до кінця робочого процесу також зменшується, але меншою мірою складаючи P_z=4,9 Н·с. Зменшуються і перевищення температур обмоток (θ_1=0,13 ˚С, θ_2=0,42 ˚С). Однак критерій ефективності перетворювача K_p^* підвищується більш ніж у 2 рази порівняно з його збудженням одиночним імпульсом.

На рис. 4.32,б показані електромеханічні характеристики ЛІЕП при роботі в швидкісному режимі від п'яти однакових секцій ЄНЕ, що підключаються до обмотки послідовно із затримкою 1,0 мс. Особливістю даного перетворювача є послідовне зменшення амплітуд струмів i_m та ЕДЗ f_zm при підключенні секцій

ЄНЕ. Таке зменшення зазначених амплітуд обумовлено послідовним ослабленням магнітного зв'язку між обмотками за рахунок переміщення КЯ на величину h_z. У цьому перетворювачі найбільші амплітуди спостерігаються в першому імпульсі, складаючи для струму i_m=0,783 кА, для ЕДЗ f_{zm}=2,95 кН. Розмір імпульсу ЕДЗ становить у своїй P_z=3,34 Н·с, забезпечуючи швидкість КЯ з ВЕ v_z=3,82 м/с. Перевищення температур обмоток складають θ_1=0,11˚С, θ_2=0,37˚С.



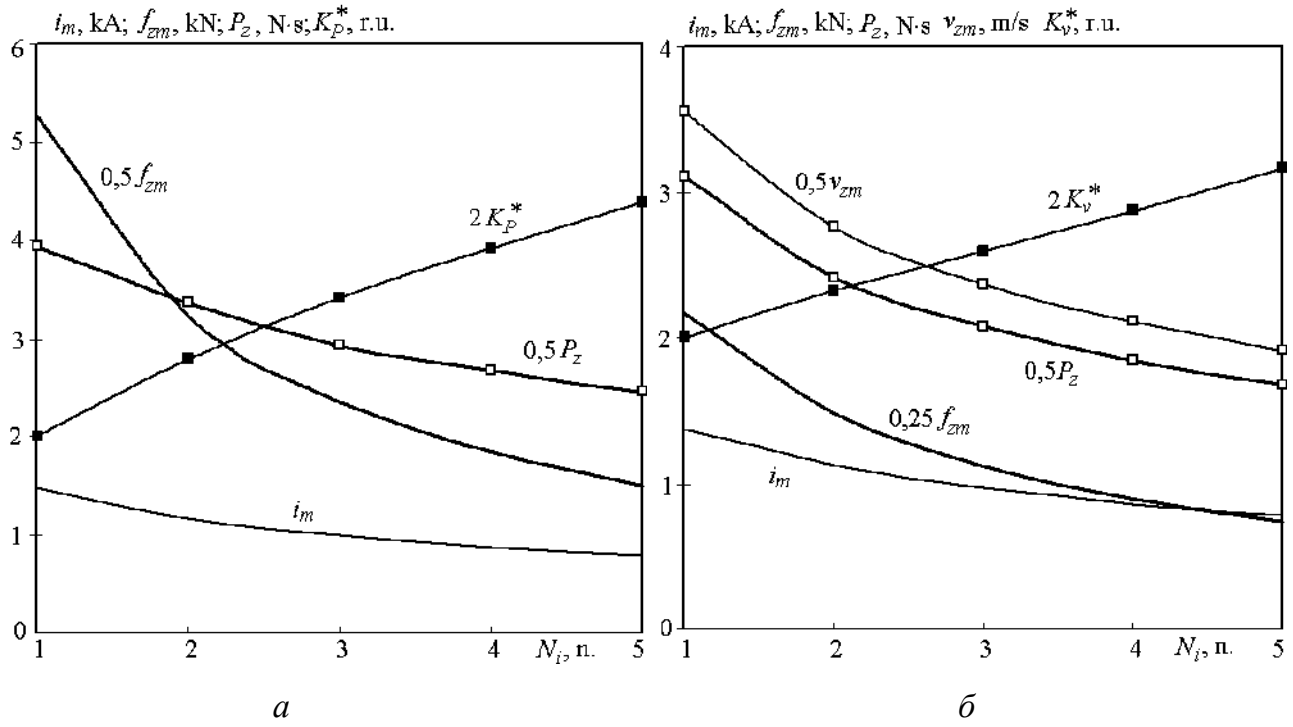
а *б*

Рисунок 4.32 – Електромеханічні характеристики ЛІЕП електродинамічного типу у силовому (*а*) та швидкісному (*б*) режимах при збудженні від однакових секцій ЄНЕ

Таким чином, у швидкісному режимі всі показники ЛІЕП, що збуджується серією з п'яти імпульсів, зменшуються в порівнянні з збудженням одиночним імпульсом, але критерій ефективності перетворювача при цьому підвищується на 58%.

Оцінити вплив кількості імпульсів збудження N_i на показники ЛІЕП-К дозволяє рис. 4.33. Як у силовому, так і у швидкісному режимах роботи, зі збільшенням кількості імпульсів збудження N_i, постійному напрузі секцій ЄНЕ U_0=300 В і збереженні загальної енергії W_0=180 Дж всі основні показники

зменшуються. Це амплітуди струмів i_m та ЕДЗ f_{zm}, величина імпульсу ЕДЗ P_z та швидкістю КЯ разом з ВЕ v_z. Але за рахунок сильнішого зменшення амплітуди ЕДЗ f_{zm}, яка проявляється як сила віддачі, від збільшення кількості імпульсів збудження критерії ефективності ЛІЕП та підвищуються.

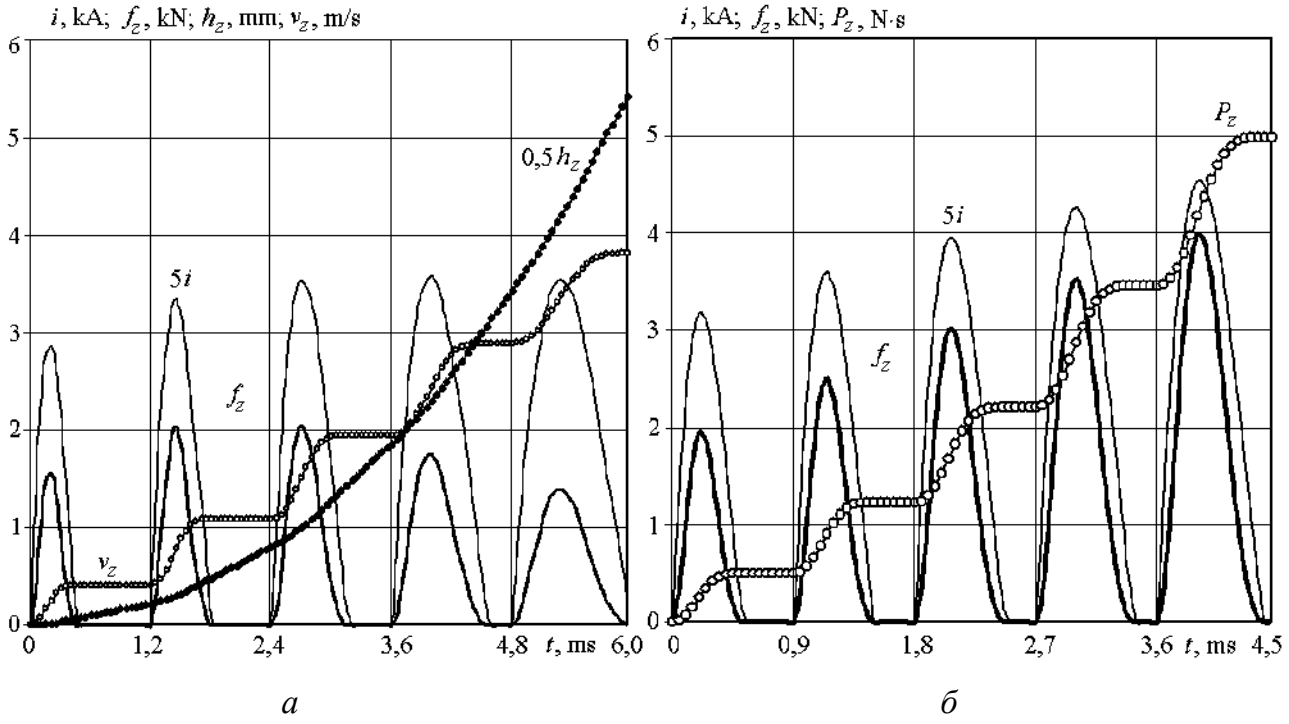


а *б*

Рисунок 4.33 – Залежність показників роботи ЛІЕП у силовому (*а*) та швидкісному (*б*) режимах від кількості імпульсів збудження

Зменшити максимальні амплітуди струму та ЕДЗ в першому імпульсі серії для ЛІЕП, що працює в швидкісному режимі, можна за рахунок послідовного збільшення ємностей секцій ЄНЕ за збереження їх сумарної величини C_0=4 мФ. На рис. 4.34,а показані електромеханічні характеристики ЛІЕП-К при роботі в швидкісному режимі та збудженні від п'яти секцій ЄНЕ, ємності яких лінійно зростають від 0,4 мФ у першій секції до 1,2 мФ у останній п'ятій секції. При такому збудженні ЛІЕП, що працює в швидкісному режимі, максимальна амплітуда струму спостерігається не в першому, а в четвертому імпульсі серії і дорівнює i_m = 713,9 А, що нижче, ніж при збудженні однакових секцій ЄНЕ. Максимальна амплітуда ЕДЗ спостерігається у третьому імпульсі серії та становить f_{zm}=2,04 кН. Зауважимо, що зменшення амплітуди струму

після четвертого імпульсу серії обумовлено ослабленням магнітного зв'язку між ОІ та КЯ. Зменшення амплітуд ЕДЗ після третього імпульсу серії додатково викликане збільшенням відстані між ними. При цьому способі збудження ЛІЕП величина імпульсу ЕДЗ становить P_z=3,33 Н·с, що забезпечує швидкість КЯ з ВЕ v_z=3,81 м/с.



а *б*

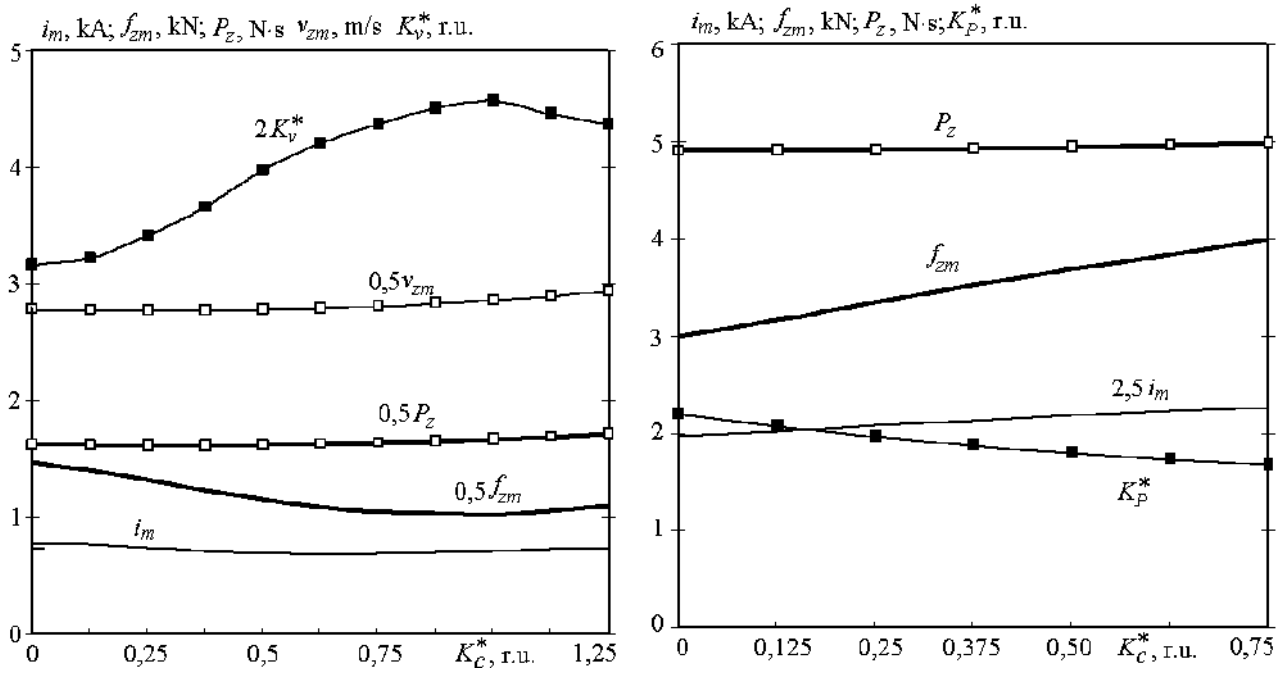
Рисунок 4.34 – Електромеханічні характеристики ЛІЕП при роботі в швидкісному (а) та силовому (б) режимах та збудженні від секцій ЄНЕ, ємності яких лінійно зростають

На рис. 4.34,б показані електродинамічні характеристики ЛІЕП при роботі в силовому режимі та збудженні від п'яти секцій ЄНЕ, ємності яких лінійно зростають від 0,5 мФ у першій секції до 1,1 мФ у п'ятій секції. При такому збудженні ЛІЕП, що працює в силовому режимі, максимальна амплітуда струму виникає в п'ятому імпульсі серії і дорівнює i_m = 908 А, що вище, ніж при збудженні однакових секцій ЄНЕ. Максимальна амплітуда ЕДЗ виникає також у п'ятому імпульсі серії та становить f_{zm}=3,98 кН. Розмір імпульсу ЕДЗ становить P_z=4,98 Н·с.

Оцінити вплив закономірності розподілу ємностей за секціями ЄНЕ на показники ЛІЕП під час роботи у швидкісному та силовому режимах дозволяє рис. 4.35, де використаний показник розподілу ємностей за секціями ЄНЕ:

$$K_c^* = 2\left(C_{\max} - C_{\min}\right)\left(C_{\max} + C_{\min}\right)^{-1}, \qquad (4.31)$$

де C_{min}, C_{max} – ємність першої та останньої п'ятої секції ЄНЕ відповідно.



а б

Рисунок 4.35 – Залежність показників роботи ЛІЕП у швидкісному (а) та силовому (б) режимах від показника розподілу ємностей за секціями ЄНЕ

Зауважимо, що з K_c^*=0 ємності всіх п'яти секцій ЕНЭ однакові. При роботі ЛІЕП у швидкісному режимі збільшення показника K_c^* суттєво змінює лише максимальну амплітуду ЕДЗ f_{zm}, яка помітно зменшується в інтервалі $K_c^* \subset (0, 1)$. Це впливає на критерій ефективності K_v^*, максимальне значення якого буде при K_c^*=1 (C_{min}=0,4 мФ, C_{max}=1,2 мФ). При перевищенні показником K_c^* значення 1 критерій K_v^*ефективності знижується рахунок збільшення амплітуди ЕДЗ в останньому п'ятому імпульсі серії. При роботі ЛІЕП у силовому режимі

K_c^* підвищення показника призводить до збільшення максимальної амплітуди ЕДЗ f_{zm}, внаслідок чого критерій ефективності K_p^* зменшується.

Таким чином, при збудженні серією імпульсів від секцій ЄНЕ за рахунок зменшення амплітуди сили віддачі забезпечується підвищення ефективності ЛІЕП електродинамічного типу. Для перетворювача, що працює у швидкісному режимі, доцільно збільшення показника розподілу ємностей по секціях ЄНЕ до певної величини (K_c^*=1). Для перетворювача, що працює в силовому режимі, доцільно використовувати однакові ємності для всіх секцій ЄНЕ.

4.5 Живлення ЛІЕП індукційного типу від джерела змінного струму

Найбільш поширене збудження ЛІЕП-Е від високовольтного ЄНЕ. Однак при цьому необхідне спеціальне високовольтне обладнання та відповідне виконання обмоток. Крім того, таке збудження відбувається протягом короткого проміжку часу, що може обмежувати ряд показників і технічних застосувань перетворювача. Свого часу розглядалися інші джерела збудження ЛІЕП індукційного типу, наприклад, змінний струм підвищеної частоти [142]. У роботі [143] досліджувався джерело змінного струму для електромеханічного прискорювача циліндричної конфігурації, в якому обмотка якоря коаксіально переміщається всередині обмотки індуктора. При цьому розглядалися такі варіанти: 1) збудження від джерела підвищеної частоти, 2) збудження від джерела, частота якого підвищується в міру прискорення ОЯ, 3) намотування ОІ з кроком, що збільшується при збудженні від джерела незмінної частоти. Варіант №2 потребує спеціального генератора. Варіант №3 доцільний лише для прискорювача, в якому ОЯ переміщується усередині ОІ. Варіант №1 отримав розвиток у роботі [144], де описаний електромеханічний прискорювач, у якому всередині ряду аксіально встановлених секцій ОІ розганялася ОЯ. Секції обмотки індуктора в міру переміщення обмотки якоря послідовно підключалися до секцій джерела змінного струму, у кожній з яких частота змінного струму

була постійною, але підвищеною частотою попередньої секції. Зауважимо, що така система збудження складна і потребує спеціальної системи комутації.

Всі дослідження джерел збудження стосувалися ЛІЕП, що працює в швидкісному режимі, при якому час ефективної взаємодії ОЯ з ОІ незначний. Але при роботі в ударно-силовому режимі зазначений час взаємодії може бути значним, обмежуючись іншими факторами, наприклад, тепловими.

Розглянемо основні закономірності роботи ЛІЕП індукційного типу під час роботи у швидкісному та ударно-силовому режимах та збудженні від джерела змінного струму підвищеної частоти.

Оскільки ОІ і ОЯ виконані у вигляді багатовиткових щільно намотаних обмоток, то доцільно використовувати поняття індуктивностей і взаємної індуктивності. Зміна просторового положення ОЯ враховується зміною потокосцепления між обмотками [147]:

$$\frac{d\Psi_n}{dt} = M(z)\frac{di_n}{dt} + v_z(t)\cdot i_n\frac{dM}{dz}, \tag{4.32}$$

де n=1, 2 – індекси ОІ та ОЯ відповідно; M(z) – взаємна індуктивність між ОІ і ОЯ; v_z – швидкість переміщення ОЯ вздовж осі z; i_n - струм n-ї обмотки.

У такому разі електричні процеси в обмотках ЛІЕП-Е можна описати системою рівнянь:

$$R_1(T_1)i_1 + L_1\frac{di_1}{dt} + M_{12}(z)\frac{di_2}{dt} + i_2 v_z(t)\frac{dM_{12}}{dz} = u(t), \tag{4.33}$$

$$R_2(T_2)i_2 + L_2\frac{di_2}{dt} + M_{21}(z)\frac{di_1}{dt} + i_1 v_z(t)\frac{dM_{21}}{dz} = 0, \tag{4.34}$$

де $u(t) = U_m\sin(\omega t + \psi_u)$ - Напруга джерела живлення; R_n, L_n, T_n – активний опір, індуктивність, температура і струм n-ої обмотки відповідно.

Введемо позначення: $R_1 = R_1(T_1); R_2 = R_2(T_2);$

$M = M_{12}(z) = M_{21}(z); v_z = v_z(t); u = u(t)$.

Рішення для струмів знаходимо у вигляді:

$$i_1 = \frac{u}{R_1} - \beta\frac{i_2}{R_1} + A_{11}\exp(\alpha_1 t) + A_{12}\exp(\alpha_2 t), \tag{4.35}$$

$$i_2 = -\beta\frac{i_1}{R_1} + A_{21}\exp(\alpha_1 t) + A_{22}\exp(\alpha_2 t)\,, \tag{4.36}$$

де $\alpha_{1,2} = -0.5\varsigma\chi^{-1} \pm \left\{0.25\varsigma^2\chi^{-2} - \left[R_1R_2 - \beta^2\right]\chi^{-1}\right\}$ - коріння характеристичного рівняння для вільної складової, що описується диференціальним рівнянням

$$\chi\frac{d^2i_1}{dt^2} + \varsigma\frac{di_1}{dt} + \left(R_1R_2 - \beta^2\right)i_1 = 0\,, \tag{4.37}$$

$\beta = v_z\frac{dM}{dz}$; $\varsigma = L_1R_2 + L_2R_1 - 2\beta M$; $\chi = L_1L_2\left(1 - K_M^2\right)$; $K_M = M\left(L_1L_2\right)^{-0.5}$ - коефіцієнт магнітного зв'язку між обмотками; $A_{11}, A_{12}, A_{21}, A_{22}$ - довільні постійні, що визначаються в момент часу t_k для вільної складової струмів, рівні

$$A_{1l} = \frac{\alpha_m\left[i_2(t_k)\beta R_1^{-1} - u(t_k)R_1^{-1} + i_1(t_k)\right] - \Xi}{\left(\alpha_m - \alpha_l\right)\exp\left(\alpha_l t_k\right)}\,; \tag{4.38}$$

$$A_{2l} = \frac{\alpha_m\left[i_2(t_k) + i_1(t_k)\beta R_2^{-1}\right] - \Omega}{\left(\alpha_m - \alpha_l\right)\exp\left(\alpha_l t_k\right)}\,, \tag{4.39}$$

де l = 1, 2; m=3-l; $\Xi = \frac{1}{L_1\left(1 - K_M^2\right)}\left\{u(t_k) + i_1(t_k)\left(\beta\frac{M}{L_2} - R_1\right) + i_2(t_k)\left(\frac{MR_2}{L_2} - \beta\right)\right.$;

$$\Omega = \frac{1}{L_2\left(1 - K_M^2\right)}\left\{i_2(t_k)\left(\beta\frac{M}{L_1} - R_2\right) - u(t_k)\frac{M}{L_1} + i_1(t_k)\left(\frac{MR_1}{L_1} - \beta\right)\right).$$

В остаточному вигляді струми в обмотках ЛІЕП описуються виразами:

$$i_1(t_{k+1}) = -\frac{i_2(t_k)v_z(t_k)}{R_1}\frac{dM}{dz} + \left(u(t_k) - R_1i_1(t_k) - i_2(t_k)v_z(t_k)\frac{dM}{dz}\right)\times$$

$$\times\frac{\alpha_1\exp\left(\alpha_2\Delta t\right) - \alpha_2\exp\left(\alpha_1\Delta t\right)}{R_1\left(\alpha_2 - \alpha_1\right)} + \frac{u(t_k)}{R_1} + \frac{\exp\left(\alpha_2\Delta t\right) - \exp\left(\alpha_1\Delta t\right)}{L_1L_2\left(\alpha_2 - \alpha_1\right)\left(1 - K_M^2\right)}\times$$

$$\times\left\{u(t_k)L_2 + \left[v_z(t_k)M\frac{dM}{dz} - R_1L_2\right]i_1(t_k) + \left[R_2M - v_z(t_k)L_2\frac{dM}{dz}\right]i_2(t_k)\right\}; \tag{4.40}$$

$$i_2(t_{k+1}) = -\frac{i_1(t_k)v_z(t_k)}{R_2}\frac{dM}{dz} + \left[i_2(t_k) + \frac{i_1(t_k)v_z(t_k)}{R_2}\frac{dM}{dz}\right]\frac{\alpha_2\exp\left(\alpha_1\Delta t\right) - \alpha_1\exp\left(\alpha_2\Delta t\right)}{\alpha_2 - \alpha_1} +$$

$$+\frac{\exp(\alpha_2\Delta t)-\exp(\alpha_1\Delta t)}{L_1L_2(\alpha_2-\alpha_1)(1-K_M^2)}\left\{i_1(t_k)\left[R_1M-v_z(t_k)L_1\frac{dM}{dz}\right]-u(t_k)M+i_2(t_k)\times\right.$$

$$\left.\times\left[v_z(t_k)M\frac{dM}{dz}-R_2L_1\right]\right\}, \qquad (4.41)$$

де $u(t_k)=U_m\sin(\omega t_k+\psi_u)$.

Величина переміщення ОЯ разом із ВЕ щодо нерухомої ОІ та їх температури поисуються в роботі [149]. При реалізації рівнянь (4.40-4.41) на використовується алгоритм циклічної дії, в якому на кожному чисельно малому розрахунковому кроці послідовно розраховуються значення струмів in, температур T_n, опорів $R_n(T_n)$ обмоток, коефіцієнт теплопровідності прокладки $\lambda_a(T)$; значення аксіальної електродинамічної сили $f_z(z,t)$, швидкості v_z та переміщення h_z ЕЯ, взаємоіндуктивності $M(z)$ між обмотками.

Розглянемо ЛІЕП індукційного типу, у якого ОІ (n=1) та ОЯ (n=2) виконані у формі дискових обмоток, які щільно намотані мідним дротом діаметром 0,9 мм. Числа витків ОІ N_1=450 та ОЯ N_2=180. Зовнішній діаметр обмоток D_{en}=100 мм, їх внутрішній діаметр D_{in}=10 мм. Аксіальна висота ОІ H_1=10 мм, ОЯ H_2=4 мм. Обмотки виконані у вигляді масивних дисків шляхом просочення та подальшого затвердіння епоксидної смоли. Вони встановлені коаксіально так, що початкова відстань між ними h_{z0} = 0,5мм. Джерело живлення характеризується частотою 100 Гц та амплітудою U_m=300 В.

Розглянемо тривалість часу підключення ОІ до джерела t=50 мс. Оцінимо ефективність ЛІЕП при роботі у швидкісному режимі (маса ВЕ m_a=0,25 кг) величиною максимальної швидкості v_m, а при роботі у ударно-силовому режимі – величиною імпульсу електродинамічної сили $P_z=\int f_z(z,t)dt$ при мінімальних перевищеннях температур обмоток $\theta_n=T_n-T_0$. Розглянемо електричні та теплові характеристики ЛІЕП при підключенні ОІ до джерела змінного струму та відсутності ЕЯ, вважаючи початкову фазу ψ_u=0 (рис. 4.36).

Максимальна щільність струму в ОІ j_1 у першому півперіоді на 24% вище, ніж при наступних коливаннях. Після кожного періоду коливань

спостерігається збільшення перевищення температури θ_1. До кінця інтервалу часу t=50 мс перевищення температури ОІ становить θ_1=0,86 ºС.

Розглянемо збудження ЛІЕП в ударно-силовому режимі при загальмованій ОЯ. За рахунок індукційного впливу ОІ на ОЯ в останній протікає струм щільністю j_2 (рис. 4.37).

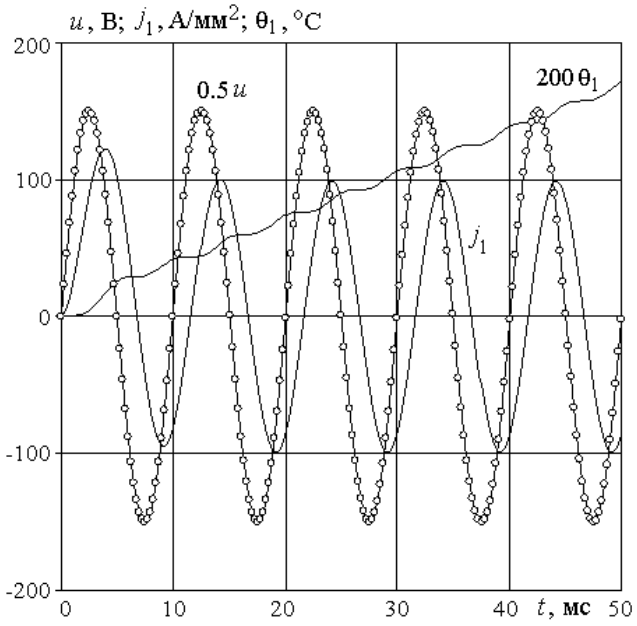
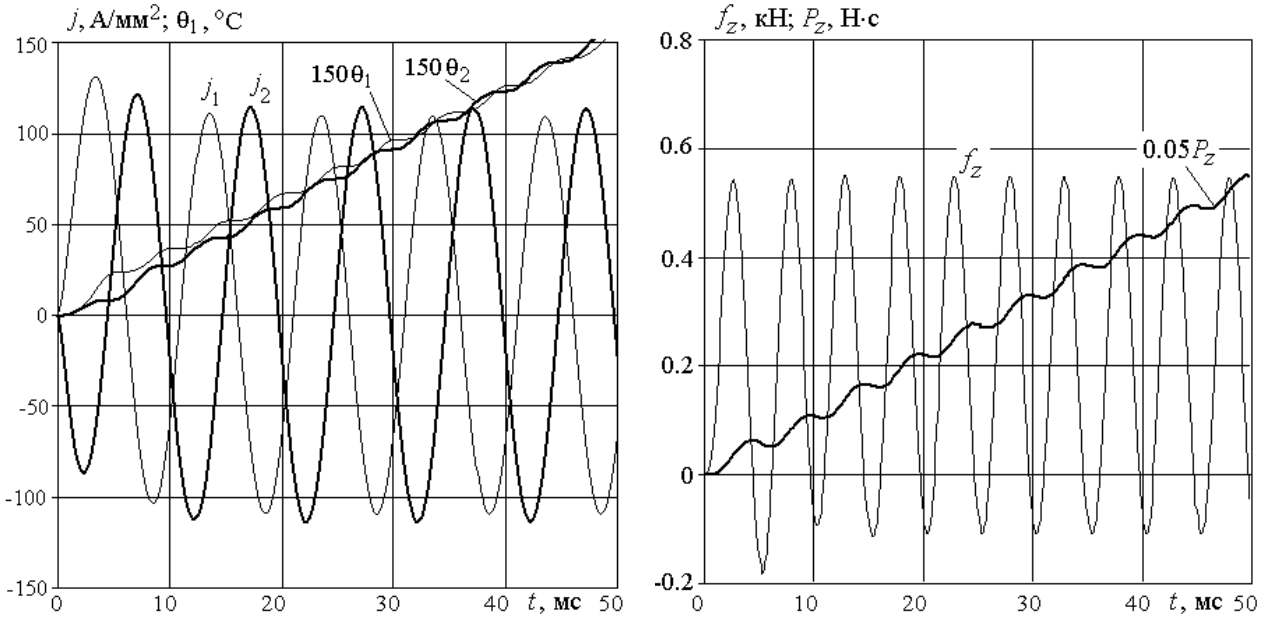


Рисунок 4.36 – Електричні та теплові характеристики ЛІЕП за відсутності ОЯ



а *б*

Рисунок 4.37-8 – Електричні, теплові (*а*) та силові (*б*) характеристики ЛІЕП при збудженні в ударно-силовому режимі

Індукований струм в ОЯ має фазовий зсув по відношенню до струму ОІ. Порівняно з роботою за відсутності ОЯ, максимальна щільність струму в ОІ j_1 зростає на 6,7 %. У перший напівперіод щільність струму в ОЯ набуває найменшого негативного значення, але вже в другий напівперіод виникає найбільше позитивне значення j_2=121,3 А/мм^2. Перевищення температури ОІ θ_1 до кінця інтервалу часу, що розглядається, збільшується на 18,5 % порівняно з роботою ЛІЕП за відсутності ОЯ. Перевищення температури ОЯ практично таке саме, як ОІ і становить θ_2=1,03 ºС.

Внаслідок фазового зсуву між струмами обмоток змінюються з подвоєною частотою практично за синусоїдальним законом, приймаючи як позитивне (відштовхуюче), так і негативне значення (рис. 4.37). Позитивні значення сили (струми в обмотках мають протилежні напрямки) у кілька разів перевищують негативні значення (струми мають однакові напрямки). Максимальна величина сили першого позитивного коливання становить f_z=0,542 кН, трохи збільшуючись у наступних напівперіодах. Величина першого негативного коливання максимальна і становить 0,182 кН, зменшуючись на 67%. Оскільки позитивні коливання сили за величиною переважають над негативними, величина імпульсу ЕДЗ P_z з кожним періодом сили f_z збільшується, досягаючи значення P_z=10,98 Н·с до кінця розглянутого інтервалу часу. При позитивних значеннях сили f_z величина імпульсу ЕДЗ P_z збільшується, а за негативних значеннях сили величина P_z має характерні зниження.

Початкова фаза напруги в момент підключення ЛІЕП до джерела змінного струму може бути в діапазоні $\psi_u \in \left(0;180^0\right)$. Вплив початкової фази напруги на величини перевищень температур обмоток і імпульсу ЕДЗ за інтервал часу t=50 мс, що розглядається, показано на рис. 4.38.

Для оцінки впливу початкової фази напруги джерела використаємо відносну зміну величини показника:

$$\Delta\kappa = 2\frac{\kappa_{max} - \kappa_{min}}{\kappa_{max} + \kappa_{min}}, \qquad (4.42)$$

де κ_{max}, κ_{min} – максимальне та мінімальне значення показника к відповідно.

Мінімальне значення величини імпульсу ЕДЗ P_z для аналізованого перетворювача має місце приблизно при ψ_u=50º, а максимальне – через ψ_u=90º. Відносна зміна величини імпульсу сили незначна і становить ΔP_z=1,5 %.

Перевищення температур обмоток мають екстремум в центрі інтервалу ψ_u. Перевищення температури ОІ при ψ_u=90º мінімально, а ОЯ максимально. Відносні зміни теплових показників становлять: $\Delta\theta_1$=6,6 %, а $\Delta\theta_2$=2,8 %.

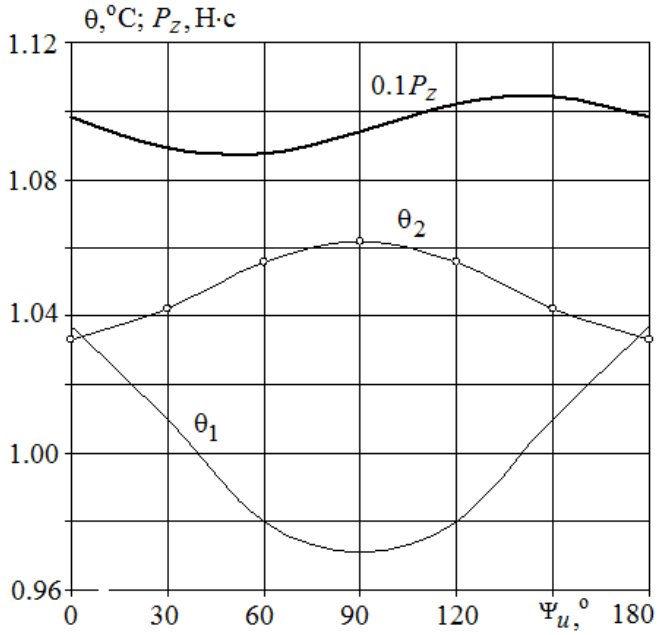


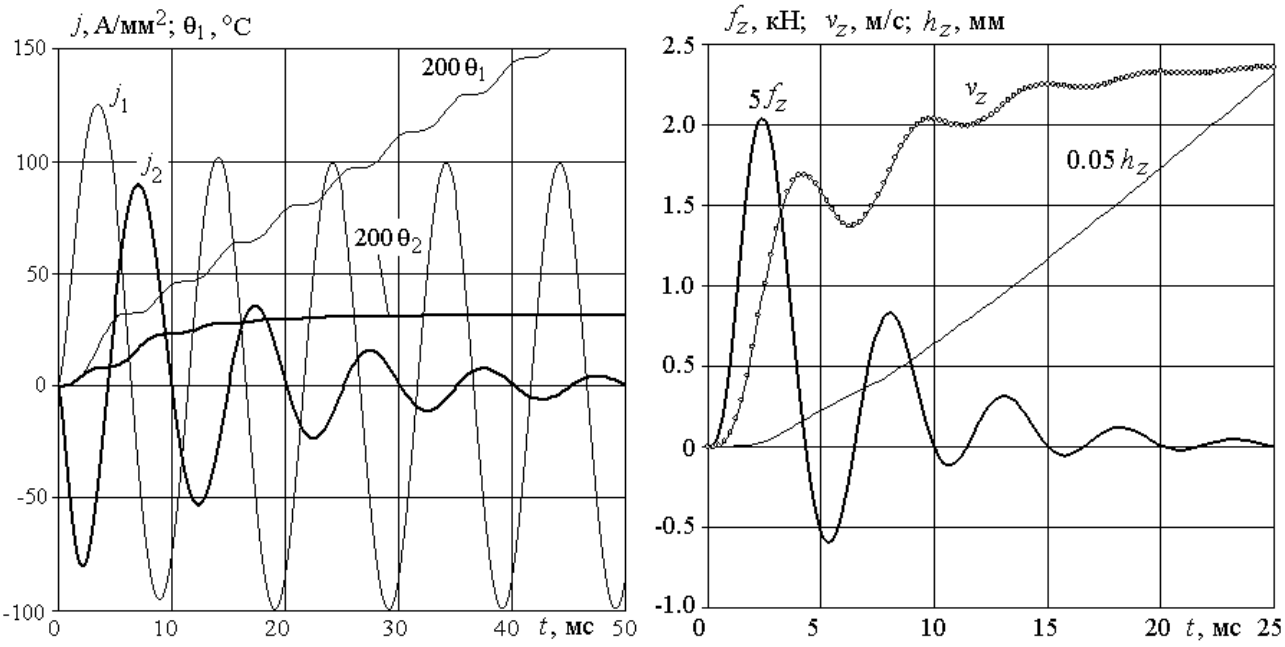
Рисунок 4.38 – Залежність теплових та силових показників ЛІЕП в ударно-силовому режимі від початкової фази напруги джерела змінного струму

Розглянемо ЛІЕП при роботі у швидкісному режимі. Швидкісний режим ЛІЕП характеризується тим, що під дією ЕДЗ ОЯ разом із ВЕ переміщається щодо ОІ, зумовлюючи ослаблення магнітного зв'язку між обмотками (рис. 4.39). У цьому режимі роботи ЛІЕП струм в ОІ має такі особливості (рис. 4.40, а). У перший півперіод максимальна щільність струму в ОІ має найбільше значення j_1=125,2 А/мм^2, але через кілька періодів виходить на значення j_1=99 А/мм^2 (як і при роботі без ОЯ). Індукований струм в ОЯ має коливально-

загасаючий характер з найбільшим максимальним значенням у другому позитивному напівперіоді.

Зазначений характер перебігу струмів призводить до суттєвої зміни перевищень температур по відношенню до ударно-силового режиму роботи ЛІЕП. Перевищення температури ОІ до кінця інтервалу часу, що розглядається, становить θ_1=0,88 ºС і зростає з моменту підключення до джерела змінного струму. Перевищення температури ЕЯ має характер насичення, досягаючи істотно меншого значення θ_2=0,16 ºС за час, що розглядається.

Механічні характеристики ЛІЕП-Е у швидкісному режимі роботи мають такі особливості (рис. 4.39,б). ЕДЗ f_z набуває коливального характеру зі швидким загасанням і суттєвим переважанням позитивної складової.



а *б*

Рисунок 4.39 – Електричні, теплові (*а*) та механічні (*б*) характеристики ЛІЕП при збудженні у швидкісному режимі

Найбільша величина сили f_z=0,4 кН менше, ніж під час роботи ЛІЕП в ударно-силовом режимі. Але ще більш істотно менше величина імпульсу ЕДЗ, складаючи P_z=1,25 Н·с до кінця розглянутого інтервалу часу. На характер зміни швидкості якоря впливають як позитивні (прискорюючі), і негативні (гальмівні) складові ЕДЗ. Швидкість до кінця інтервалу збудження, що розглядається, досягає максимального значення V_m=2,36 м/с.

Вплив початкової фази напруги на показники ЛІЕП показано на рис. 4.40 Порівняно з ударно-силовим режимом роботи ЛІЕП у діапазоні $\psi_u \in (0;180^0)$ немає симетрії перевищень температур обмоток. Відносні зміни теплових показників становлять: $\Delta\theta_1$=8%, $\Delta\theta_2$=1,9%. Максимальна швидкість ОЯ має місце приблизно при ψ_u=90º. Вона трохи залежить від початкової фази напруги (відносна зміна становить ΔV_m=2,5 %).

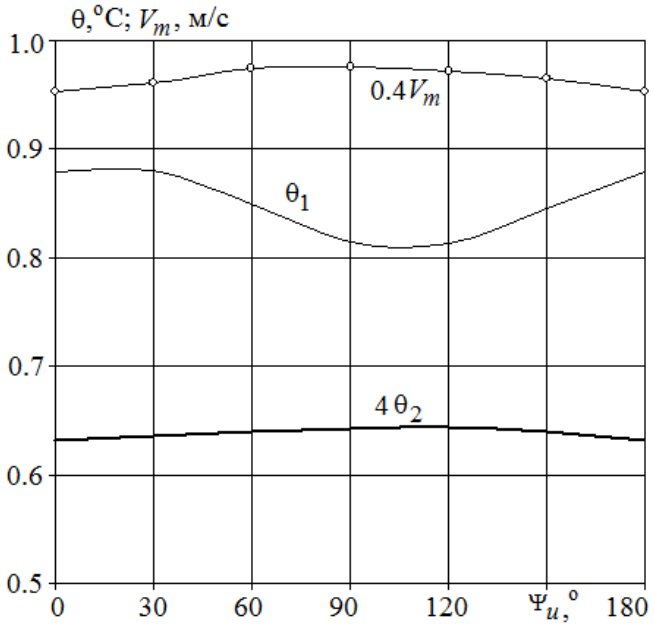


Рисунок 4.40 – Залежність теплових та механічних показників ЛІЕП у швидкісному режимі від початкової фази напруги джерела змінного струму

З проведених досліджень можна зробити такий висновок. Збудження ЛІЕП індукційного типу від джерела змінного струму дозволяє реалізувати нові технічні можливості. Так під час роботи ЛІЕП в ударно-силовом режимі можна багаторазово збільшувати час силового впливу на виконавчий елемент проти

збудженням від ємнісного накопичувача енергії. Така тривала силова дія необхідна в приводах станів холодної прокатки, у вібросмішувачах, дозаторах, насосах, у випробувальних комплексах для перевірки відповідальної апаратури на силові навантаження, в магнітно-імпульсних пристроях для пресування порошків кераміки, електродинамічної обробки зварних з'єднань та ін.

4.6 Порівняльний аналіз силових та швидкісних показників ЛІЕП електродинамічного та індукційного типів

У ЛІЕП нерухомий індуктор містить багатовиткову обмотку, що збуджується, як правило, ємнісним накопичувачем енергії. Індуктор за допомогою магнітного поля взаємодіє з рухомим якорем, який через ЕДЗ відштовхування впливає на ударний ВЕ. У ЛІЕП-Е якір являє собою одно або багатовиткову короткозамкнену обмотку. У ЛІЕП-К якір є багатовитковою обмоткою, яка електрично послідовно і зустрічно по магнітному полю з'єднана з індуктором. В ЛІЕП-К якір з'єднаний з індуктором та ЄНЕ за допомогою гнучких або ковзних струмівводів. Проблемою порівняльного аналізу показників ЛІЕП індукційного та електродинамічного типів займалися різні дослідники [150, 151, 152].

Розглянемо вплив геометричних параметрів ОІ та обмотки якоря (ОЯ) на силові та швидкісні показники ЛІЕП індукційного та електродинамічного типів. Ефективність ЛІЕП оцінимо силовими показниками: найбільшими значеннями амплітуди f_{zm} та імпульсу ЕДЗ F_z та швидкісними показниками: максимальними значеннями ККД η та швидкості якоря V_m при мінімальних перевищеннях температур активних елементів θ_n, де $f_z(z,t)=i_1(t)i_2(t)\frac{dM_{12}}{dz}(z)$, $f_z(z,t)=i^2(t)\frac{dM_{12}}{dz}(z)$ – миттєве значення ЕДЗ, що діють на якір ЛІЕП-Е та ЛІЕП-К відповідно; $F_z=\int f_z(z,t)dt$; $\eta=\left[(m_2+m_a)v_z^2+K_P\Delta z^2\right]C_0^{-1}U_0^{-2}$; $\theta_n=T_n-T_0$.

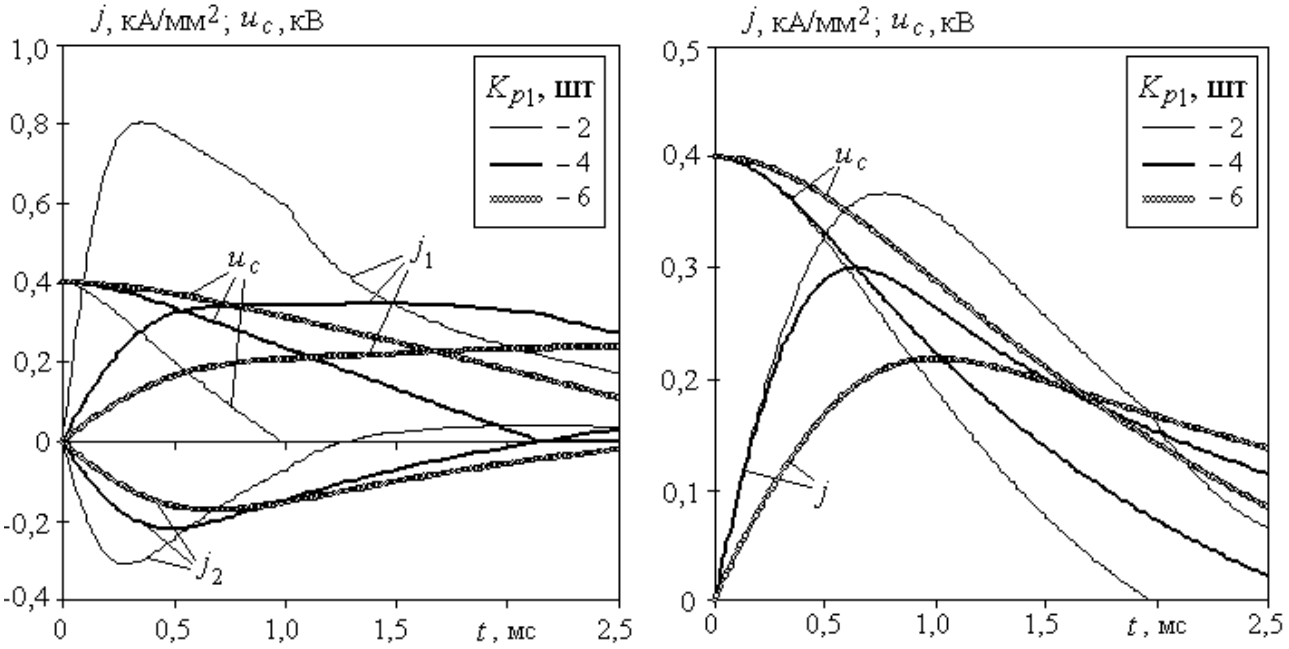
ККД η є відношенням механічної енергії ЛІЕП до вихідної енергії ЄНЕ $W_{c0} = 0{,}5C_0U_0^2$. Механічна енергія, що розвивається перетворювачем, складається з кінетичної енергії рухомих елементів (ОЯ та ВЕ) $W_{kin} = 0{,}5(m_2 + m_a)v^2(t)$ та енергії стиснення зворотної пружини $W_{pr} = 0{,}5K_P\Delta z^2(t)$.

Розглянемо ЛІЕП, у якого коаксіально встановлені ОІ (n=1) та ОЯ (n=2) щільно намотані K_{pn} шарами мідної шини квадратного перерізу зі стороною a=1,5 мм. Зовнішній діаметр n-го елемента D_{en}=100 мм, внутрішній діаметр D_{in}=10 мм. ЄНЕ має такі параметри: ємність C_0 = 3,0 мФ, напруга U_0 = 0,4 кВ. Початкова відстань між ОІ та ОЯ Δz_0=1 мм. Коефіцієнт пружності зворотної пружини K_P = 25 кН/м. Маса ВЕ m_a = 0,25 кг. Розглянемо вплив кількості K_{pn} шарів мідної шини в ОІ та ОЯ на показники ЛІЕП, оскільки ці параметри визначають кількість витків $N_n = Ent\left[0{,}5K_{pn}(D_{en} - D_{in})(a + 2\delta_i)^{-1}\right]$ та аксіальну висоту $H_n = (a + 2\delta_i)K_{pn}$ n-их активних елементів при фіксованих радіальних розмірах. $Ent(\varsigma)$ - найбільше ціле число, що не перевищує ς; δ_i – товщина ізоляції мідної шини.

Розглянемо електромеханічні показники ЛІЕП при різній кількості шарів шини ОІ K_{p1} та фіксованій кількості шарів шини ОЯ K_{p2}=4 (N_2=112, H_2=6,4 мм). У ЛІЕП-Е (рис.4.41, а) зі збільшенням кількості шарів шини ОІ напруга ЄНЕ досягає нульового значення за більший інтервал часу. Амплітуди густин струмів ОІ j_1 і ОЯ j_2 зменшуються і досягаються за більший інтервал часу. Аналогічну закономірність виявляють ЕДЗ f_z.

Якщо ОІ містить два шари шини (K_{p1}=2, N_1=56, H_1=3,2 мм), то амплітуда щільності струму в ОІ j_{1m}=804,9 А/мм^2, а ОЯ j_{2m}=308,6 А/мм^2. Амплітуда ЕДЗ f_m=12,5кН, максимальна величина швидкості якоря V_m=9,47 м/с, величина імпульсу ЕДЗ F_z=6,56 Н·с, ККД η=10,6 %, перевищення температури ОІ θ_1=3,06 ºС та перевищення температури ОЯ θ_2=0,21 ºС. При збільшенні кількості шарів шини ОІ втричі (K_{p1}=6, N_1=168, H_1=9,6 мм) всі показники ЛІЕП-

Е зменшуються: j_{1m} – у 3,38 рази, j_{2m} – у 1,78 рази, f_m – у 3,03 рази, V_m – у 1,3 рази, F_z – у 1,3 рази, η – у 1,6 рази, θ_1 – у 6,55 рази, θ_2 – у 1,46 рази.



а *б*

Рисунок 4.41 – Електромеханічні показники ЛІЕП-Е (*а*) та ЛІЕП-К (*б*) при різній кількості шарів шини ОІ та фіксованій кількості шарів шини ОЯ

У ЛІЕП-К (рис.4.41,б) зі збільшенням кількості шарів шини ОІ K_{p1} закономірності зміни напруги ЄНЕ u_c амплітуди щільності струму ОІ і ОЯ j і ЕДЗ f_z аналогічні. Однак спостерігаються і відмінності. Якщо ОІ містить два шари шини (K_{p1}=2), то у ЛІЕП-К амплітуда щільності струму в ОІ і ОЯ j_m=367,7 А/мм^2, амплітуда ЕДЗ f_m=6,43 кН, максимальна величина швидкості якоря V_m=9,51 м/с, величина імпульсу ЕДЗ F_z=6,59 Н·с, ККД η=14,1 %, перевищення температури ОІ та ОЯ $\theta_1=\theta_2$=0,73 ºС. При збільшенні числа шарів шини ОІ втричі (K_{p1} = 6), j_m зменшується в 1,6 разів, f_m зменшується в 1,39 разів, V_m зростає в 1,15 разів, F_z зменшується в 1,03 рази, η зростає в 1,11 разів, θ зменшується у 1,9 разів. У порівнянні з ЛІЕП-Е в ЛІЕП-К реалізуються вищі ККД, швидкісні та силові показники.

Розглянемо вплив шарів шини ОІ та ОЯ на силові показники ЛІЕП. На рис. 4.42 представлені розподіли амплітуди f_{zm} (жирні лінії) та імпульсу F_z (тонкі лінії) ЕДЗ в просторі $K_{p1}\subset(1,\ 6)$; $K_{p2}\subset(1,\ 6)$. У ЛІЕП-Е (рис.4.42,а)

найбільше значення амплітуди ЕДЗ f_{zm}=21,5 кН виникає за умови «тонкої» ОІ (K_{p1}=1) і «середньої» ОЯ (K_{p2}=3), а найменше f_{zm}=2, 3 кН за умови "товстої" ОІ (K_{p1} = 6) і "тонкої" ОЯ (K_{p2} = 1). Максимальна величина імпульсу F_z = 7,1 Нс має місце в «середній» ОІ (K_{p1}=3) та «товстій» ОЯ (K_{p2}=6), а найменша величина F_z=2,3 Н·с – в «товстій» ОІ (K_{p1}=6) та «тонкій» ОЯ (K_{p2}=1).

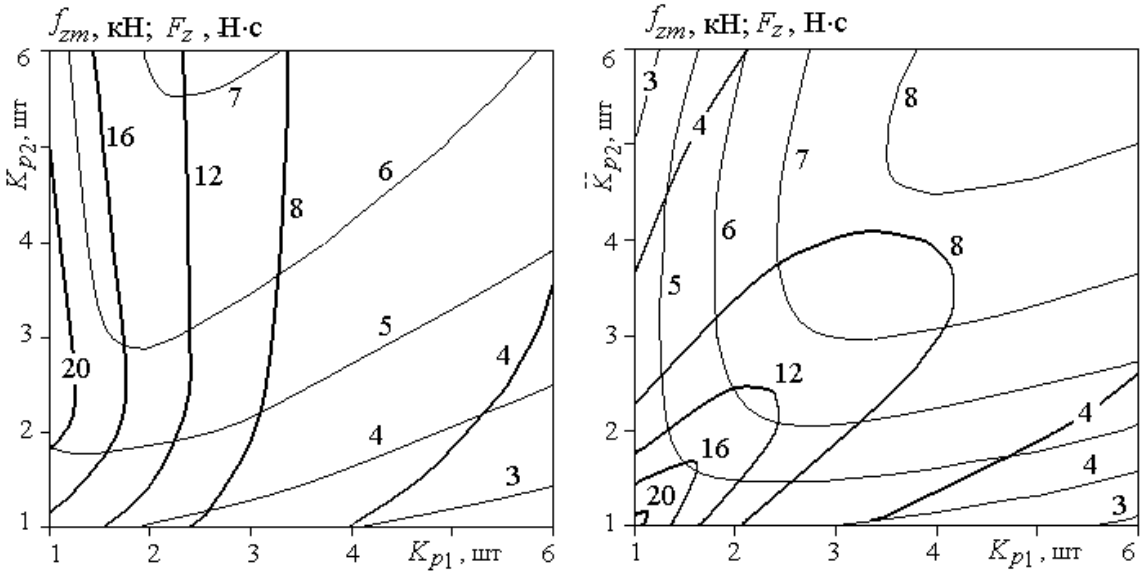
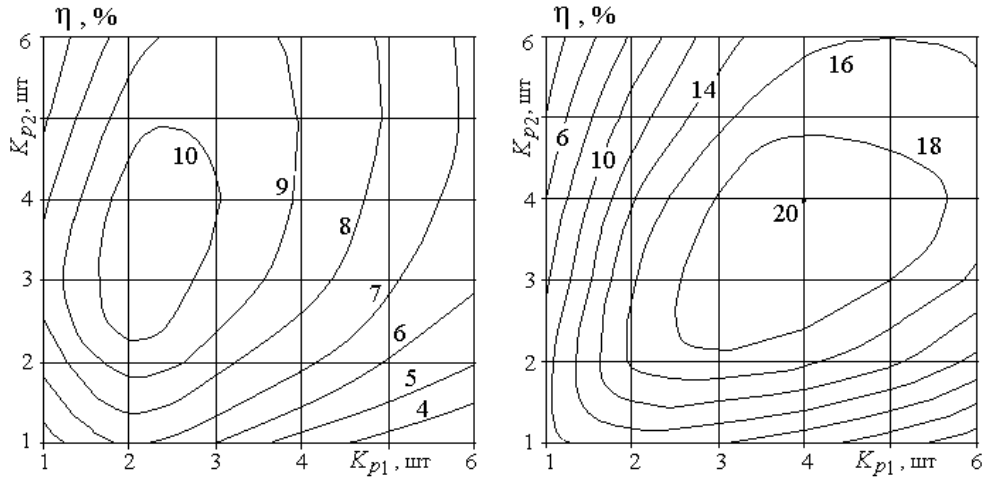


Рисунок 4.42 – Вплив шарів шини ОІ та ОЯ на силові показники ЛІЕП-Е (*а*) та ЛІЕП-К (*б*)

У ЛІЕП-К (рис.4.42,б) максимальні значення амплітуди і імпульсу ЕДЗ утворюються за рівності кількості шарів шин ОІ і ОЯ. Величина найбільшої амплітуди ЕДЗ практично така сама, як і у ЛІЕП-Е f_{zm} = 20,5 кН, проте вона виникає за умови «тонких» ОІ та ОЯ. Найменше значення амплітуди ЕДЗ f_{zm}=1,73 кН проявляються у «товстій» ОІ (K_{p1}=6) та «тонкій» ОЯ (K_{p2}=1). Максимальна величина імпульсу ЕДЗ F_z=8,15 Н·с виникає у «товстих» ОІ та ОЯ, а найменша F_z=2,78 Н·с – у «товстій» ОІ та «тонкій» ОЯ.

Розглянемо вплив шарів шини ОІ K_{p1} та ОЯ K_{p2} на величину ККД η ЛІЕП у просторі $K_{p1}\subset(1, 6)$; $K_{p2}\subset(1, 6)$. У ЛІЕП-Е (рис. 4.43,а) максимальний ККД η=10,9 % має місце при K_{p1}=2 та K_{p2}=3. Найменша величина ККД η=2,99 % виникає при «товстій» ОІ та «тонкій» ОЯ. У ЛІЕП-К максимальне значення ККД майже удвічі більше η=20,0 % і досягається за більш «товстих» і

однакових ОІ і ОЯ (K_{p1}=K_{p2} =4) (рис. 4.43,б). Найменша величина ККД η=2,61% виникає при «тонкій» ОІ та «товстій» ОЯ.



а *б*

Рисунок 4.43 – Вплив шарів ОІ та ОЯ на величину ККД ЛІЕП-Е (*а*) і ЛІЕП-К (*б*)

Розглянемо енергетичні процеси протягом робочого циклу в ЛІЕП-Е та ЛІЕП-К з найбільшими ККД, враховуючи такі складові: $W_c = 0{,}5 \cdot C_0 \cdot u_c^2(t)$ - енергія ЄНЕ; $W_{mag} = 0{,}5\sum_{n=1}^{2} L_n i_n^2(t) + M_{12}(z) \cdot i_1(t) \cdot i_2(t)$ - магнітна енергія; $W_{p1} = \int i_1^2(t) R_1(T_1) dt$ - втрати в ОІ; $W_{p2} = \int i_2^2(t) R_2(T_2) dt$ - втрати в ОЯ; $W_{kin} = 0{,}5(m_2 + m_a) v^2(t)$ - кінетична енергія; $W_{pr} = 0{,}5 \cdot K_P \Delta z^2(t)$ - енергія стиснення зворотної пружини.

У найбільш ефективному ЛІЕП-Е енергія ЄНЕ W_c, яка на початку робочого циклу була $W_{c0} = 0{,}5 C_0 U_0^2$, зменшується досить швидко (через 1 мс) (рис. 4.44,а). На початку робочого циклу суттєво зростає енергія магнітного поля W_{mag}, яка до кінця розглянутого інтервалу робочого циклу помітно зменшується. Найбільш зростають втрати в ОІ W_{p1}, складаючи до кінця розглянутого інтервалу 73% від W_0, тоді як втрати в ОЯ W_{p2} становить 11% від W_0. До кінця робочого циклу енергія магнітного поля переважно переходить у втрати ОІ, оскільки сумарна механічна енергія не збільшується. Таким чином, в основному через втрати в ОІ лише 10,9 % вихідної енергії W_0 перетворюється на механічну енергію (W_{kin}+W_{pr}), що й обумовлює низький ККД ЛІЕП-Е.

У найбільш ефективному ЛІЕП-К вихідна енергія в ЄНЕ W_c зменшується повільніше (рис. 4.44,б). Енергія магнітного поля W_{mag} протягом робочого процесу зростає до меншої величини, однак через повільніше зменшення до кінця розглянутого інтервалу робочого циклу зберігає значну величину. Втрати в ОІ та ОЯ $W_{p1}=W_{p2}$ однакові, а в порівнянні з ЛІЕП-Е втрати в ОІ зменшуються, а в ОЯ зростають. Однак загальна величина цих втрат менша і становить близько 70 % від W_0. До кінця робочого циклу енергія магнітного поля переходить у втрати ОІ і ОЯ та в механічну енергію, що становить 20 % від вихідної енергії W_0. Через зниження втрат в активних елементах ефективність ЛІЕП-К вища, ніж у ЛІЕП-Е.

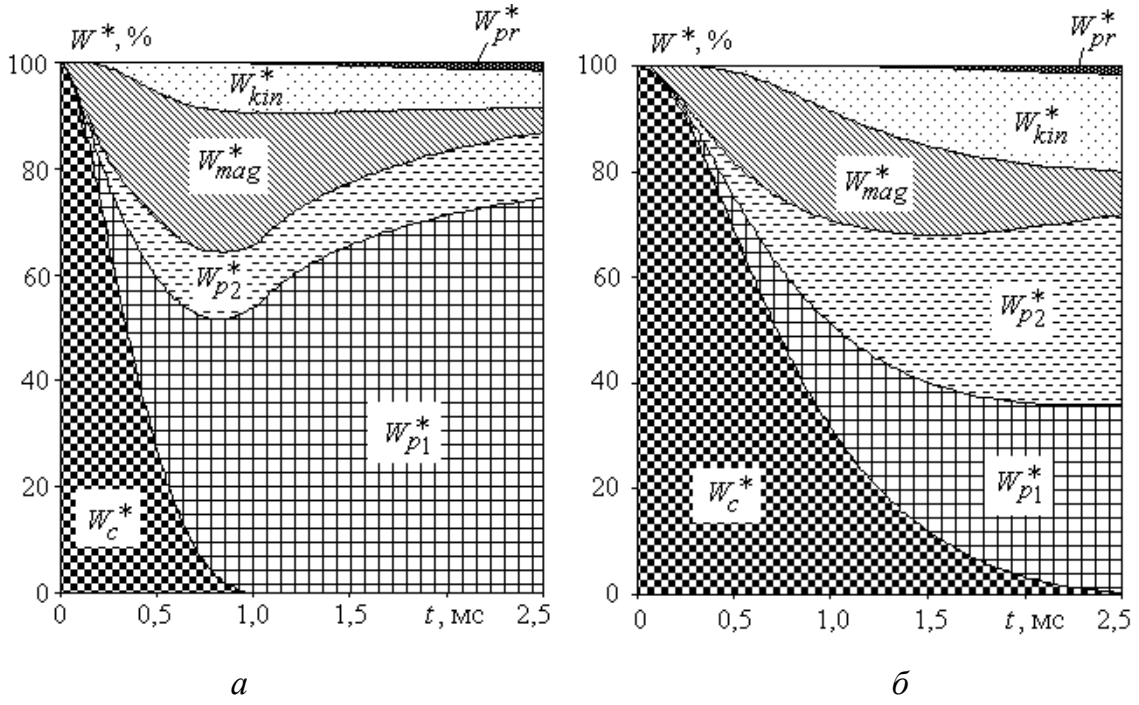


Рисунок 4.44 – Енергетичні процеси протягом робочого циклу в ЛІЕП-Е (*а*) та ЛІЕП-К (*б*) з найбільшими ККД

Таким чином, силові та швидкісні показники ЛІЕП-К вищі, ніж у ЛІЕП-Е при виконанні якорів у вигляді багатовиткових обмоток. Однак необхідно враховувати, що конструктивно ЛІЕП-К є більш складним через наявність гнучких або ковзних контактів для живлення ОЯ. У ЛІЕП-К між обмотками існує електричний і магнітний зв'язок, а у ЛІЕП-Е – лише магнітний.

5. ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІНІЙНОГО ІМПУЛЬСНОГО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПРИСКОРЮВАЧА

5.1 Вплив початкового зміщення обмоток на показники ЛІЕП циліндричної конфігурації

Лінійні імпульсні електромеханічні прискорювачі з осьовою симетрією обмоток можуть мати дискову або циліндричну конфігурацію. У дисковому прискорювачі обмотки індуктора та якоря виконані у формі відносно тонких дисків із подібними радіальними розмірами. У вихідному положенні дискові обмотки встановлюються на мінімальній аксіальній відстані один від одного, при якому максимальний магнітний зв'язок. Але в міру прискорення обмотки якоря магнітний зв'язок між обмотками різко знижується [153].

У циліндричному прискорювачі обмотки виконані у формі порожнистих циліндрів, аксіальні розміри яких значно перевищують радіальну товщину обмоток. У такому прискорювачі обмотка якір може здійснювати аксіальне переміщення всередині або зовні обмотки індуктора. Це робить таку конструкцію кращою, оскільки при більшому переміщенні обмотки якоря, а значить і більшому часі взаємодії забезпечується ефективний магнітний зв'язок між обмотками. На рис.5.1 представлена схема ЛІЕП циліндричної конфігурації з нерухомою зовнішньою обмоткою індуктора.

Якір може бути виконаний у вигляді багатовиткової короткозамкнутої обмотки або масивного електропровідного елемента. Масивний якір конструктивно простіше і має підвищену надійність. Проте індукований струм у масивному якорі розподіляється нерівномірно, що негативно впливає на електромеханічні показники ЛІЕП. У щільно намотаному багатовитковому короткозамкнутому якорі, просоченому і замоноліченому епоксидною смолою, незважаючи на складнішу конструкцію і знижену надійність, забезпечується рівномірний розподіл індукованого струму за обємом. Це робить його більш перспективним, особливо для ЛІЕП циліндричної конфігурації.

Однак у ЛІЕП циліндричної конфігурації виникає проблема вибору початкового зміщення z_0 обмотки якоря щодо обмотки індуктора. Це пов'язано з тим, що за відсутності зазначеного зсуву, коли центральні площини обмоток збігаються, магнітний зв'язок між обмотками буде найбільшим. Відповідно і індукований струм в ОЯ буде найбільшим. Проте аксіальна електродинамічна сила

$$f_z(t,z) = i_1(t) i_2(t) \frac{dM_{12}}{dz}(z),$$

де i_1, i_2 – струми в ОІ і ОЯ відповідно,

що приводить обмотку якоря в рух, буде відсутня. Це з тим, що сила f_z пропорційна градієнту взаємної індуктивності в аксіальному напрямку dM_{12}/dz. У міру збільшення початкового зміщення z_0 обмотки якоря 2 щодо обмотки індуктора 1 величина взаємної індуктивності M_{12} між обмотками послаблюється, тоді як градієнт взаємної індуктивності dM_{12}/dz має максимум за певної величини z_0 (рис. 5.1).

Оскільки струми в обмотках прискорювача протікають короткочасно, виникає питання про вибір початкового зміщення z_0 ОЯ 2 щодо ОІ 1, при якому ЛІЕП циліндричної конфігурації забезпечує найбільшу швидкість ОЯ разом із ВЕ на виході прискорювача v_{zf}.

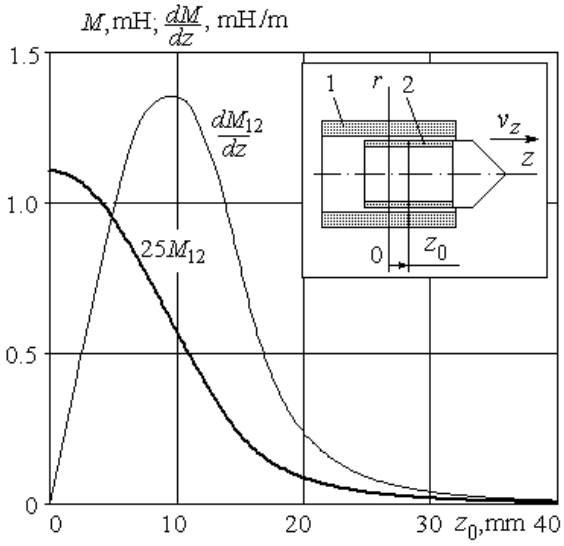


Рисунок 5.1 – Залежність взаємної індуктивності між обмотками M_{12} та її градієнта dM_{12}/dz ЛІЕП від початкового зміщення обмоток: z_0 1 – ОІ; 2 – ОЯ

Розглянемо вплив початкового зміщення обмоток на показники ЛІЕП циліндричної конфігурації при імпульсному збудженні від ємнісного накопичувача енергії та при короткочасному збудженні від джерела змінної напруги. Розглянемо електромеханічний індукційний прискорювач, у якого обмотки щільно намотані мідним проводом круглого перерізу та виконані монолітними шляхом просочення епоксидною смолою з подальшим її затвердінням.

Для обліку взаємопов'язаних електричних, магнітних, механічних та теплових процесів, а також низки нелінійних залежностей, наприклад опору від температури, використовуємо зосереджені параметри обмоток, а рішення рівнянь, що описують зазначені процеси, представимо у рекурентному вигляді [154]. Математична модель ЛІЕП враховує змінний магнітний зв'язок між обмотками в процесі збудження обмотки індуктора. При розрахунку показників та характеристик прискорювача використовується алгоритм циклічної дії. Для цього робочий процес розбивається на ряд чисельно малих інтервалів часу $\Delta t = t_{k+1} - t_k$, у яких всі величини вважаються незмінними. На *k*-му циклі, використовуючи як початкові значення параметри, розраховані в момент часу t_k, здійснюється розрахунок параметрів у момент часу t_{k+1}. Для визначення струмів на інтервалі часу Δt використовуємо лінійні рівняння з постійними значеннями параметрів. Малу величину розрахункового кроку Δt вибираємо таким чином, щоб вона не істотно впливала на результати комп'ютерного розрахунку, забезпечуючи при цьому необхідну точність.

Зміна просторового положення ОЯ відносно ОІ враховується зміною потокосцепления між обмотками [154]:

$$\frac{d\Psi}{dt} = M_{12}(z)\frac{di_n}{dt} + v_z(t) i_n \frac{dM_{12}}{dz},$$

де *n*=1, 2 – індекси ОІ та ОЯ відповідно; v_z – швидкість переміщення ОЯ вздовж осі z.

Початкові умови математичної моделі:

$i_n(0) = 0$ - струм n-ої обмотки;

$h_z(0) = z_0$ - переміщення обмотки якоря;

$T_n(0) = T_0$ - температура n-ої обмотки;

$u_c(0) = U_0$ - напруга ЄНЕ;

$u(0) = U_m \sin\psi_u$ - напруга ЄНЕ;

$v_z(0) = 0$ - швидкість обмотки якоря вздовж осі z,

де U_m – амплітуда напруги; ψ_u=0 – початкова фаза напруги ІСН.

Математична модель електромагнітних процесів ЛІЕП при збудженні від ЄНЕ представлена у роботі [155], а при збудженні від ЄНЕ – у роботі [156]. Механічні процеси прискорювача враховують маси ОЯ та ВЕ, миттєве положення ОЯ, ЕДЗ між обмотками та аеродинамічний опір повітряного середовища [152]. Теплові процеси прискорювача враховують питому теплоємність, теплопровідність, щільність матеріалу, питомий опір та щільності струмів j_n обмоток. На охолоджених поверхнях обмоток використовуються граничні умови третього роду, але в осі симетрії – граничні умови другого роду [157]. Як основні показники ЛІЕП використовуються амплітуди щільностей струму в обмотках індуктора j_{1m} і якоря j_{2m}, амплітуда ЕДЗ між обмотками f_{zm}, найбільша величина швидкості якоря v_{zm}, швидкість якоря на виході прискорювача v_{zf}.

Розглянемо електромеханічний прискорювач із наступними параметрами: ОІ має зовнішній діаметр D_{1ex}=39мм, внутрішній діаметр D_{1in}=27 мм, аксіальну висоту H_1=45 мм, число витків N_1=120; ОЯ має зовнішній діаметр D_{2ex}=26 мм, внутрішній діаметр D_{2in}=20 мм, аксіальну висоту H_2=30 мм, число витків N_2=40. Обмотки намотані мідним дротом круглого перерізу діаметром d_0=1,3 мм.

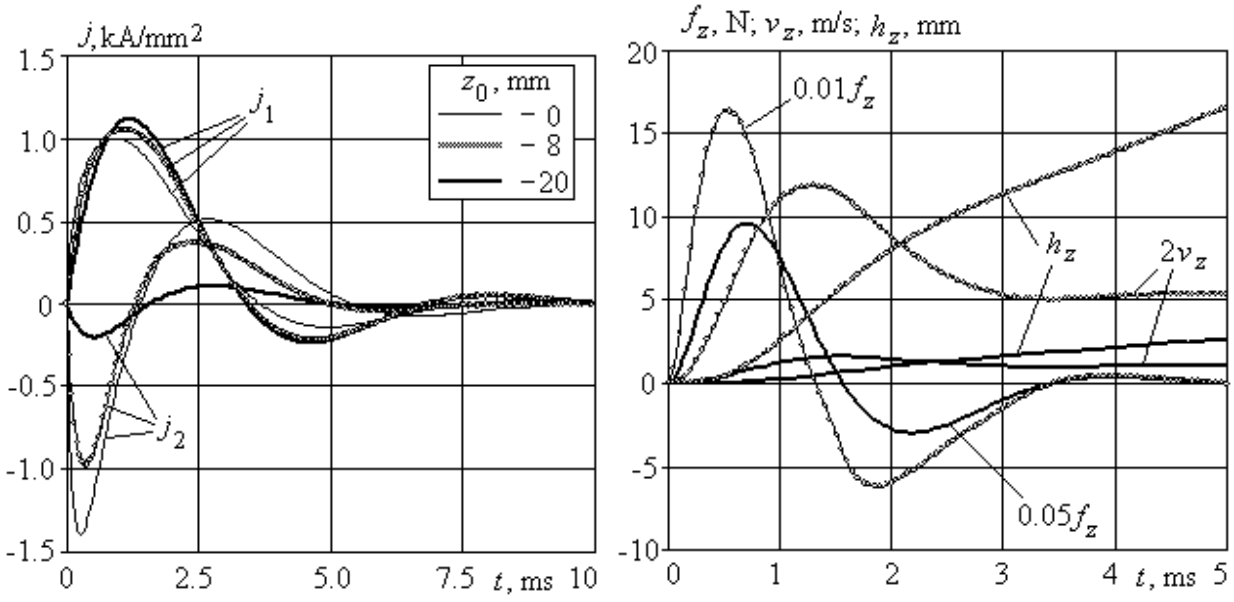
ЄНЕ має енергію W_0 = 625 Дж і реалізується у двох випадках. Варіант ЄНЕ I - зарядна напруга U_0 = 500 В і ємність C_0 = 5000 мкФ і варіант ЄНЕ II - U_0 = 700 В, C_0 = 2500 мкФ, які забезпечують різну тривалість електричних процесів.

Джерело змінної напруги має амплітуду напруги U_m=100 при частотах 50, 250 і 500 Гц і підключається до обмотки індуктора на короткий час (t=45 мс).

Розглянемо вплив початкового зміщення z_0 ОЯ щодо ОІ на характеристики ЛІЕП циліндричної конфігурації. Зауважимо, що з прискорювача з зазначеними геометричними параметрами найбільша величина градієнта взаємної індуктивності dM_{12}/dz має місце при $z_{0m}\approx 10$ мм (рис. 5.1).

Характеристики ЛІЕП при живлені від ЄНЕ. Розглянемо характеристики прискорювача за відсутності початкового зміщення (z_0=0), при максимальному зміщенні (z_0=20 мм) і при проміжному зміщенні, у якому забезпечуються найбільші швидкості якоря на виході прискорювача v_{zf}.

Струми в обмотках ЛІЕП мають коливально-загасаючий характер (рис. 5.2, а).



а *б*

Рисунок 5.2 – Електричні (*а*) та механічні (*б*) характеристики ЛІЕП при C_0=5000 мкФ, U_0=500 В

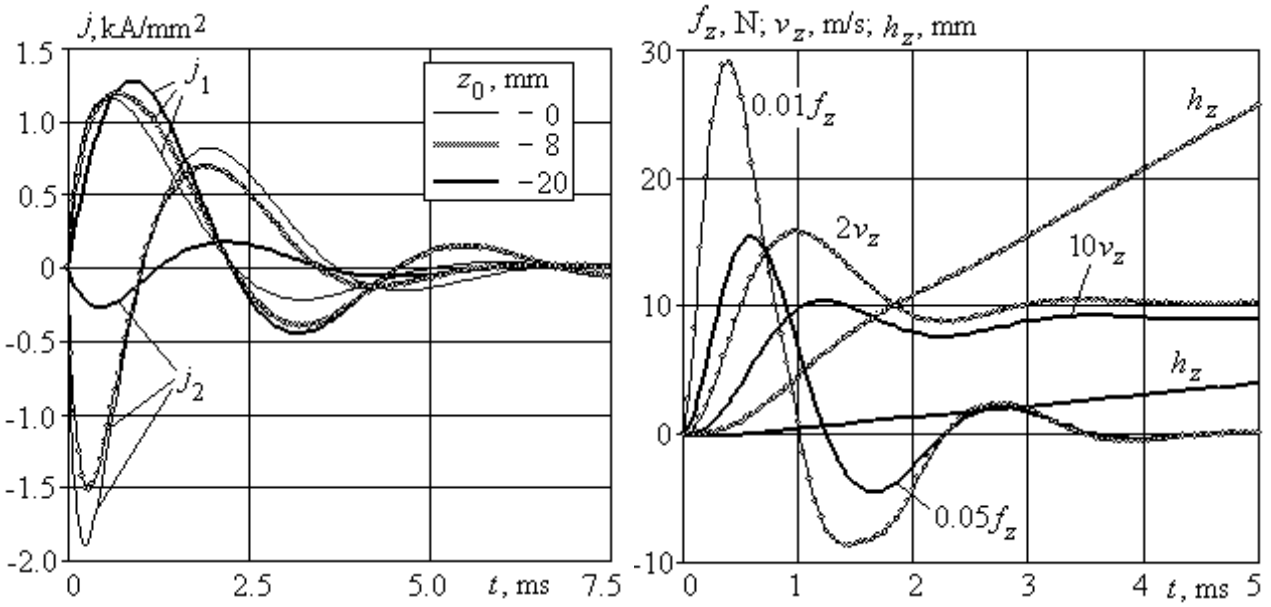
При використанні варіанта ЄНЕ І максимальна амплітуда щільності струму в обмотці індуктора j_{1m}=1,12 кА/мм^2 виникає при максимальному початковому зміщенні, але амплітуда щільності струму в обмотці якоря у своїй найменша – j_{2m}=0,2 кА/мм^2. Найбільша величина щільності струму – j_{2m}=1,4 кА/мм^2 виникає за відсутності початкового усунення. Зазначимо, що при будь-

якому початковому зміщенні z_0 струми в обмотках практично загасають через 10 мс.

Електродинамічна сила f_z між обмотками має початкову прискорюючу (позитивну) і наступну гальмівну (негативну) складові (рис. 2,б). Прискорююча складова ЕДЗ виникає при протилежних полярностях струмів в обмотках, а гальмівна – при однакових полярностях струмів. При проміжному початковому зміщенні z_0=8 мм амплітуда прискорюючої складової сили становить f_{zm}=1,64 кН. Внаслідок такої закономірності зміни ЕДЗ швидкість якоря спочатку зростає до максимально величини v_{zm}=5,94 м/с, а потім зменшується до моменту закінчення електромагнітного процесу в 2,23 рази. Переміщення обмотки якоря h_z нелінійно збільшується з часом на ділянці розгону, на якому відбувається електродинамічна взаємодія між обмотками. Очевидно, що величина переміщення h_z істотно вище за початкового зміщення обмоток z_0=8 мм, ніж при z_0=20 мм. При z_0=0 мм механічні показники ЛІЕП циліндричної конфігурації дорівнюють нулю. При z_0=8 мм перевищення температури ОІ становить θ_1=6,3 C^0, а перевищення температури ОЯ – θ_2=2,4 C^0.

При використанні варіанта ЄНЕ ІІ амплітуди густин струмів в обмотках ЛІЕП збільшуються (рис. 5.3,а). Найбільша амплітуда щільності струму в ОІ виникає при максимальному початковому зміщенні z_0=20 мм і становить j_{1m}=1,28 кА/мм^2. Амплітуда щільності струму в ОЯ при цьому мінімальна і становить j_{2m} = 0,26 кА/мм^2. За відсутності усунення (z_0=0 мм) щільність струму в ОЯ максимальна і як j_{2m}=1,9 кА/мм^2.

ЕДЗ f_z між обмотками також мають початкову прискорюючу і наступну складові, що гальмує (рис. 5.3, б). При проміжному початковому зсуві обмоток (z_0=6 мм) амплітуда прискорюючої складової сили збільшується до величини 2,9 кН. Швидкість обмотки якоря спочатку зростає до максимально величини v_{zm} = 7,91 м/с, а потім зменшується на момент закінчення електромагнітного процесу в 1,54 рази. При z_0=6 мм перевищення температури обмотки індуктора становить θ_1=5,9 C^0, а перевищення температури обмотки якоря – θ_2=5,0 C^0.



а *б*

Рисунок 5.3 – Електричні (*а*) та механічні (*б*) характеристики ЛІЕП при C_0=2500, U_0=700 В

Таким чином, незважаючи на більш короткий силовий вплив, використання ЄНЕ зі зниженою ємністю C_0 і підвищеною напругою U_0 забезпечує більш високі швидкісні показники ЛІЕП циліндричної конфігурації. Однак це реалізується за різного початкового зміщення обмоток z_0.

Оцінити вплив початкового зміщення обмотки якоря z_0 на показники прискорювача, що збуджується від ЄНЕ, дозволяє рис. 5.4. Незалежно від варіанта ЄНЕ основні залежності ЛІЕП мають наступний характер. При використанні варіанта ЄНЕ I та збільшенні z_0 від 0 до 20 мм амплітуда щільності струму в ОІ зростає незначно (на 11,2%), а ОЯ зменшується значно (в 6,98 раз). Внаслідок цього перевищення температури обмотки індуктора зростає на 19,1%, а перевищення температури обмотки якоря зменшується у 32,1 рази. Однак амплітуда ЕДЗ f_{zm} та швидкість на виході прискорювача v_{zf} мають виражені максимуми залежно від початкового зміщення обмоток z_0. Найбільша амплітуда сили f_{zm}=1,72 кН має місце при z_0≈6 мм, а найбільша швидкість v_{zf}=2,66 м/с – при z_0≈8 мм.

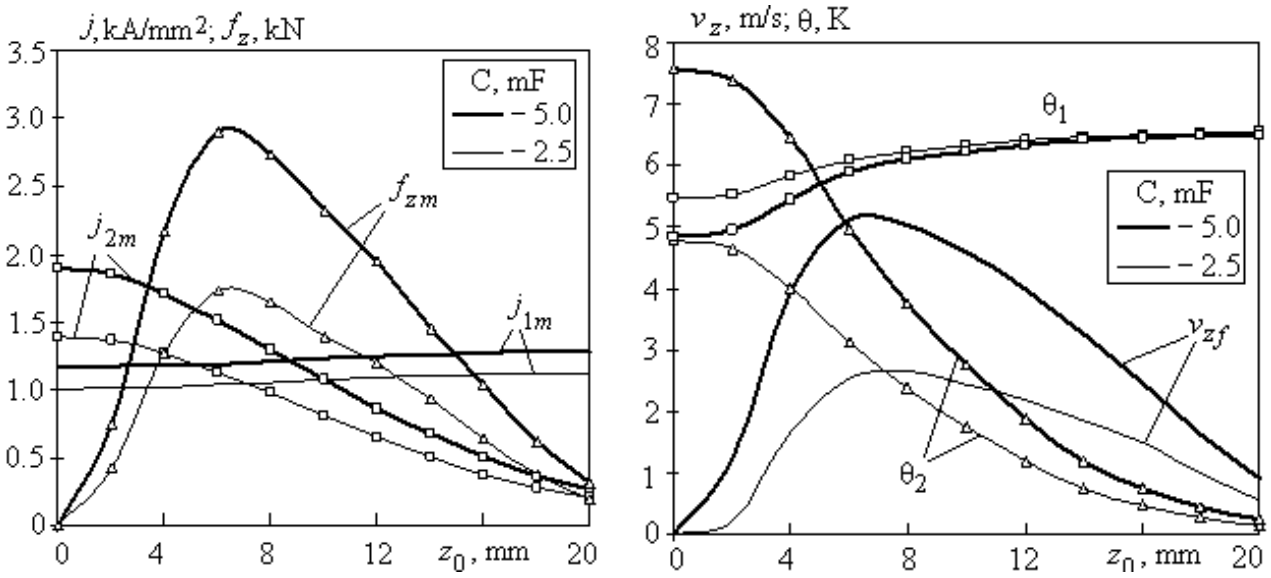


Рисунок 5.4 – Залежність показників ЛІЕП від початкового зміщення обмоток під час живлення від ЄНЕ

При збудженні ЛІЕП від варіанта ЄНЕ II амплітуди щільностей струмів в обмотках збільшуються, як і перевищення їх температур. Однак найбільша швидкість v_{zf}=5,11 м/с має місце при z_0=6,5 мм.

Характеристики ЛІЕП при збудженні від джерела змінної напруги. Розглянемо збудження ЛІЕП циліндричної конфігурації при збудженні від джерела змінної напруги. Якщо ЄНЕ має частоту ν=50 Гц, то між струмами в обмотках при початковому зміщенні z_0=6 мм виникає значний фазовий зсув, що призводить до виникнення прискорюючих і гальмуючих складових ЕДЗ, що чергуються (рис. 5.5). Оскільки прискорюючі складові сили переважають над складовими, що гальмують, то обмотка якоря переміщається щодо обмотки індуктора на відстань h_z зі швидкістю v_{zf}=0,51 м/с. За такої частоти ЄНЕ амплітуда струму в ОЯ приблизно в 4 рази менше, ніж в ОІ. Причому щільність струму в ОЯ в міру її переміщення щодо ОІ зменшується.

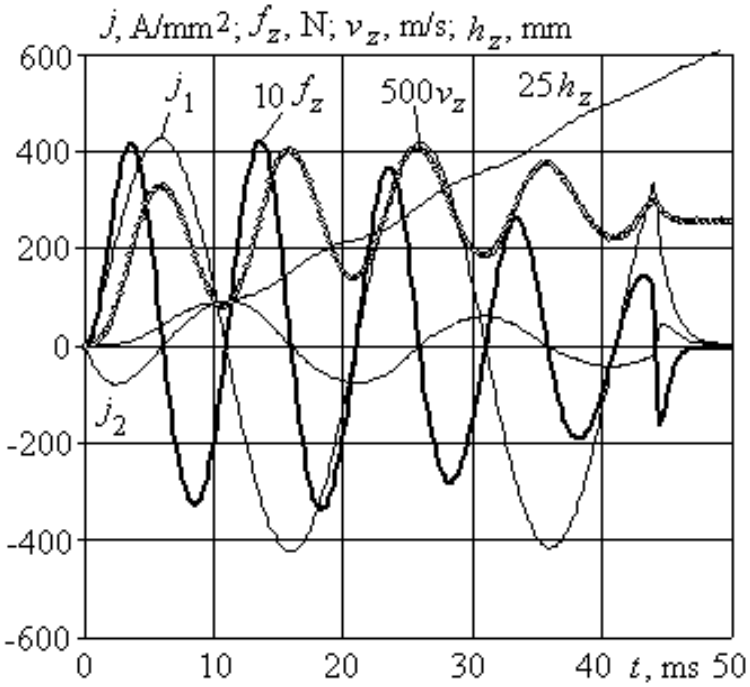


Рисунок 5.5 – Електромеханічні характеристики ЛІЕП при збудженні від ЄНЕ із частотою 50 Гц при z_0=6 мм

Оскільки зі збільшенням частоти ЄНЕ фазовий зсув між струмами обмоток зменшується, відповідно зменшується і гальмує складова електродинамічної сили. На рис. 5.6 представлені електромеханічні характеристики прискорювача при збудженні від ЄНЕ із частотою 250 Гц при z_0=8 мм. При такому збудженні порівняно зі збудженням із частотою 50 Гц струм в обмотці індуктора зменшується, а в обмотці якоря збільшується. У початковий період живлення щільності струмів в обмотках можна порівняти. Однак через зменшення магнітного зв'язку між обмотками щільність струму в обмотці індуктора виходить на значення, що встановилося, а в обмотці якоря практично повністю загасає до закінчення періоду збудження.

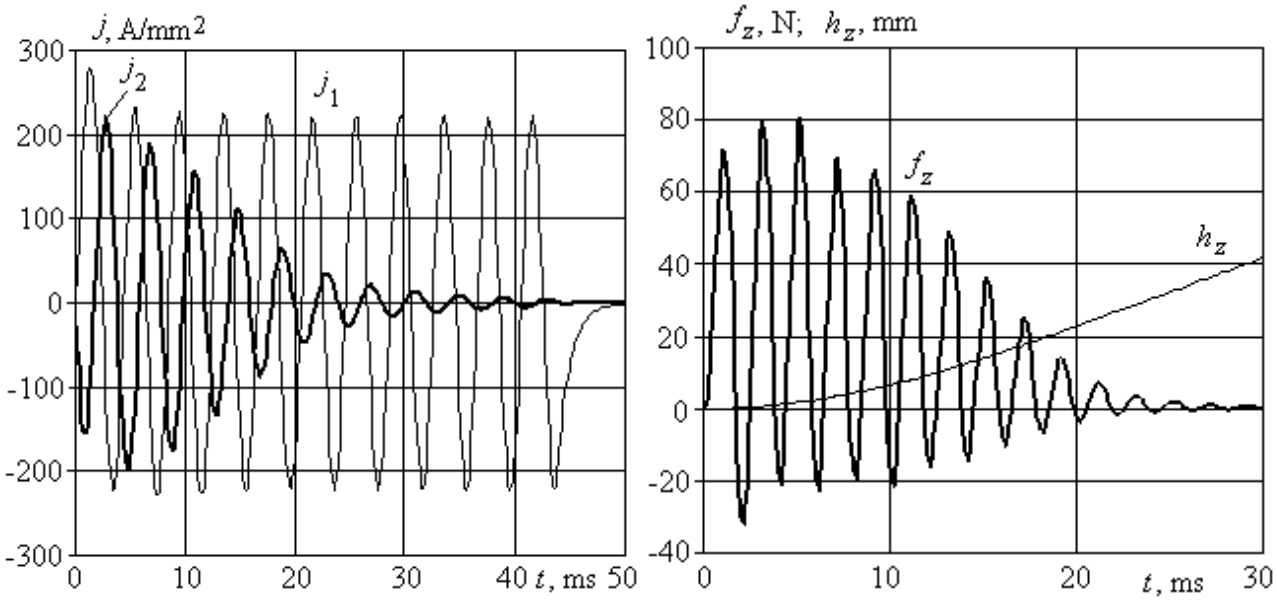


Рисунок 5.6 – Електромеханічні характеристики ЛІЕП при збудженні від ЄНЕ із частотою 250 Гц при z_0=8 мм

Але через більше переміщення обмотки якоря щодо обмотки індуктора за один і той же час магнітний зв'язок зменшується швидше, що призводить до сильнішого загасання електродинамічної сили. Ця сила згасає майже через 30 мс. Її прискорюючі складові збільшуються, а зменшуються, що гальмують, що призводить до більшої швидкості на виході прискорювача v_{zf}=1,9 м/с, ніж при частоті ЄНЕ 50 Гц.

При максимальному початковому зсуві між обмотками (z_0=20 мм) відбуваються такі зміни в електромеханічних процесах (рис. 5.7). При майже постійної щільності струму в обмотці індуктора j_1 щільність струму в обмотці якоря j_2 на початковому етапі значно зменшується через ослаблений магнітний зв'язок. Однак з часом струм в обмотці якоря та електродинамічна сила згасають із меншою швидкістю. Це зумовлено тим, що через знижену швидкість v_z якір переміщається на меншу відстань щодо обмотки індуктора.

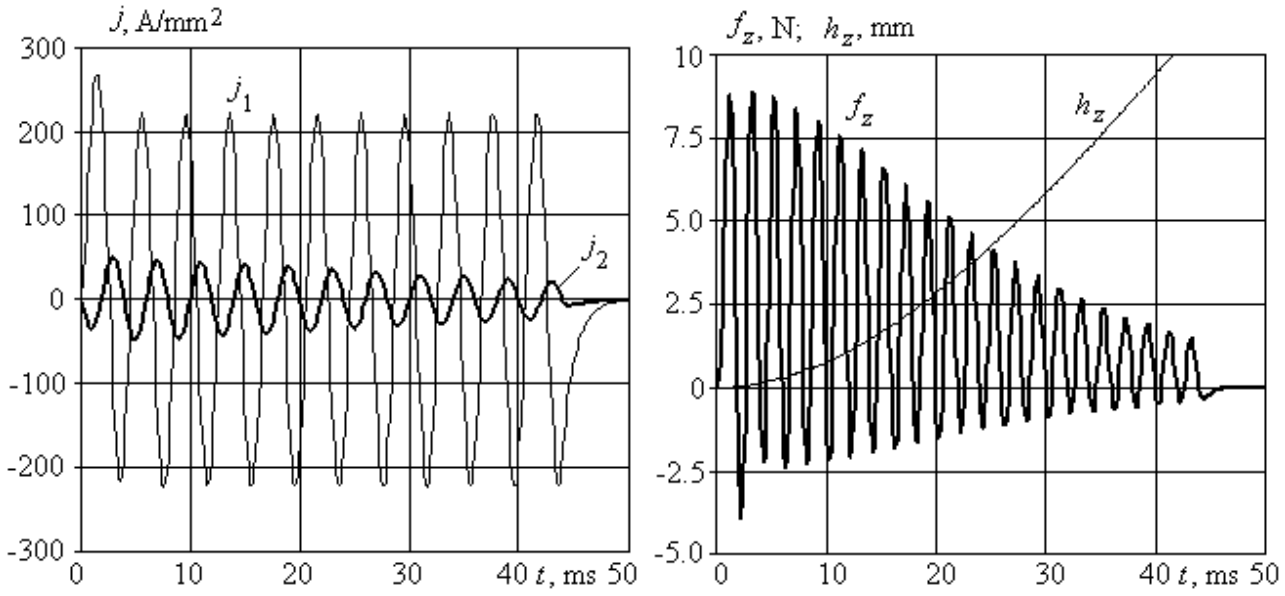
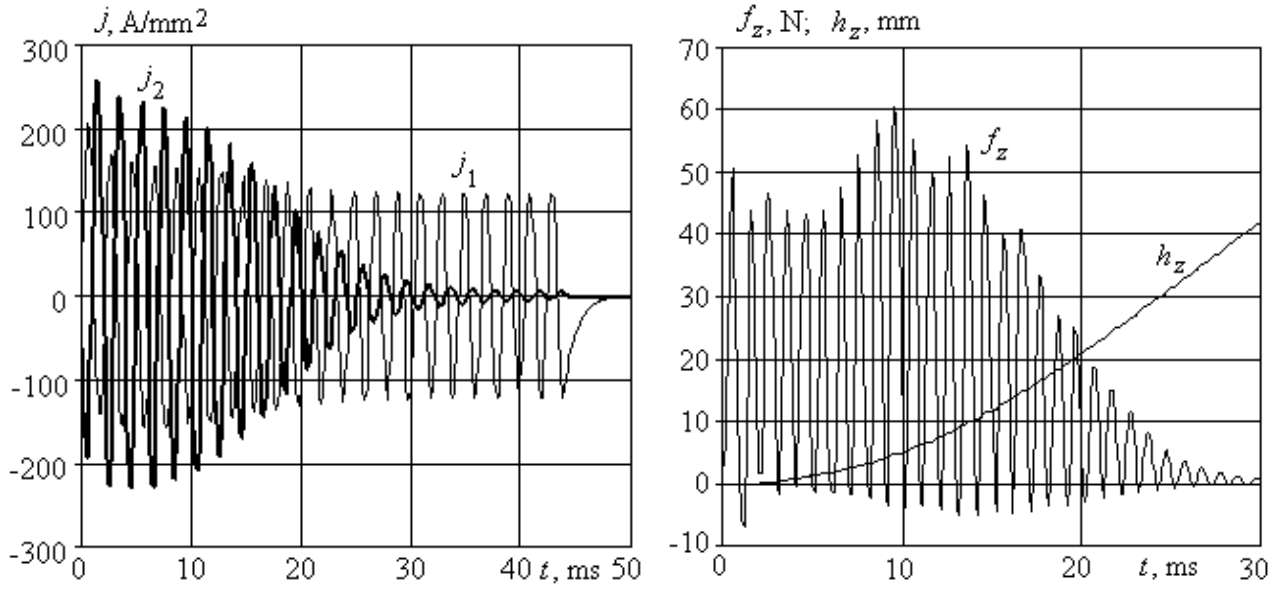


Рисунок 5.7 – Електромеханічні характеристики ЛІЕП при збудженні від ЄНЕ із частотою 250 Гц при z_0=20 мм

При підвищенні частоти ЄНЕ до 500 Гц змінюється співвідношення між амплітудами струмів в обмотках на початковому етапі (рис. 5.8).



а *б*

Рисуно 5.8 – Електричні (а) та механічні (б) характеристики ЛІЕП при збудженні від ЄНЕ із частотою 500 Гц при z_0=4 мм

Величина щільності струму в обмотці якоря перевищує аналогічну величину ОІ. При цьому фазовий зсув між обмотками ще більшою мірою зменшується. Внаслідок цього гальмують складові ЕДЗ зменшуються, що призводить до збільшення швидкості якоря на виході прискорювача до величини v_{zf}=2,2 м/с, незважаючи на зменшення складових сили, що прискорюють.

Оцінити вплив початкового зміщення ОЯ на показники ЛІЕП циліндричної конфігурації при збудженні від ЄНЕ дозволяє рис. 5.9. Збільшення початкового зміщення обмотки якоря z_0 від 0 до 20 мм максимальна швидкість на виході прискорювача залежить від частоти ЄНЕ. При частоті 50 Гц максимальна швидкість на виході прискорювача v_{zf}=0,5 м/с реалізується при z_0=6,2 мм, за частоти 250 Гц – v_{zf}=2,4 м/с при z_0=3,1 мм, а за частоти 500 Гц – v_{zf}=2,29 м/с при z_0 = 2,3 мм. При збільшенні частоти ЄНЕ перевищення температури обмотки індуктора θ_1 зменшується, а перевищення температури обмотки якоря θ_2 збільшується.

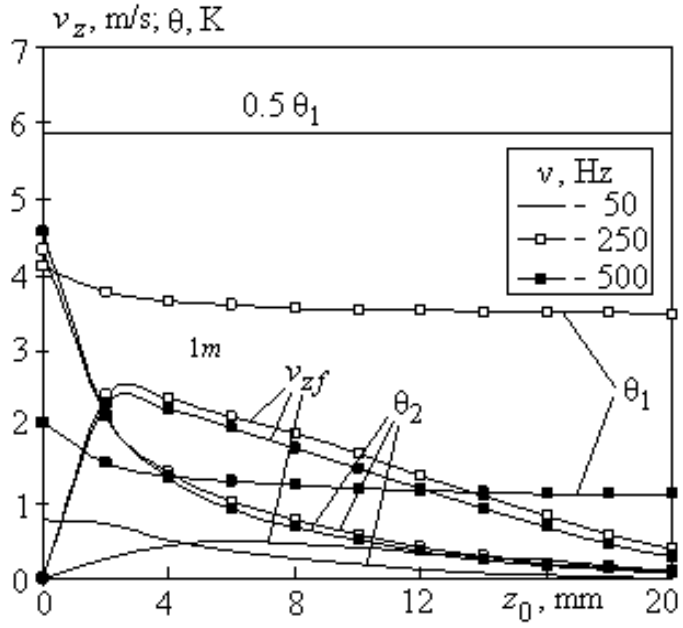


Рисунок 5.9 – Залежність показників ЛІЕП від початкового зміщення обмоток при збудженні від ЄНЕ

При частоті 50 Гц величина θ_1 мало залежить від початкового зміщення обмоток. Але за більш високих частотах зі збільшенням початкового зміщення

величина θ_1 трохи зменшується. Перевищення температури обмотки якоря θ_2 зменшується переважно від величини z_0 порівняно перевищенням температури обмотки індуктора.

Таким чином, при збудженні ЛІЕП від ЄНЕ початкове зміщення обмоток має становити приблизно $z_0 \approx 0{,}6 z_{0m}$, де z_{0m} відстань, на якій забезпечується найбільша величина dM_{12}/dz між обмотками. При збудженні ЛІЕП від ЄНЕ початкове зміщення z_0 необхідно вибирати в залежності від його частоти: при частоті 50 Гц – $z_0 \approx 0{,}6\ z_{0m}$, а при частотах 250 Гц та 500 Гц - $z_0 \approx 0{,}2\ z_{0m}$.

5.2 ЛІЕП з ємнісним накопичувачем енергії і додатковою ємністю в колі якоря

Розглянемо електричні процеси, що виникають в лінійному імпульсному електромеханічному прискорювачі з ЄНЕ і додатковою ємністю в колі (рис. 5.10).

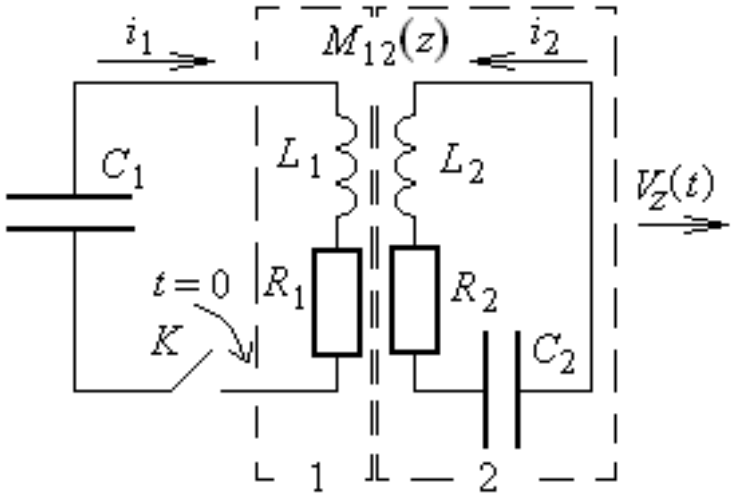


Рисунок 5.10 – Заміщення ЛІЕП з ЄНЕ та додатковою ємністю у колі якоря:
C – ємність; *R* – опір; *L* – індуктивність; *V* – швидкість; *M*(*z*) – взаємна індуктивність; *i* – струм; *K* – електронний перемикач; *t* – час; *1* – індекс ОІ; *2* – індекс ОЯ

Електричний процес в прискорювачі описується системою диференціальних рівнянь:

$$R_1 \cdot i_1 + L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C_1}\int_0^t i_1 dt + M_{12} \cdot \frac{di_2}{dt} + V_z \cdot i_2 \cdot \frac{dM_{12}}{dz} = 0, \quad (5.28)$$

$$R_2 \cdot i_2 + L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} + \frac{1}{C_2}\int_0^t i_2 dt + M_{21} \cdot \frac{di_1}{dt} + V_z \cdot i_1 \cdot \frac{dM_{21}}{dz} = 0, \quad (5.29)$$

де C_1, L_1, R_1 – зосереджені параметри ємності ЄНЕ, індуктивності, активного опору в колі ОІ; C_2, L_2, R_2 – зосереджені параметри ємності, індуктивності, активного опору в колі ОЯ; M_{12}=M_{21} – взаємна індуктивність обмоток; V_z – миттєва швидкість переміщення якоря вздовж осі прискорення z; i_1, i_2 – миттєві значення струмів у відповідних обмотках.

Систему рівнянь (5.28, 5.29) перетворимо у рівняння такого вигляду:

$$C_1 \cdot C_2 \cdot \left[M_{12}^2 - L_1 \cdot L_2\right]\frac{d^4 i_1}{dt^4} + C_1 \cdot C_2 \cdot \left[2M_{12} \cdot V_z \cdot \frac{dM_{12}}{dz} - L_1 \cdot R_2 - L_2 \cdot R_1\right]\frac{d^3 i_1}{dt^3} +$$

$$+\left[C_1 \cdot C_2 \cdot \left[V_z \cdot \frac{dM_{12}}{dz}\right]^2 - C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 - C_2 \cdot L_2 - C_1 \cdot L_1\right]\frac{d^2 i_1}{dt^2} -$$

$$-\left[C_2 R_2 + C_1 R_1\right]\frac{di_1}{dt} - i_1 = 0 \quad (5.30)$$

Одержимо характеристичне рівняння у вигляді

$$a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0, \quad (5.31)$$

де коефіцієнти дорівнюють

$$a_4 = C_1 \cdot C_2 \cdot \left[M_{12}^2 - L_1 \cdot L_2\right];\ a_3 = C_1 \cdot C_2 \cdot \left[2M_{12} \cdot V_z \cdot \frac{dM_{12}}{dz} - L_1 \cdot R_2 - L_2 \cdot R_1\right];$$

$$a_2 = C_1 \cdot C_2 \cdot \left[V_z \cdot \frac{dM_{12}}{dz}\right]^2 - C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 - C_2 \cdot L_2 - C_1 \cdot L_1;$$

$$a_1 = -C_2 R_2 - C_1 R_1;\ a_0 = -1.$$

Струми в ОІ і ОЯ розрахуємо за формулою

$$i(t) = B_1 e^{p_1 t} + B_2 e^{p_2 t} + B_3 e^{p_3 t} + B_4 e^{p_4 t}, \quad (5.32)$$

де p_1, p_2, p_3, p_4 – корені характеристичного рівняння (5.31); B_1, B_2, B_3, B_4 – сталі інтегрування, що визначаються з початкових умов.

Як початкові умови беремо:

$$i_1(t_0) = i_1(0), \quad (5.33)$$

$$i_2(t_0) = i_2(0), \quad (5.34)$$

$$u_{C_1}(t_0) = \frac{1}{C_1}\int_0^{t_0} i dt = u_{C_1}(0), \quad (5.35)$$

$$u_{C_2}(t_0) = \frac{1}{C_2}\int_0^{t_0} i dt = u_{C_2}(0). \quad (5.36)$$

Похідні струму в контурах на початку розрахункового кроку визначались із системи рівнянь (5.28, 5.29) шляхом її перетворення до вигляду:

$$\frac{di_1}{dt}(0) = \frac{-R_1 \cdot i_1(0) - u_{C_1}(0) + \frac{M_{12}}{L_2} \cdot \left(u_{C_2}(0) + V_z \frac{dM_{12}}{dz} \cdot i_1(0) + R_2 \cdot i_2(0) \right)}{L_1 - \frac{M_{12}^2}{L_2}} -$$

$$- \frac{V_z \frac{dM_{12}}{dz} \cdot i_2(0)}{L_1 - \frac{M_{12}^2}{L_2}} \quad (5.37)$$

$$\frac{di_2}{dt}(0) = \frac{-R_2 \cdot i_2(0) - u_{C2}(0) + \frac{M_{12}}{L_1} \cdot \left(u_{C_1}(0) + V_z \frac{dM_{12}}{dz} \cdot i_2(0) + R_1 \cdot i_1(0) \right)}{L_2 - \frac{M_{12}^2}{L_1}} -$$

$$- \frac{V_z \frac{dM_{12}}{dz} \cdot i_2(0)}{L_2 - \frac{M_{12}^2}{L_1}}, \quad (5.38)$$

де $u_C(0)$ – початкова напруга на ЄНЕ на поточному розрахунковому циклі; $i(0)$ –

початковий струм у контурі на поточному розрахунковому циклі; індекс “1” відповідає значенням ОІ; індекс “2” відповідає значенням ОЯ.

Коефіцієнти зв’язку між сталими інтегрування розраховувалися за виразом

$$d_k = \frac{-(L_1 C_1 p_k^2 + p_k C_1 R_1 + 1)}{M_{12} C_1 p_k^2 + V_z \frac{dM_{12}}{dz} C_1 p_k}. \tag{5.39}$$

Струми у контурах на новому розрахунковому кроці визначаться за такими виразами:

$$i_1(\Delta t) = B_1 e^{p_1 \Delta t} + B_2 e^{p_2 \Delta t} + B_3 e^{p_3 \Delta t} + B_4 e^{p_4 \Delta t}, \tag{5.40}$$

$$i_2(\Delta t) = d_1 B_1 e^{p_1 \Delta t} + d_2 B_2 e^{p_2 \Delta t} + d_3 B_3 e^{p_3 \Delta t} + d_4 B_4 e^{p_4 \Delta t} \tag{5.41}$$

Верифікація математичної моделі. Фізичне моделювання лінійного імпульсного електромеханічного прискорювача з різними типами електричних кіл якоря (короткозамкненого та з ємністю в колі якоря) здійснено на експериментальному стенді кафедри загальної електротехніки НТУ “ХПІ” (рис. 5.11), що описаний у роботі.

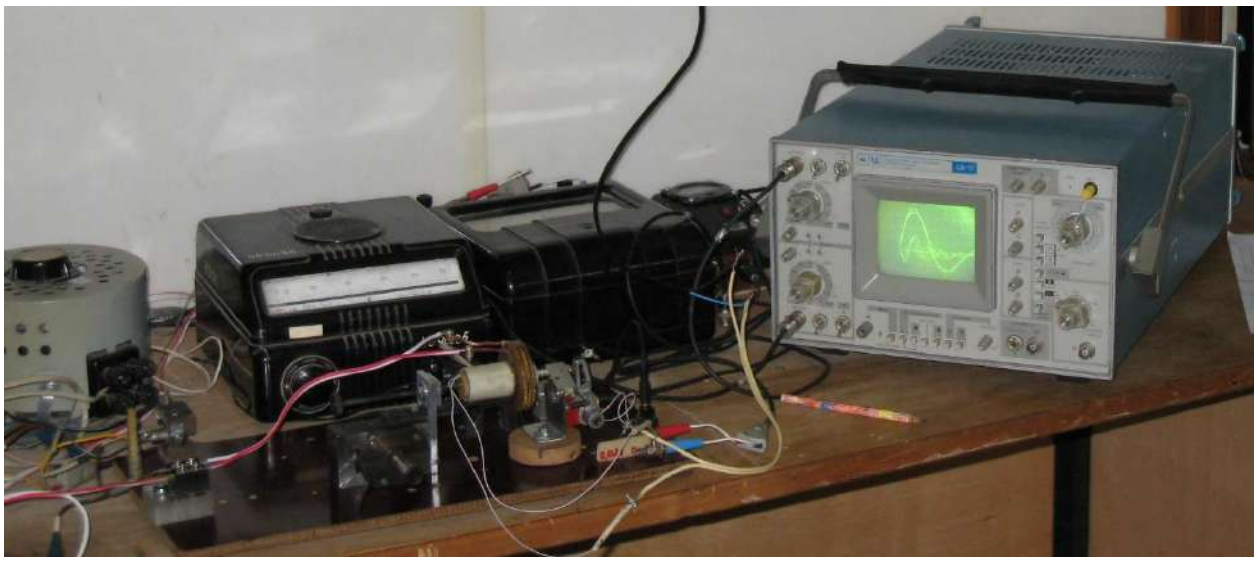


Рисунок 5.11 – Установка для фізичного моделювання ЛІЕП

Схема експериментальної моделі ЛІЕП представлена на рис. 5.12. ОІ була

виконана з мідного дроту перетином 2,9×1,3 мм^2 та товщиною лакової ізоляції 0,075 мм. Кількість витків у ОІ дорівнювала $w_{інд}$=30. Товщина котушки індуктора з мідним дротом дорівнювала $h_{інд}$=10 мм, зовнішній діаметр дорівнював $D_{інд}$=53 мм, внутрішній діаметр склав $d_{інд}$=21 мм. Індуктор жорстко кріпився до нерухомого циліндричного корпусу. Котушка ОЯ була вбудована у паз сталевого корпусу. ОЯ утворена мідним дротом з діаметром мідного дроту без ізоляції 0,53 мм та 0,6 мм з ізоляцією. Кількість витків ОЯ дорівнювала $w_{як}$=103. Намотування дроту в ОЯ здійснено у 4 шари. Товщина котушки якоря з мідним дротом дорівнювала $h_{як}$=18 мм, зовнішній діаметр – $D_{як}$=20 мм, внутрішній діаметр склав $d_{інд}$=14,8 мм. Технологічний проміжок, що утворювався між внутрішньою поверхнею індуктора і зовнішньою поверхнею якоря дорівнював 0,1÷0,12 мм.

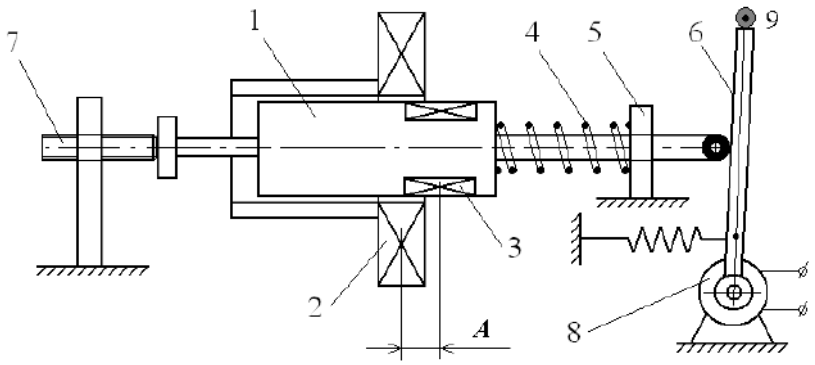


Рисунок 5.12 – Схема експериментальної моделі ЛІЕП: 1 – рухомий корпус якоря; 2 – ОІ, 3 – ОЯ; 4 – пружина; 5, 7 – упори; 6 – важіль; 8 – датчик переміщення; 9 – пристрій реєстрації

Кріплення пристрою реєстрації (графітовий олівець) на важелі дозволило збільшити здатність що визначення переміщення. Переміщення, що реєструвалося на папері, було збільшене порівняно з фактичним переміщенням якоря у 5 разів. Це дозволило збільшити точність визначеня переміщення якоря, особливо за малими величинами.

Керування прискорювачем реалізовано за допомогою електричної системи, представленій на рис. 5.13. Кероване ввімкнення ЛІЕП відбувається

подаванням сигналу від генератора імпульсів на керувальний електрод тиристора *VT*. Це призводить до відкривання симісторного переходу з розряджанням попередньо зарядженої ємності C_1 на ОІ, що зображена на схемі еквівалентною схемою заміщення у вигляді послідовних *RL*-елементів (R_1 та L_1). На електричній схемі ОЯ зображена еквівалентною схемою заміщення у вигляді послідовних *RL*-елементів (R_2 та L_2). Стенд передбачає можливість вбудовування ємності C_2 у коло ОЯ, тобто дослідження індукційного прискорювача із вбудованим ЄНЕ у якірному колі.

У зарядному колі вбудовувався обмежувальний резистор $R_{обм}$ з параметрами, що виключали суттєвий вплив на розряд ємності C_1. За опором $R_{обм}$=1 кОм та напругою заряджання до U_0=500 В зарядний струм не перевищував $i_{зар}$<0,5 А, що не менше, ніж на два порядки нижче, ніж розрядний струм у колі індуктора.

Дослідження напруги заряджання ємності C_1 здійснювалося за допомогою дзеркального кіловольтметра електростатичного типу С-50. Дослідження перехідних процесів у колах ОІ і ОЯ здійснювалося за допомогою вимірювальних низько-індуктивних шунтів $R_{ш1}$, $R_{ш2}$, які приєднувалися до двоканального запам'ятовувального осцилографа типу С8-17. Електричні ємності, що використовувались у дослідженнях, окремо вимірювалися за допомогою *RLC*-вимірювача типу Е7-22 на різних частотах 120 Гц та 1 кГц.

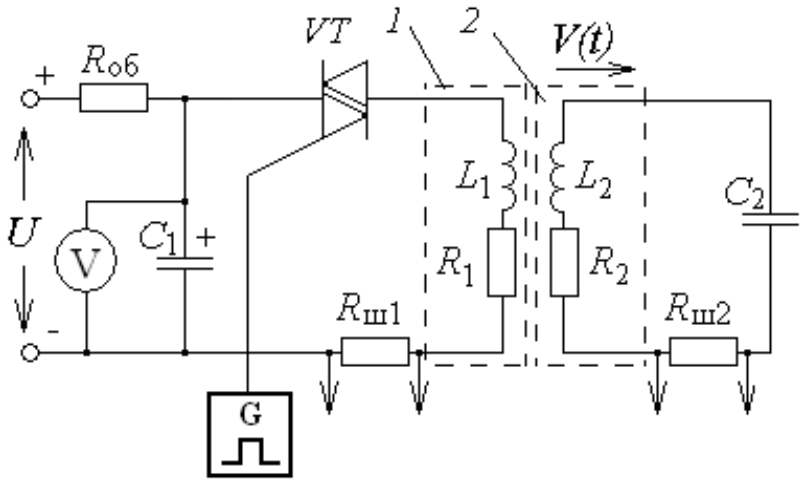


Рисунок 5.13 – Електрична схема фізичної установки ЛІЕП із вбудованою ємнісністю

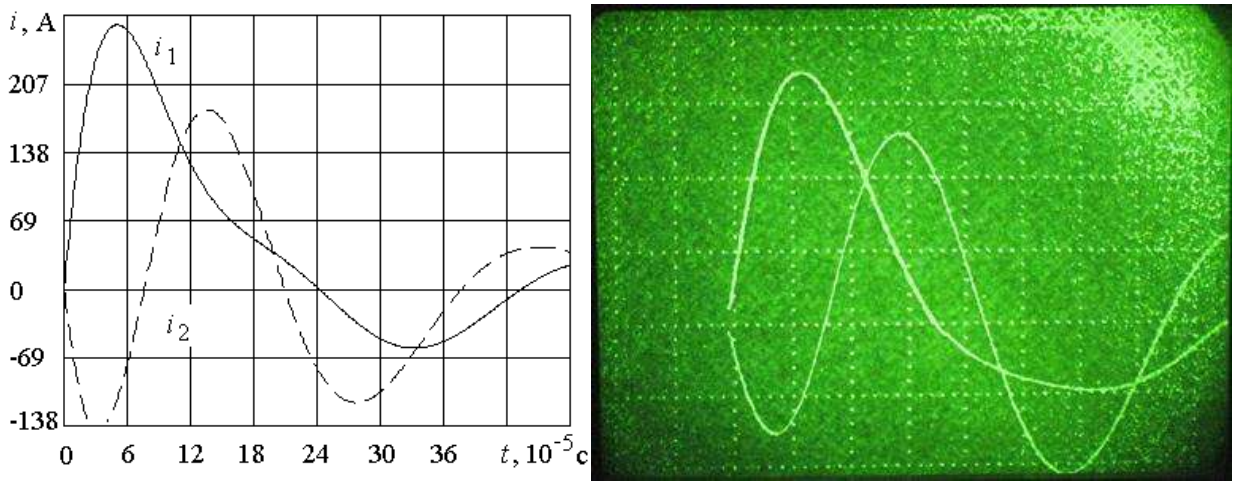
у якірному колі: *1* – ОІ; *2* – ОЯ

Переміщення якоря досліджувалося за допомогою реостатного датчика (типу СП-5 з дуже низьким моментом інерції і з високою температурною стабільністю) та самописця у вигляді важеля резистора з графітним стрижнем.

Порівняння результатів розрахунків з результатами вимірювань. У математичних моделях ЛІЕП, що описані раніше, визначення індуктивностей ОІ та ОЯ здійснюється за розрахунковими формулами, що наведені в довіднику. Тому було перевірено правильність уведення у модель формул шляхом порівняння значень індуктивностей якоря та індуктора, що одержані методом розрахунків, зі значеннями, що одержані в результаті вимірювання відповідними приладами. За результатами розрахунків індуктивність котушки індуктора дорівнювала L_1=27,48 мкГн, а якоря – L_2=107,1 мкГн. За результатами вимірювань на частоті 1 кГц індуктивність котушки індуктора склала L_1=25,95 мкГн, а якоря L_2=112,5 мкГн. Таким чином, відносне відхилення розрахункових результатів від результатів вимірювань не перевищувало 5 %, що підтвердило коректне введення у модель розрахункових формул. За результатами вимірювань, внутрішній опір індуктора дорівнював $R_{1вн}$ = 0,015 Ом, а котушки якоря – $R_{2вн}$ = 0,485 Ом.

В математичних моделях взаємна індуктивність визначається за формулами, що наведені у довіднику. Для цього утворювалися умови для вимкнення переміщення якоря відносно індуктора, тобто початкового зсуву геометричного центра ОЯ відносно геометричного центра ОІ (A=0). У наведеному варіанті розрахункових та експериментальних досліджень, де C_1=106 мкФ з напругою заряджання U_{10}=240 В, C_2=19,9 мкФ, одержаний задовільний збіг результатів (рис. 5.14). Розрахункові результати виведені за шкалою експериментальних досліджень з урахуванням різниці чутливості за аналами осцилографа та різниці у показниках вимірювальних шунтів, що мала співвідношення i_1/i_2 = 1/2,89. На основі задовільного збігу результатів можна вважати, що досягнуто вірне введення формул до розрахунку взаємної

індуктивності та правильно запрограмовано числовий алгоритм розрахунку перехідних електричних процесів. Незначне відхилення у результатах може бути викликано відхиленням параметрів реальних елементів електричних кіл від ідеальних.



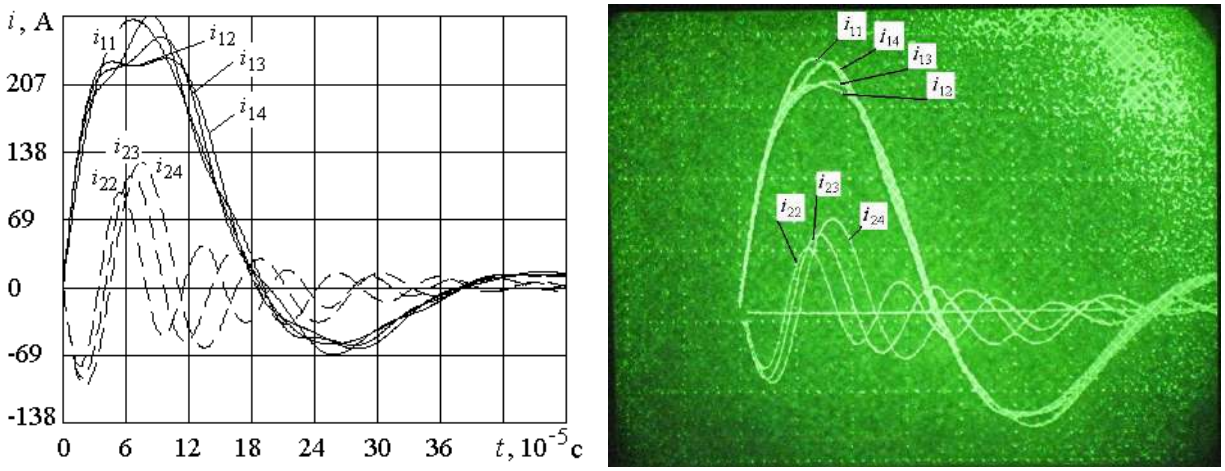
а б

Рисунок 5.14 – Розрахункові (а) та експериментальні (б) струми у колі ОІ i_1 та ОЯ i_2 ЛІЕП за умов: C_1=106 мкФ, C_2=19,9 мкФ, A=0 мм

Правельність математичних моделей також підтверджує задовільний збіг впливу результату ємності в колі якоря на перехідні процеси в електричних колах ЛІЕП. Так, зі збільшенням ємності в колі якоря з C_2=2 мкФ до C_2=4 мкФ відбувалося збільшення амплітуди розрядного струму в другому напівперіоді в колі якоря (рис. 5.15, б). Відповідна зміна результатів ємності у математичній моделі також приводила до подібного розрахункового результату (рис. 5.15, а). Результати отримані за умов, коли C_1=106 мкФ, U_{10}=240 В; A=0 мм. Другому значенню індексів струму відповідають такі випадки: *1* – коло якоря розімкнуте; *2* – C_2=2 мкФ; *3* – C_2=3 мкФ; *4* – C_2=4 мкФ.

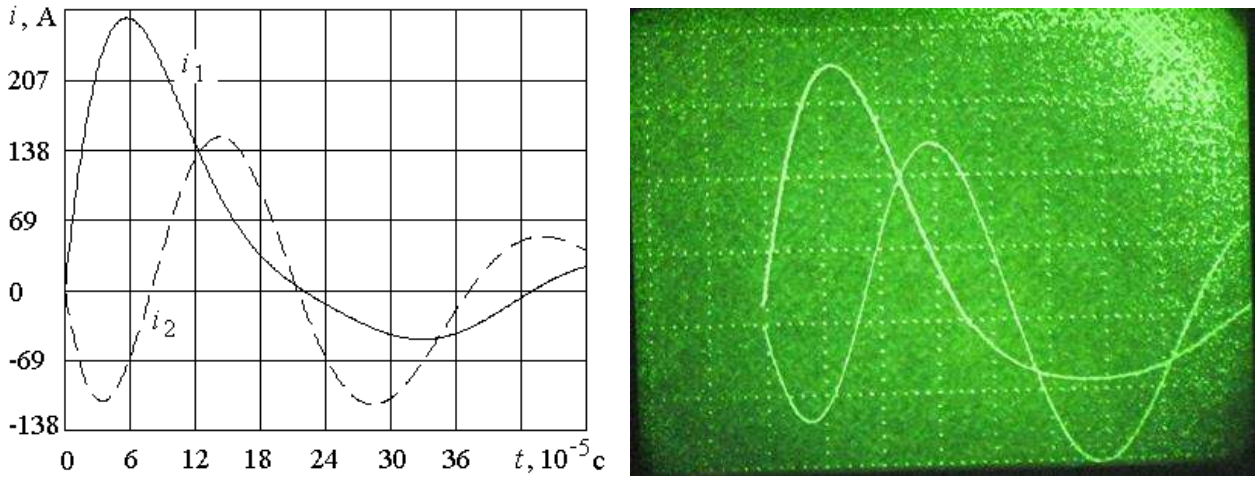
У разі встановлення початкового зсуву Δz геометричного центра котушки якоря відносно геометричного центра котушки індуктора вздовж осі прискорення на різні величини також досягався задовільний збіг розрахункових та експериментальних результатів (рис. 5.16, 5.17). Це також підтвердило

вірність розроблених математичних моделей ЛІЕП.



а б

Рисунок 5.15 – Розрахункові (а) та експериментальні (б) струми в колі ОІ i_1 та ОЯ i_2 ЛІЕП при різних ємностях C_2

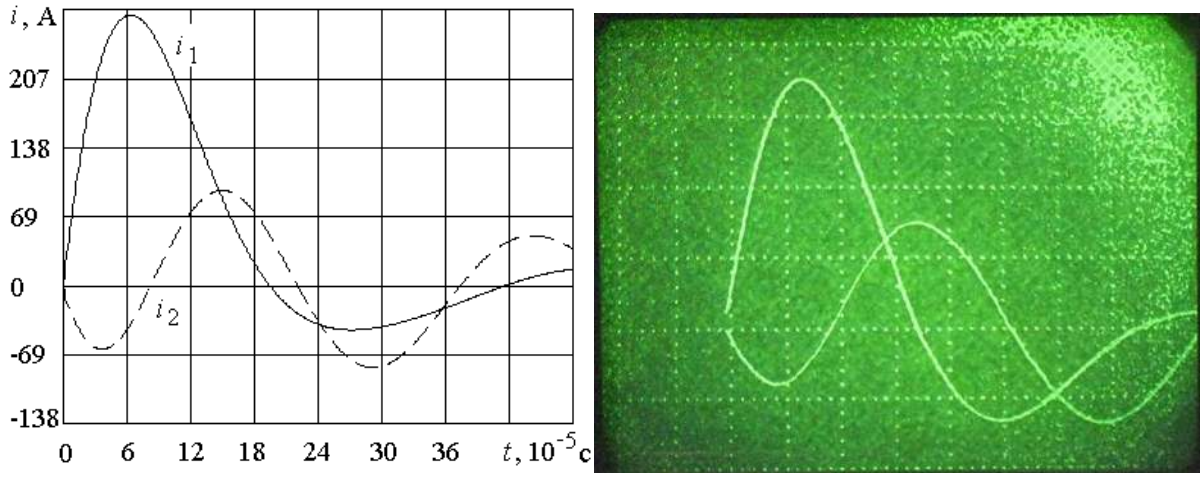


а б

Рисунок 5.16 – Розрахункові (а) та експериментальні (б) струми у колі ОІ i_1 та ОЯ i_2 ЛІЕП за умов: C_1=106 мкФ, U_{10}=240 В, C_2=19,9 мкФ, A=4,5 мм

Дослідження процесу прискорення якоря дозволило перевірити правильність розрахунків у математичних моделях сили, що діє на якір. При цьому, до складової сили входить визначення градієнта взаємної індуктивності, поточних значень струмів у колах якоря та індуктора й сили протидії. У стендових умовах сила протидії задавалась пружиною. Початкова сила

стиснення пружини на стенді дорівнювала F_{H0}=4 Н. Коефіцієнт жорсткості цієї пружини дорівнював $C_{пр}$=1,0 МН/м. Маса рухомої частини якоря складала $m_я$=44,3 г. Маса інших рухомих частин, що з'єднані з якорем, не перевищувала 5 % від маси якоря.



а б

Рисунок 5.17 – Розрахункові (а) та експериментальні (б) струми у колі ОІ i_1 та ОЯ i_2 ЛІЕП за умов: $C_1 = 106$ мкФ, $U_{10} = 240$ В, $C_2 = 19{,}9$ мкФ, $A = 13{,}5$ мм

Наведені раніше значення були введені у модель під час розрахунку переміщення якоря. Відповідно до зазначених умов, сила, що діє на якір, у разі нехтування силами тертя, розраховувалась за виразом

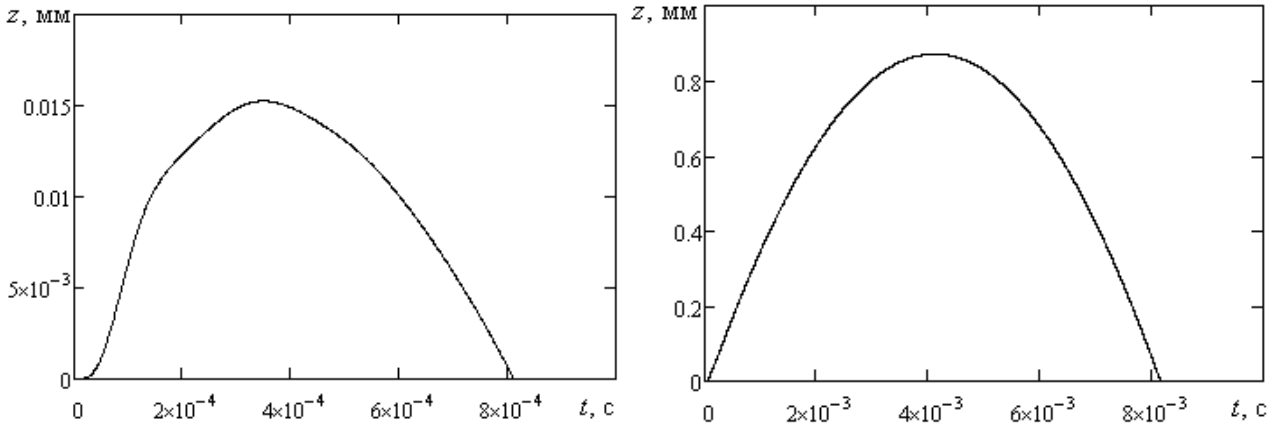
$$F_m = F_{ел} - F_{пр}, \tag{5.64}$$

де F_m – сила інерції; $F_{ел}$ – ЕДЗ, що створюються ЛІЕП; $F_{пр}$ – сила протидії, що створювала пружиною.

Після розкриття кожної зі складових виразу (5.64), рівняння набуває такого вигляду:

$$m_я \frac{dV}{dt} = i_1(t) \cdot i_2(t) \frac{dM_{12}(z)}{dz} - (F_{H0} + C_{пр} \cdot \Delta z). \tag{5.65}$$

Рівняння (5.65) було використано в математичних моделях під час порівняння результатів моделювання з результатами експериментальних досліджень. За ємністю в колі якоря до C_2<30 мкФ, напругою заряджання U_{10}<500 В і різними значеннями початкового зсуву $\Delta z=A$ значних переміщень якоря не спостерігалось. Відчувались лише слабкі вібрації. За розрахунковими кривими переміщення якоря з виконавчим елементом за цими значеннями також отримано незначне переміщення (рис. 5.18, а). Зі збільшенням напруги заряджання та показників ємності вдалося порівняти експериментальніх та розрахунковіх результати. Так, в розрахунковому варіанті за збільшеними параметрами отримано таку криву руху якоря (рис. 5.18, б). За результатами експериментальних досліджень амплітудне переміщення якоря за цими умовами склало z_{max} = 0,8 мм.



а *б*

Рисунок 5.18 – Розрахункове переміщення якоря ЛІЕП за умов: C_1=106 мкФ, A=4,5 мм при: U_{10}=500 В, C_2=30 мкФ (*а*) і U_{10} = 700 В, C_2 = 300 мкФ (*б*)

Вищенаведені результати грунтуються на порівнянні результатів експериментальних досліджень на фізичній моделі ЛІЕП та числових розрахунків за розробленими моделямі дають підстави стверджувати, що розроблені математичні моделі правильно відображають процес прискорення.

Розрахунок параметрів прискорювача з додатковою ємністю у колі ОЯ. В ЛІЕП, де якір не має початкової швидкості, або її величина незначна, у

разі ввімкнення конденсатора у коло якоря спостерігається зростання ККД на 5–7 %. На відміну від цих прискорювачів, у розрахункових варіантах зі зменшенням ємності конденсатора відбувається зменшення енергоефективності (рис. 5.19).

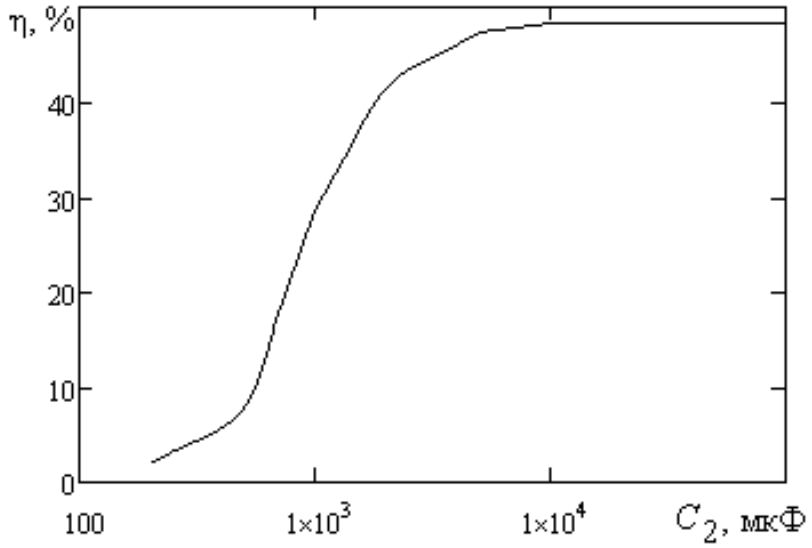


Рисунок 5.19 – Залежність ККД прискорювача від ємності конденсатора C_2

Дія ЕДЗ у часі залежно від наявності конденсатора C_2 набуває такого вигляду (рисунок 5.20).

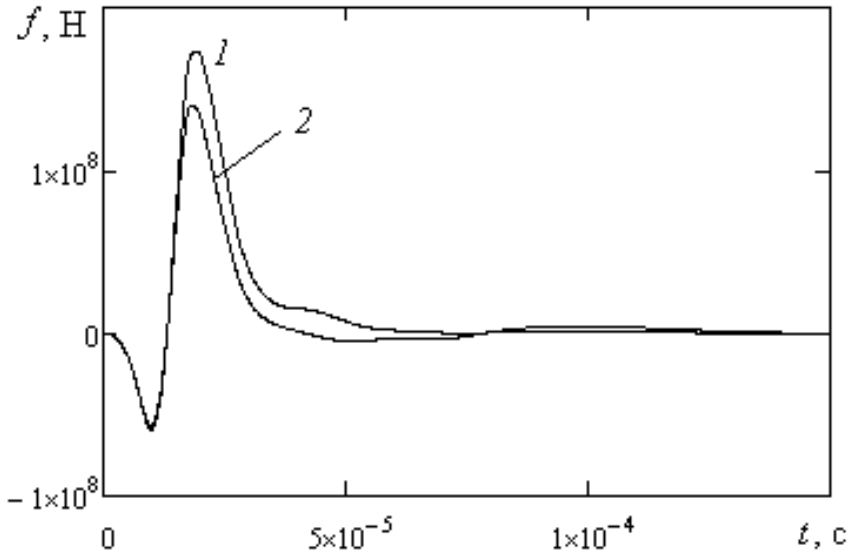


Рисунок 5.20 – Зміна ЕДЗ прискорення у часі: *1* – короткозамкнений якір; *2* – у коло якоря ввімкнений конденсатор C_2=1000 мкФ

На початку спрацювання прискорювача спостерігається співпадіння електродинамічної сили. Це пояснюється тим, що в початковий момент виникнення струму у конденсаторі його опір дорівнює нулю, тобто відповідає умовам його відсутності в колі якоря. Заряджання конденсатора призводить до обмеження струму в колі якоря, що у свою чергу спричиняє до зменшення електродинамічної сили. Слід зазначити, що найбільша енергоефективність прискорювача набуває максимальних значень за від'ємного зсуву. Тому електродинамічна сила початково має від'ємну складову. Це призводить до початкового зменшення швидкості ОЯ з ВЕ (рис. 5.21).

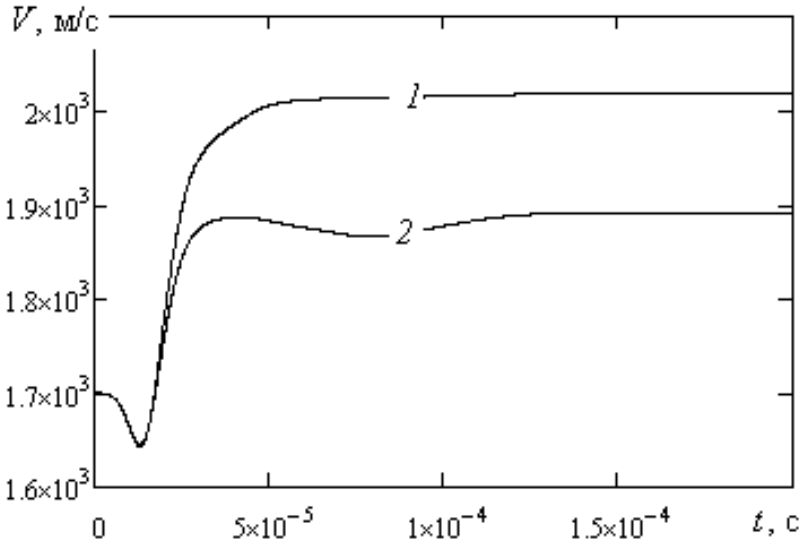


Рисунок 5.21 – Зміна швидкості руху ВЕ в часі: *1* – короткозамкнений якір; *2* – у коля якоря ввімкнений конденсатор C_2 = 1000 мкФ

Зі зменшенням ємності конденсатора C_2 відбувається зростання напруги, що виникає у колі якоря. Так, за ємністю C_2=5000 мкФ у розрахунковому варіанті амплітудне значення напруги досягає $u_{c2(\max)}$=15 кВ (рис. 5.22). Електрична енергія, що накопичується у конденсаторі C_2 у другому напівперіоді не випростовується для процеса прискорення, а розсіюється у тепло. Це викликано тим, що якір за час першого напівперіоду виходить з області високого магнітного зв'язку між обмотками.

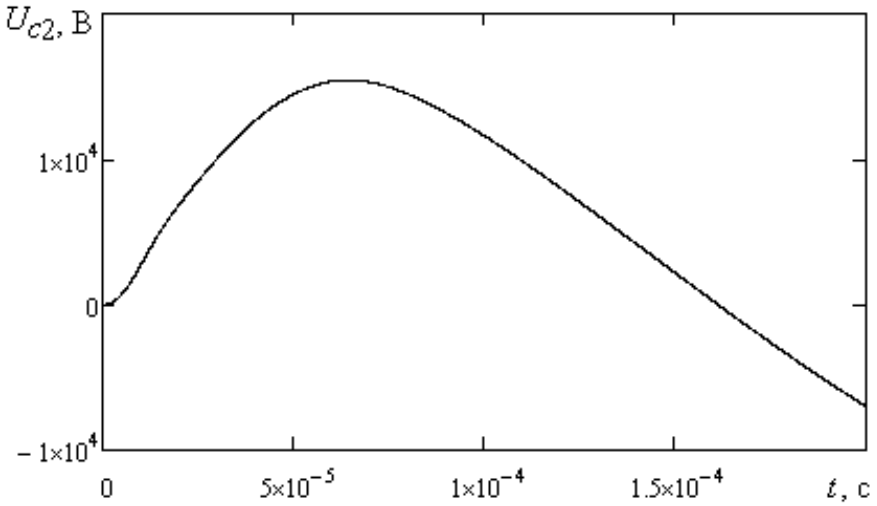


Рисунок 5.22 – Напруга на конденсаторі C_2

5.3 Лінійний імпульсний електромеханічний прискорювач з вибухомагнітним генератором

Розглянемо лінійний імпульсний електромеханічний прискорювач з вибухомагнітним генератором (ВМГ). При ввімкненні спірального ВМГ схема ЛІЕП має вигляд, представлений на рис. 5.23.

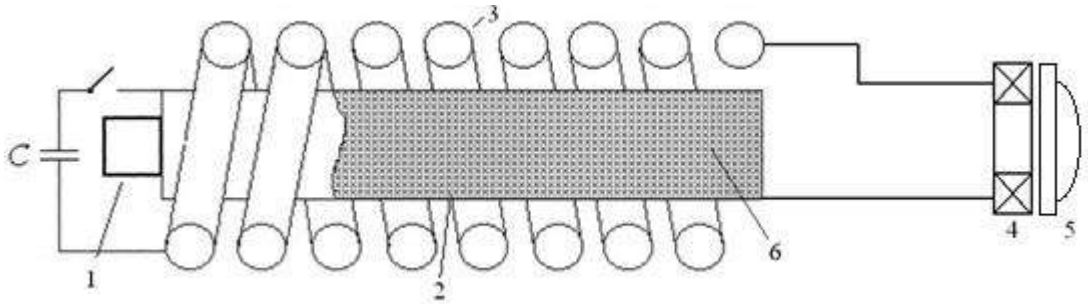


Рисунок 5.23 – Схема ЛІЕП з ВМГ: *1* – детонатор, *2* – мідна оболонка, *3* – мідна циліндрична спіраль (котушка), *4* – ОІ, *5* – ОЯ, *6* – вибухова речовина

Еквівалентна електрична схема ЛІЕП з ВМГ представлена на рис. 5.24. Елементи $L_{\text{ВМГ}}$ і $R_{\text{ВМГ}}$ відображають процеси у ВМГ, що пов’язані зі зменшенням індуктивності та активного опору в процесі роботи. Елементи L_1 та R_2 відображають індуктивність та опір ОІ, яку коаксіально розміщують на

виході з розгонного каналу. Елементи L_2 і R_1 відповідають індуктивності та активному опору короткозамкненої ОЯ. Між елементами L_1 та L_2 виникає взаємна індуктивність M_{12}, яка змінюється під час переміщення якоря вздовж осі руху та залежить від зсуву z центрів симетрії ОІ та ОЯ. ВМГ забезпечує посилення електричної енергії, тобто потребує наявності струму в початковий момент часу $i(0) = i_{10}$.

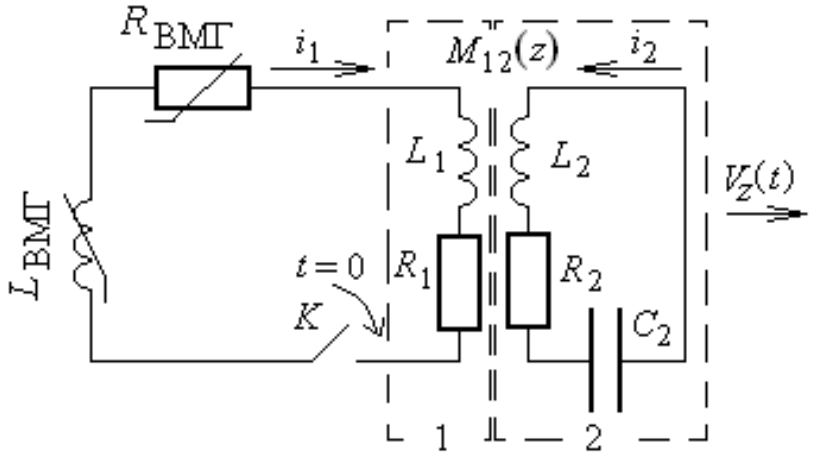


Рисунок 5.24 – Еквівалентна схема ЛІЕП з ВМГ

Перехідний процес у електричному колі ЛІЕП з ВМГ описується системою рівнянь:

$$\left(R_{ВМГ}(t)+R_1\right)\cdot i_1+\left(L_{ВМГ}(t)+L_1\right)\cdot\frac{di_1}{dt}+i_1\frac{d\left(L_{ВМГ}(t)\right)}{dt}+M_{12}\cdot\frac{di_2}{dt}+$$

$$+V_z\cdot i_2\cdot\frac{dM_{12}}{dz}=0, \qquad (5.42)$$

$$R_2\cdot i_2+L_2\cdot\frac{di_2}{dt}+M_{21}\cdot\frac{di_1}{dt}+V_z\cdot i_1\cdot\frac{dM_{21}}{dz}=0, \qquad (5.43)$$

де i_1 – миттєве значення струму в ОІ; i_2 – миттєве значення струму в ОЯ; V_z – миттєва швидкість руху якоря; взаємна індуктивність між ОІ і ОЯ $M_{12} = M_{21}$.

Швидкість якоря визначається з рівняння:

$$m\frac{dV}{dt}=i_1(t)\cdot i_2(t)\frac{dM_{12}}{dz}-F, \qquad (5.44)$$

де m – маса якоря з ВЕ; F – сумарна сила опору руху ВЕ.

Алгоритм числового розв'язання системи рівнянь (5.42) – (5.44) полягає у розрахунку зміни струму у контурах на розрахунковому кроці, що одержується в результаті розв'язання системи рівнянь (5.42, 5.43) за замороженими коефіцієнтами V, $L_{\text{ВМГ}}$, $R_{\text{ВМГ}}$, M_{12}, dM/dz, $dL_{\text{ВМГ}}/dt$. Далі, за рівняннями (5.44) визначається переміщення якоря відносно індуктора та розраховується поточна швидкість V та поточна величина переміщення z. За розрахованим значенням z перераховується значення M_{12} і dM/dz, що застосовуються на наступному розрахунковому кроці у системі рівнянь (5.42, 5.43). Також перераховуються поточні значення $L_{\text{ВМГ}}$, $R_{\text{ВМГ}}$, $dL_{\text{ВМГ}}/dt$, які змінюються у часі на протязі розрахункового кроку, та відповідні значення підставляються у рівняння (5.42, 5.43). Розрахунковий цикл замикається. Розрахунковий крок за часом вибирається таким чином, щоб протягом цього кроку зміна в заморожених значеннях відбувалась не більш ніж на 0,1 %.

Перетворімо систему рівнянь (5.42, 5.43) шляхом заміни похідних струму за часом на "p":

$$\left[\left(\left(R_{BMГ}(t)+R_1\right)+\frac{d\left(L_{BMГ}(t)\right)}{dt}\right)+\left(L_{BMГ}(t)+L_1\right)p\right]i_1+$$

$$+\left[M_{12}\cdot p+V\cdot\frac{dM_{12}}{dz}\right]i_2=0 \qquad (5.46)$$

$$\left[M_{21}\cdot p+V\cdot\frac{dM_{21}}{dz}\right]\cdot i_1+\left[R_2+L_2\cdot p\right]i_2=0\,. \qquad (5.47)$$

Для системи рівнянь (5.46) – (5.47) визначник системи дорівнює:

$$\Delta p=\begin{vmatrix}\left[\left(\left(R_{BMГ}(t)+R_1\right)+\frac{d\left(L_{BMГ}(t)\right)}{dt}\right)+\left(L_{BMГ}(t)+L_1\right)p\right]i_1 & \left[M_{12}\cdot p+V\cdot\frac{dM_{12}}{dz}\right]i_2\\ \left[M_{21}\cdot p+V\cdot\frac{dM_{21}}{dz}\right]\cdot i_1 & \left[R_2+L_2\cdot p\right]i_2\end{vmatrix} \qquad (5.48)$$

Звідси характеристичне рівняння набуває вигляду:

$$\left[V^2 \cdot \left(\frac{dM}{dz}\right)^2 - \left(\left(R_{ВМГ}(t) + R_1\right) + \frac{d\left(L_{ВМГ}(t)\right)}{dt}\right) \cdot R_2\right] +$$
$$+\left[2V \cdot M \frac{dM}{dz} - \left(\left(R_{ВМГ}(t) + R_1\right) + \frac{d\left(L_{ВМГ}(t)\right)}{dt}\right) \cdot L_2 - \left(L_{ВМГ}(t) + L_1\right) \cdot R_2\right] p +$$
$$+\left[M^2 - \left(L_{ВМГ}(t) + L_1\right) \cdot L_2\right] \cdot p^2 = 0. \qquad (5.49)$$

Корні характеристичного рівняння обчислюється розв'язанням квадратного рівняння. Постійні інтегрування B_1, B_2 обчислюється за умовами попереднього розрахункового кроку (відомими i_1 та di_1/dt) методом розрахунку системи рівнянь:

$$B_1 + B_2 = i_1, \qquad (5.50)$$

$$p_1 B_1 + p_2 B_2 = \frac{di_1}{dt}, \qquad (5.51)$$

де p_1 і p_2 – корені характеристичного рівняння (5.49).

Коефіцієнт зв'язку між постійними інтегрування в контурах ОІ і ОЯ визначається з рівняння (5.47) у такий спосіб:

$$d_k = \frac{-\left[M_{21} \cdot p_k + V \cdot \frac{dM_{21}}{dz}\right]}{\left[R_2 + L_2 \cdot p_k\right]}. \qquad (5.52)$$

Похідна за струмом на попередньому розрахунковому кроці di_1/dt, що використовується в рівнянні (5.51), визначається з рівняння (5.42) за такою формулою:

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{-\left(\left(R_{ВМГ}(t)+R_1\right)+\dfrac{d\left(L_{ВМГ}(t)\right)}{dt}\right)\cdot i_1 - V\cdot i_2\cdot\dfrac{dM_{12}}{dz}+\dfrac{M_{12}}{L_2}\cdot V\cdot i_1\cdot\dfrac{dM_{21}}{dz}}{\left(L_{ВМГ}(t)+L_1\right)-\dfrac{{M_{12}}^2}{L_2}}+$$

$$+\frac{\dfrac{M_{12}}{L_2}R_2\cdot i_2}{\left(L_{ВМГ}(t)+L_1\right)-\dfrac{{M_{12}}^2}{L_2}}. \qquad (5.53)$$

Миттєві значення струмів у контурах на розрахунковому кроці визначались за такими рівняннями:

$$i_1(\Delta t) = B_1 e^{p_1\Delta t} + B_2 e^{p_2\Delta t}, \qquad (5.54)$$

$$i_2(\Delta t) = d_1 B_1 e^{p_1\Delta t} + d_2 B_2 e^{p_2\Delta t}. \qquad (5.55)$$

Окремо розглянемо залежність індуктивності ВМГ від часу. У першому наближенні швидкість скорочення кількості витків $w_{ВМГ}$ котушки ВМГ та її ширини $h_{ВМГ}$ задається швидкістю детонації $V_{дет}$, яка є постійною величиною для заданого типу вибухової речовини. Наприклад, у гексогені $V_{дет}$ = 6500 м/с. Звідси виходить, що зменшення ширини котушки ВМГ та її кількості витків можливо подати у вигляді залежностей

$$h_{ВМГ}(t) = h_{ВМГ}(0) - V_{дет}t, \qquad (5.56)$$

$$w_{ВМГ}(t) = w_{ВМГ}(0)\frac{h_{ВМГ}(t)}{h_{ВМГ}(0)}, \qquad (5.57)$$

де $h_{ВМГ}(0)$ – ширина котушки ВМГ у початковий момент часу; $w_{ВМГ}(0)$ – кількість витків котушки ВМГ у початковий момент часу.

Індуктивність котушки прямокутного перетину розраховують за залежністю

$$L = \frac{\pi}{4}\mu_0 w^2 \frac{d^2}{h} k_a, \qquad (5.58)$$

де μ_0 – магнітна постійна; w – кількість витків; d – середній діаметр котушки; h – ширина котушки; k_a – коефіцієнт поправки.

З залежності (5.58) можливо припустити, що за лінійною зміною h і w індуктивність L буде змінюватися нелінійно із-за квадратичної залежності від w. Але входження коефіцієнта k_a, який залежить від геометричних розмірів котушки, зумовлює у розрахунках практично лінійну залежність зміні індуктивності від часу за умови зміни параметрів ВМГ за виразами (5.56), (5.57) та шириною котушки індуктора до h<0,5 м. На рис. 5.25 наведено результати розрахунку змінення індуктивності за фіксованими зовнішнім d_1=0,1 м і внутрішнім d_2=0,08 м діаметрами котушки, змінною шириною та кількістю витків за лінійною залежністю у часі. У наведених розрахунках $h(0)$=0,5 м, $w(0)$=200.

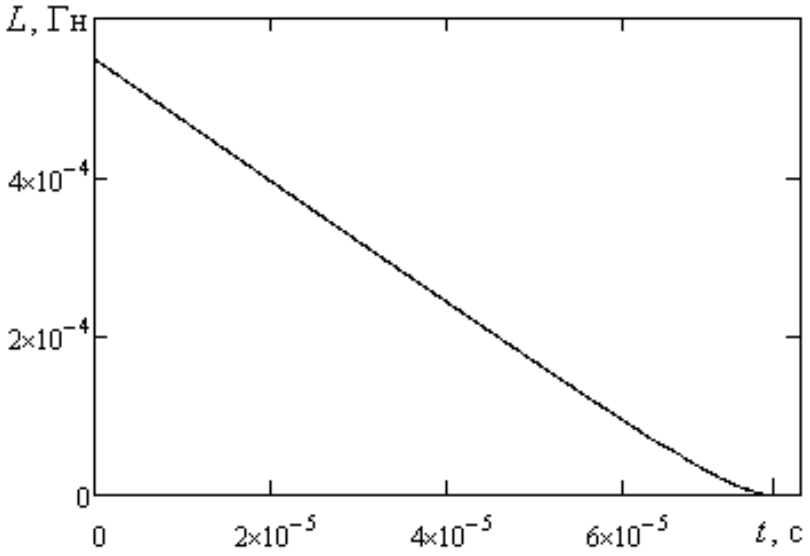


Рисунок 5.25 – Змінення індуктивності ВМГ за лінійною зміною ширини та кількості витків

Як видно з рис. 5.25 змінення індуктивності відбувається практично лінійно, тому виникла необхідність увести залежність індуктивності ВМГ у часі

у вигляді

$$L_{BMГ}(t) = L_{BMГ}(0) - K \cdot t, \tag{5.59}$$

де $L_{BMГ}(0)$ – індуктивність котушки ВМГ у початковий момент часу; K – коефіцієнт швидкості спрацювання ВМГ.

Змінення величини K у ВМГ за постійної швидкості детонації досягається зміною шагу витків. Таким чином, потребує дослідження впливу індуктивності на початку процесу $L_{BMГ}(0)$ котушки ВМГ та коефіцієнта K швидкості спрацювання ВМГ на коефіцієнт посилення енергії під час додаткового прискорення якоря з виконавчим елементом в індукційному прискорювачі коаксіального типу. У даному випадку під коефіцієнтом α посилення енергії розуміється співвідношення приросту кінетичної енергії рухомих мас (за рахунок енергії ВМГ та електричної енергії) до повних витрат електричної енергії.

Розрахунок параметрів прискорювача з ВМГ. Розглянемо вплив параметрів ВМГ на ефективність додаткового прискорення якоря в ЛІЕП. Кількість витків котушок та їх геометричні розміри (окрім перелічених вище), початковий струм у колі індуктора, початковий зсув, активний опір та залежності індуктивності та активного опору у ВМГ від часу задавалися як параметри. Критерієм розв’язання, за яким підбирались змінні параметри, було досягнення швидкості V=2000 м/с. Оцінювання ефективності здійснювалось за коефіцієнтом посилення енергії у ВМГ.

У розрахунковому варіанті за зовнішнім діаметром ОІ $D_{зовн}$=0,15 м, шириною ОІ $h_{інд}$=0,09 м, внутрішнім діаметром ОЯ $d_{вн}$=0,123 м, шириною ОЯ $h_{як}$=0,04 м маєм такі залежності взаємної індуктивності та градієнта взаємної індуктивності від зсуву центрів симетрії ОІ і ОЯ (рис. 5.26, 5.27). Якщо індуктор та якір зазначених параметрів мають по одному витку, то розрахункова індуктивність індуктора дорівала $L_{інд}$ = 111 нГн, а якоря – $L_{як}$ = 51,7 нГн.

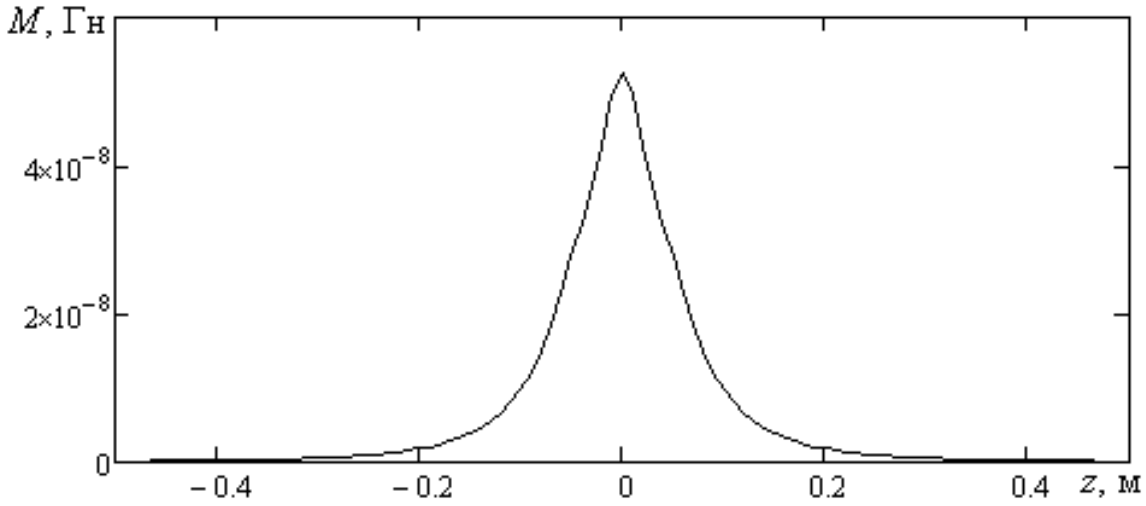


Рисунок 5.26 – Залежність взаємної індуктивності M від зсуву z центрів симетрії ОІ та ОЯ

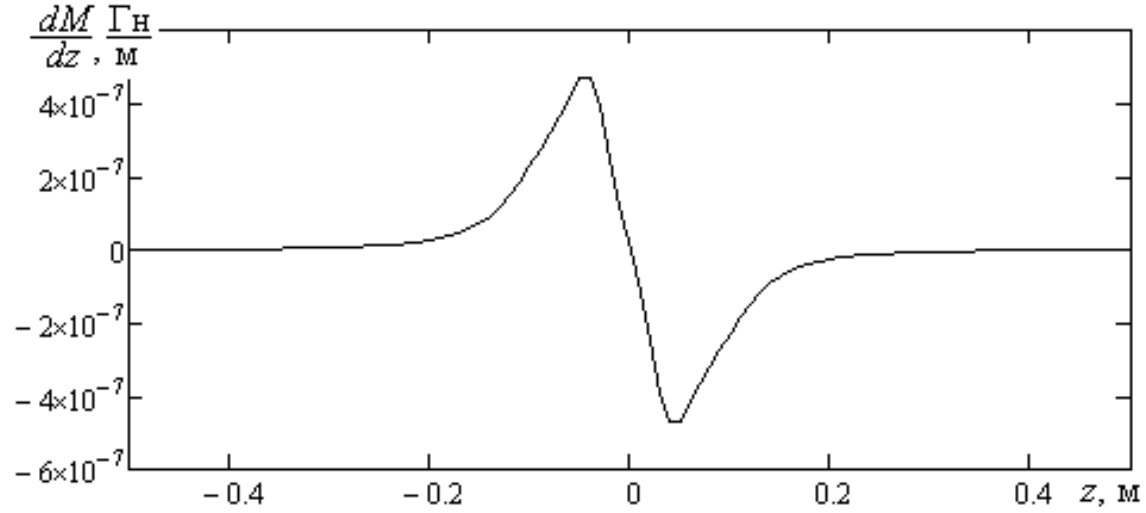


Рисунок 5.27 – Залежність градієнта взаємної індуктивності M від зсуву z центрів симетрії ОІ і ОЯ

За умови узгодження часу зростання струму у ВМГ з поточним положенням якоря відбувається зростання струму в контурі якоря (рис. 5.28). У наданому розрахунковому випадку, де $L_{BMI}(0)$=4 мкГн, K=0,005, R_1=R_2=0,1 мОм, z_0=–1,34 м, повна початкова електрична енергія склала W_0≈1 МДж. У розрахунковому випадку збільшення кінетичної енергії рухомих мас в результаті зростання швидкості якоря з 1700 м/с до 2000 м/с відбулося на $\Delta W_к$=3,33 МДж. Коефіцієнт посилення енергії склав α=$\Delta W_к$/W_0=3,33.

Залежність ЕДЗ f, що діють на якір у розрахунковому випадку, від зсуву z

показує, що сила прискорення виникла після перетинання, якорем нульового положення спільного центра симетрії ОІ і ОЯ а також та за умови зростання струму в області максимуму градієнта взаємної індуктивності (рис. 5.29).

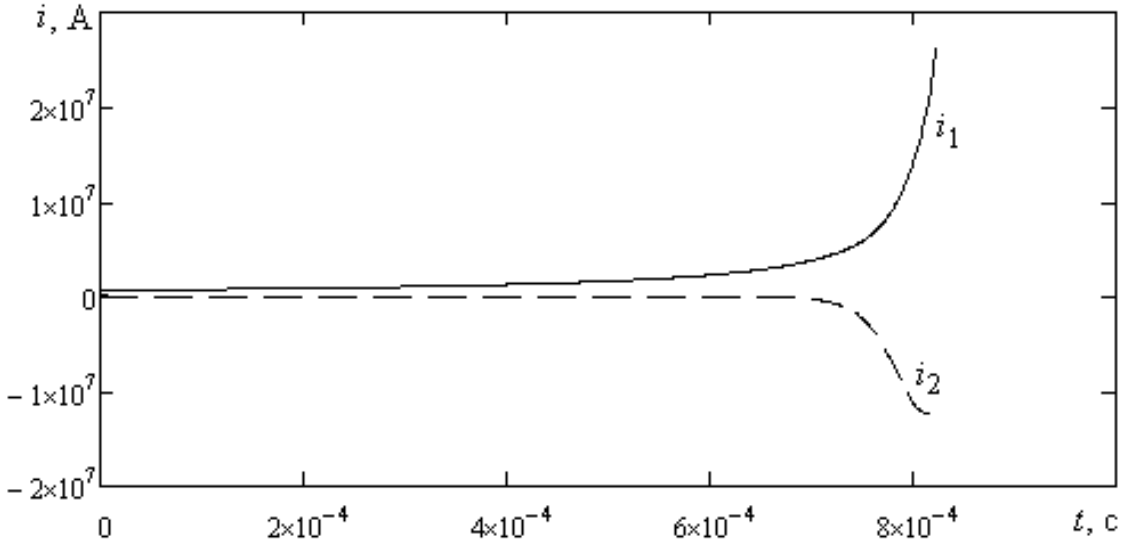


Рисунок 5.28 – Розрахунковий струм у колі ОІ та ОЯ

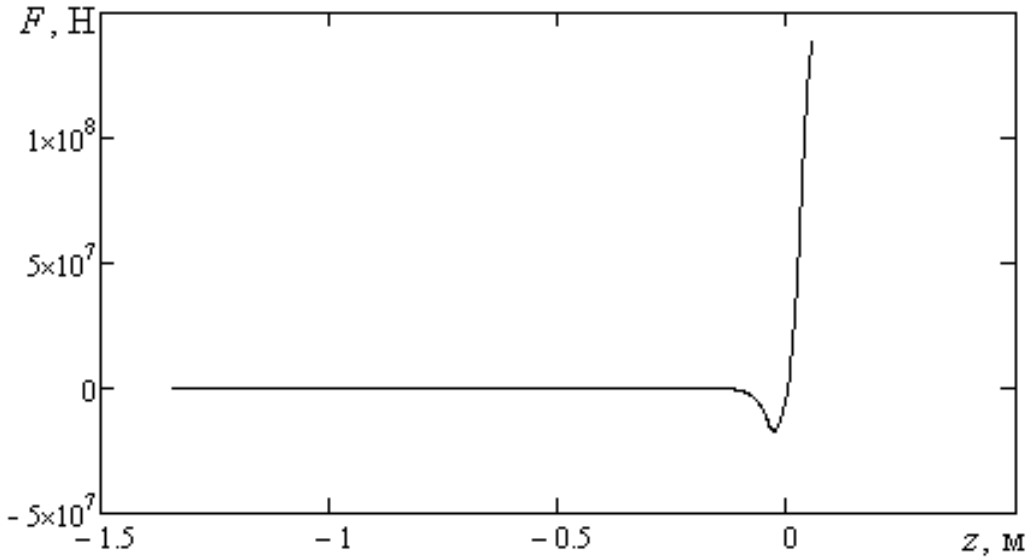


Рисунок 5.29 – Залежність сили *F*, що діє на ОЯ, від зсуву *z*

Крива руху якоря під дією ЕДЗ в розрахунковому випадку має такий вигляд (рисунок 5.30): спочатку на якір діє сила гальмування, а потім сила прискорення.

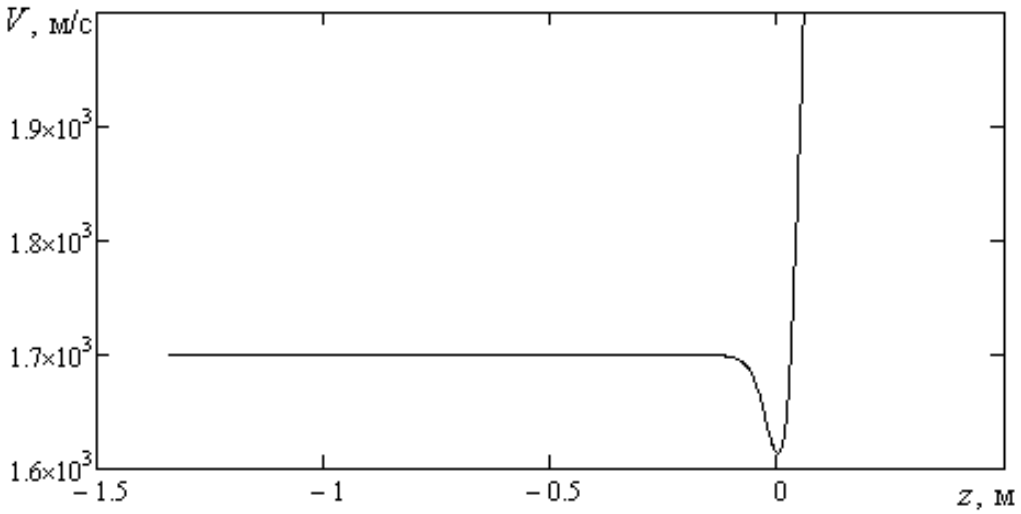


Рисунок 5.30 – Залежність швидкості руху якоря від зсуву *z*

За результатами аналізу впливу коефіцієнта *K* швидкості спрацювання ВМГ на коефіцієнт посилення енергії під час додаткового прискорення якоря в ЛІЕП за однакових розрахункових параметрів (окрім начального зсуву, який оптимізувався) встановлено, що існує область значень коефіцієнта *K*, за якими коефіцієнт посилення енергії набуває максимуму (таблиця 5.3). В розрахункових варіантах це значення склало *K*=0,005. Зі зростанням початкової індуктивності $L_{ВМГ}(0)$ котушки ВМГ відбувається зростання коефіцієнта посилення енергії.

Таблиця 5.3 – Залежність коефіцієнта α посилення енергії від коефіцієнта *K* швидкості спрацювання ВМГ та початкової індуктивності $L_{ВМГ}(0)$

		Коефіцієнт *K* швидкості спрацювання ВМГ			
		0,05	0,01	0,005	0,001
$L_{ВМГ}(0)$, мкГн	1	0,23	0,75	0,96	0,6
	2	0,45	1,42	1,79	1,03
	4	0,9	2,8	3,33	2,0

У результаті аналізу результатів моделювання визначено, що існує область значень коефіцієнта швидкості спрацювання ВМГ, за якими коефіцієнт посилення енергії набуває максимуму. Встановлено, що за умови зростання початкової індуктивності котушки ВМГ відбувається зростання коефіцієнта

посилення енергії. Для прискорювача доцільно створення ВМГ з коефіцієнтом швидкості спрацювання 0,005.

Здійснімо розрахунок енергії заряду ВМГ до прискорювача. Вважаємо ККД ВМГ η=20 %. За умови корисної витрати на прискорення енергії, що дорівнював 3,3 МДж, маєм потрібну повну енергію 16,5 МДж. Питома теплота вибухового перетворення тротилу складає 4,2 МДж/кг. Таким чином, на прискорення якоря з виконавчим елементом необхідно витратити близько 4 кг тротилу. За щільністю заряду 1,52 кг/м^3 об'єм тротилового заряду складав не більше 2,7 л. Це робить джерело імпульсної енергії розряду дуже компактним.

5.4 Лінійний імпульсний прискорювач плазмового згустку

Плазмові установки використовують у різних сферах для вирішення як наукових так і прикладних задач. Для переведення речовини у плазмовий стан та підтримання перебування речовини у цьому стані за атмосферних умов потрібно відповідне джерело енергії. Це зумовлено високою активністю плазми, що призводить до швидкого перетворення внутрішньої енергії плазмового формування у інші види енергії. Час існування плазми без підведення до неї енергії визначається співвідношенням швидкостей процесів рекомбінації заряджених часток до процесів іонізації. У атмосферному середовищі, як правило, цей час складає від декількох мікросекунд до декількох мілісекунд в залежності від розмірів та стану газоплазмового середовища. Короткий час автономного існування обмежує практичні сфери використання плазмових установок, що призначені для метання плазмового згустку в атмосферному середовищі.

Роботи щодо створенню та прискоренню стійких плазмових формувань ведуться в Принстонській лабораторії фізики плазми, Лос Аламовській національній лабораторії, університеті Нью Хемфшера, Сварзморскій лабораторії магнітодинаміки.

В університеті штату Міссурі, США, розроблено метод створення і метання плазмового згустку у відкритому атмосферному середовищі. В плазмовому формуванні утворюється власне магнітне поле утримування, що забезпечує подовжене існування такого формування. У розробленій установці при тривалості існування плазмового формування декількох мілісекунд забезпечується його переміщення в атмосферному середовищі на відстань 0,5-0,6 м. Для створення плазми використовується енергія первинного розрядного кола, а подальше прискорення газоплазмового згустку здійснюється за допомогою енергії вторинного кола. Плазма утворюється в результаті вибуху провідника.

Первинне коло складалося з конденсатора ємністю 11 мкФ, який заряджався до напруги 30 кВ. Розряд здійснювався на два мідні проводи, що покриті сріблом, типу AWG. Тривалість розрядного імпульсу склала 200 мкс при струмі 4 кА. Внутрішній діаметр розрядної порожнини дорівнював 1,25 см. Діелектрична втулка з полікарбонату мала товщину 10 см. Вторинне коло складалося з конденсатора ємністю 8,8 мкФ, який заряджався до напруги 250 В. У цьому колі виникав розряд зі струмом 400 А на протязі 4 мс. Друга порожнина мала внутрішній діаметр 3 см. Визначено, що густина плазми сягає 10^{16}–10^{17} $см^{-3}$. Швидкість плазмового згустку сягає 200 м/с.

За рахунок первинного розряду здійснюється формування термічної плазми у порожнині, та під дією тиску відбувається рух газоплазмового середовища через загальний сітчастий електрод. Подальший рух цього середовища супроводжується розрядним струмом вторинного кола. Виходячи з принципу роботи цього пристрою можливо стверджувати, що даний пристрій забезпечує створення термічної плазми у форкамері, вихід плазми з форкамери забезпечується газодинамічними, а не електродинамічними процесами. При цьому, формування області випромінювання у вигляді кільця відбувається за рахунок газодинамічного процесу турбулізації газоплазмового струменя. Тобто, задачу створення власного магнітного поля у плазмовому формуванні даний пристрій не вирішує.

Для створення умов стійкості плазмового згустку за рахунок енергії магнітного поля передбачається переривання повернення енергії магнітного поля у електричну енергію заряду ЄНЕ. Умову створення плазмового згустку з подовженим часом існування було пов'язано з умовою перевищення магнітного тиску над газодинамічним у вигляді :

$$B_{\max}^2 \succ\succ 2\mu_0 p,$$

де $B_{\max}$ – амплітудне значення індукції магнітного поля у плазмовому згустку; μ_0 – магнітна стала; p – тиск газу.

В результаті було досягнуто формування плазмового згустку з часом існування 3 с. Така плазма отримана в результаті розряду батареї конденсаторів ємністю 6,4 мФ, яка заряджалась до напруги 2,5 кВ. Для комутації вибуху об'ємного витка застосовувались тиристори Т173-1250-30 з паралельним підключенням, які забезпечили імпульсний струм понад 30 кА. Зазначені параметри розрядного кола дають підстави вважати, що час існування плазми співпадає з тривалістю розряду. Це свідчить про відсутність намагнічування плазми, за якої можливе її існування без зовнішнього підводу енергії.

Розглянемо лінійний імпульсний прискорювач плазмового згустку в атмосферному середовищі. Процес прискорення плазмового формування умовно можна розбити на три етапи: формування сильно іонізованого газоплазмового середовища у вигляді кільця шляхом електричного вибуху провідника в формі кільця; індукування вихрового струму у газоплазмовому середовищі;переривання магнітного зв'язку між індуктором та плазмовим формуванням в момент накопичення енергії магнітного поля у плазмі.

Основна задача поягає у створенні плазмового формування у вигляді кільця, в якому плазма перебуває у сильно іонізованому стані за атмосферним тиском. Ця задача виникає у зв'язку з високою напруженістю електричного поля, за якої досягається пробиття атмосферного середовища. За атмосферним тиском ця напруженість складає $E \approx 30$ кВ/см. Тобто, для індукування електричного поля у слабоінізованому атмосферному середовищі за допомогою одновиткової котушки діаметром 0,1 м до неї потрібно підвести напругу біля

10 МВ, що є технічно проблематичним у компактних системах.

Пропонується утворення плазмового формування за рахунок термічної іонізації. Така область формується в результаті електричного вибуху провідника у вигляді кільця, де час формування визначається часом вибуху проводів та складає від декількох мікросекунд до сотні мікросекунд в залежності від діаметру проводів.

Фотографічна фіксація виникнення плазмового формування у формі кільця в результаті вибуху провідника проведена шляхом отримання статичного зображення продуктів вибуху. Для виключення впливу крайових ефектів на створення замкнутого струмопровідного кільця в місцях з'єднання електричних проводів 1 з провідотримачами 2, проводи з провідотримачів виходили у вигляді витої пари, а потім утворювали кільцеве з'єднання (рис. 5.31). Два мідних провода діаметром 0,1 мм були укладені таким чином, що утворювали кільце діаметром 70 мм. Імпульсним джерелом енергії служив конденсатор ИК-1-100-0,25. Напруга пробою некерованого іскрового розрядника становила 10±1 кВ. Вибух фотографічно фіксувався у фронтальній проекції до площини розміщення проводів. У центрі вибуху спостерігається більш темна область *2* (рис. 5.32). Зовнішня високотемпературна область *1* провідності має форму кільця.

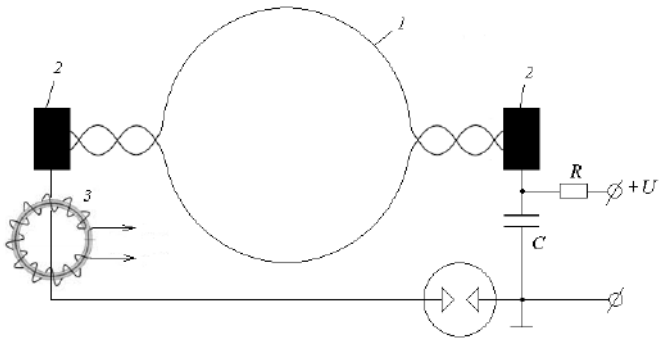


Рисунок 5.31 – Схема утворення струмопровідного кільця у газовому середовищі атмосферного тиску за рахунок вибуху проволоки: *1* – провідник, що вибухає; *2* – провідотримач; *3* – пояс Роговського

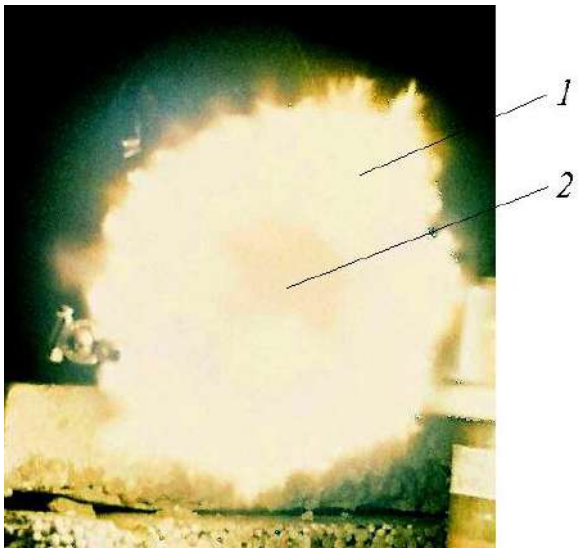


Рисунок 5.32 – Фотографія вибуху провідника у формі кільця

Для узгодження часу вибуху провідника з часом індукування вихрового струму у термічно іонізованій плазмі, необхідна певна затримка часу від початку розряду до часу вибуху провідника. Для визначення цієї затримки проведено вимірювання струму в електричному колі, яке виникає під час вибуху провідника. В результаті за домомогою цифрового осцилографа виміряний час затримки вибуху провідника, який в умовах експерименту становив Δt=300±50 нс (рис. 5.33). Відсутність паузи струму в кривій розрядного струму свідчить про надлишок електричної енергії, що запасається в конденсаторі для забезпечення вибуху. Так як розрядний струм припиняється через напівперіод розряду тривалістю близько 1 мкс, то це дає підставу вважати, що асинхронність в розльоті частин провідника не перевищує даний час.

Наявність тільки одного вигину в кривій струму, характерній для вибуху провідника, свідчить про синхронність вибуху двох частин провідника. Це може бути викликано наявністю зворотного зв'язку в процесі зростання опору частин провідника в результаті нагріву струмом, що забезпечує самоузгодженість синхронності вибуху. Тобто, якщо яка-небудь з частин провідника починає нагріватися швидше від іншої, то це призводить до більш швидкого зростання її опору і викликає обмеження розрядного струму. В

результаті, більший струм починає текти через іншу частину провідника. Таким чином, розроблена електрична схема вирішує задачу формування сильно іонізованого газоплазмового середовища у вигляді кільця у атмосферному середовищі.

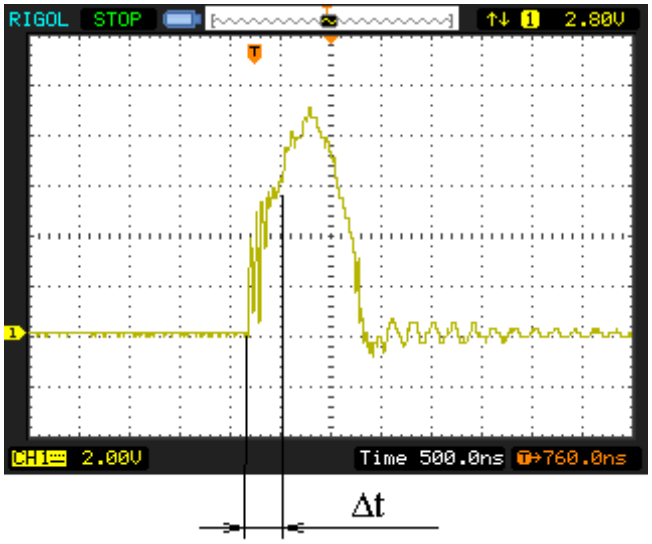


Рисунок 5.33 – Осцилограма струму під час вибуху провідника

Техніка індукування вихрового струму у сильно іонізованому газоплазмовому середовищі. Короткий час існування плазми у сильно іонізованому стані зумовлює необхідність подовження підведення енергії до плазмового формування. Тому формування сильно іонізованого газоплазмового середовища у вигляді кільця здійснюється над ОІ з метою подальшого індукування вихрового струму у плазмовому формуванні (рис. 5.34).

Схема працює наступним чином. Попередньо заряджається конденсатор C_2 до необхідної напруги. Після цього починається заряджання конденсатора C_1. Після досягнення напруги пробиття некерованого розрядника K_1 під дією розрядного струму відбувається вибух проводу *1* у формі кільця. В результаті над індуктором *2* на деякий час утворюється високотемпературна область у формі кільця, в якій досягається термічна іонізація газу. Виникнення струму фіксується датчиком струму *3*, наприклад поясом Роговського. Сигнал, що потрапляє з датчика *3*, служить синхроімпульсом для запуску розряду у контурі

індуктора *2*. З регульованою затримкою з генератора G подається керуючий сигнал на розрядник *3*. Розвиток розряду у контурі індуктора призводить до індукування струму у високотемпературній кільцевій області.

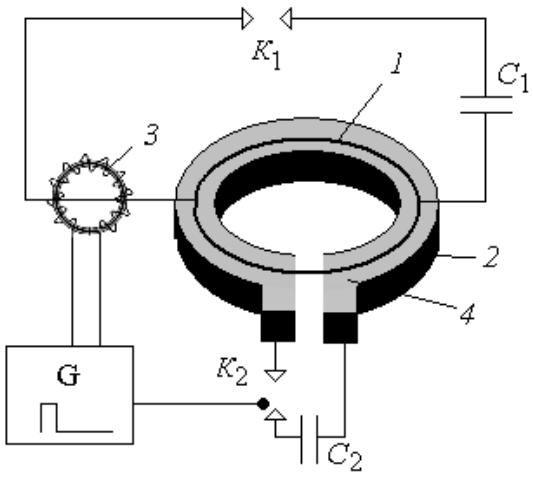


Рисунок 5.34 – Схема синхронізації розрядів у електричному контурі ОІ і контуру з проводом у формі кільця, що вибухає: *1* – провід у формі кільця, що вибухає; *2* – ОІ; 3 – пояс Роговського; *4* – шар діелектричного матеріалу; K_1 – двохелектродний розрядник; K_2 – трьохелектродний розрядник

Для проведення досліджень було виготовлено ОІ з мідного дроту прямокутного перетину 1,5 × 4 мм^2 у вигляді плоскої спіралі з 6 витків. Провід ОІ ізолювався фторопластовой плівкою товщиною 50 мкм. Кількість шарів плівки становила не менше 7. Внутрішній діаметр ОІ склав 40 мм, зовнішній діаметр дорівнював 100 мм. ОІ укладалася в циліндричний корпус з закритим торцем, виготовлений з полівінілхлориду товщиною 3 мм. Укладені в корпус витки ОІ заливалися епоксидною смолою. Індуктивність ОІ склала 1850 ± 50 нГн. Активний опір ОІ дорівнював 0,026 Ом. Джерелом імпульсного розряду служив конденсатор типу ІК 50-3. Номінальна ємність конденсатора, виміряна RLC-метром типу Е7-22 на частотах 120 Гц і 1 кГц, склала 2,9 ± 0,05 мкФ. Згідно з паспортними даними, власна індуктивність конденсатора становить не більше 20 нГн. Випробування індуктора здійснювалося в режимі комутації за допомогою некерованого іскрового розрядника. Напруга заряджання конденсатора дорівнювала 20 ± 2 кВ. Після серії з 20 розрядів, за

результатами огляду видимих пошкоджень ізоляції (епоксидного компаунда і фторопластовой ізоляції) не виявлено.

Важливим параметром, що потребує вимірювання, є індуктивність електричного з'єднання у контурі індуктора. Для визначення цього параметру проведено вимірювання коливань струму, що виникає у цьому контурі під час розряду без навантаження. У зв'язку з використанням датчика струму, що обмежений за струмом до 1 кА, за багаторазового перевищення цього значення розрядним струмом у колі індуктора, вимірювання здійснювалось шляхом створення паралельної вітки у розрядному контурі з високим електричним опором. Це дозволило визначити характерну криву розрядного струму. За відомими значеннями ємності конденсатора C = 2,7 мкФ та виміряною кривою затухаючого розряду у колі індуктора, методом перебору визначено індуктивність розрядного *RLC*-контуру, яка склала $L_{конт}$ = 2,25 мкГн. На наведеному рисунку відображено збіг за частотою коливань розрахункової та експериментальної кривих струму (рис. 5.35).

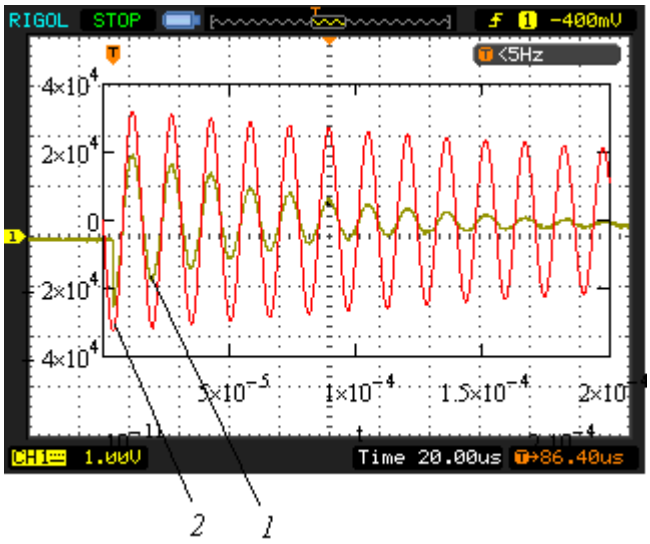


Рисунок 5.35 – Виміряна (1) та розрахункова (2) криві струму в ОІ

Після визначення LC-параметрів контуру є можливим визначення амплітуди струму у першому напівперіоді розряду (нехтуючи втратами енергії на активному опорі) за виразом

$$I_{\max} = U_0 \sqrt{\frac{C}{L}}.$$

У варіанті, що досліджувався, за U_0 = 30 кВ отримуємо $I_{\max}$ = 32,8 кА. З аналізу співвідношення індуктивності контуру (2,25 мкГн) до індуктивності індуктора (1,8 мкГн), отримуємо, що до індуктора підводиться понад половини начальної напруги заряджання ємності.

Умови накопичення енергії магнітного поля у плазмовому кільці. Умови індукування «стійкого» плазмового кільця визначено з наступних міркувань. Згідно з моделями, стійкість плазмового кільця забезпечується компенсуванням відцентрових сил, що виникають під час колективного руху електронів навколо шару іонів по колу, силами електричного поля. Колективний рух електронів у заданому напрямку характеризується електричним струмом. Струмопровідне кільце має власну індуктивність L. Відповідно, під час протікання струму i у струмопровідному плазмовому кільці відбувається накопичення енергії магнітного поля $0{,}5Li^2$. Таким чином, наявність енергії магнітного поля у струмопровідному кільці є першою умовою утворення «стійкого» просторового плазмового згустку.

Під час метання плазмового згустку відбуваються процеси перетворення енергії ЄНЕ в магнітну, електричну, кінетичну та безповоротно – у теплову. Припинення процесу перерозподілу енергії між індуктором прискорювача та струмопровідним плазмовим кільцем відбувається після зникнення електромагнітної взаємодії. При цьому, у струмопровідному кільці надалі продовжується лише процес перетворення накопиченої енергії магнітного поля у теплову енергію. Звідси, другою умовою утворення «стійкого» плазмового кільця є послаблення зовнішніх електромагнітних сил, що діють на струмопровідне кільце, після накопичення у ньому енергії магнітного поля. Час «стійкості» утвореного плазмового кільця обмежується тривалістю процесу перетворення енергії магнітного поля у теплову енергію. З урахуванням приведених вище обмежень, умови індукування «стійкого» плазмового кільця можливо визначити за математичною моделлю електродинамічного

прискорення струмопровідного кільця у ЛІЕП, що описана в роботах. Область застосування моделі обмежується коаксіальною схемою розміщення ОІ прискорювача та струмопровідного кільця.

Математична модель, що описує електродинамічні процеси прискорення плазмового кільця у електродинамічному прискорювачі, представлена в роботі. Складнощі у розрахунку викликані невизначеністю параметрів плазмового формування, яке динамічно змінюються під час накопичення енергії магнітного поля та його прискорення.

Результати експериментального дослідження метання плазмового згустку у атмосферному середовищі. Для дослідження процесу метання плазмового згустку застосовано діод типу 2CL2FP з допустимою напругою 30 кВ та струмом 100 мА. В процесі роботи відбувався вибух діода через сильний струм, який виникав наприкінці першого півперіоду розряду. Разом з тим реалізувався режим розряду з замиканням ємності, про що свідчить осцилограма напруги на індукторі (рис. 5.36). Вимірювання напруги на індукторі здійснювалось компенсованим дільником напруги PINTEK HVP-15HF (1:1000).

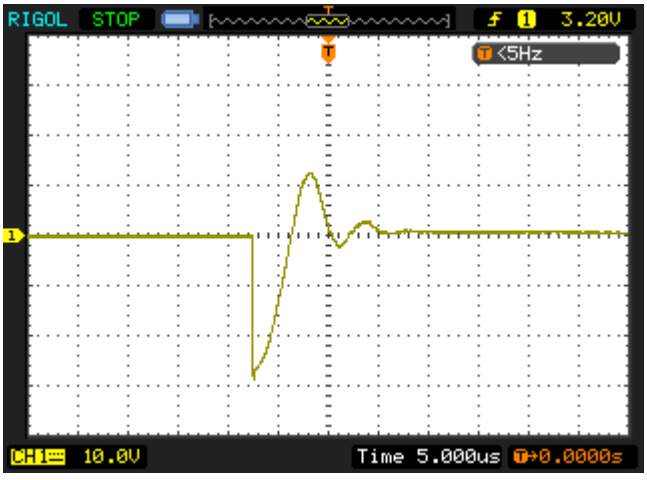


Рисунок 5.36 – Зміна напруги на індукторі у разі застосування високовольтного діоду як замикача (значення напруги зменшено у 1000 разів)

За результати вимірювань спостерігається підведення напруги біля 28 кВ до індуктора, та незначна осциляція коливань напруги. Наявність осциляції

можливо пояснити наявним часом вибуху діоду, який триває декілька мікросекунд. Дослідження метання плазмового згустку здійснено шляхом аналізу інтегральних параметрів розвитку плазмового кільця. Швидкість переміщення плазмового згустку визначалась за результатами обробки високошвидкісного фотографування з частотами зйомки 420 кадр/с та 1000 кадр/с. Час існування плазмового згустку склав біля 8 мс (рис. 5.37). Різко відрізняється швидкість розширення області світимості кільця під час його вибухового формування та швидкість руху кільця відносно індуктора. Вибухове формування кільця відбувається з надзвуковою швидкістю, а максимальна швидкість переміщення кільця під дією сил індукційного прискорення є дозвуковою (до 50 м/с). В умовах проведених досліджень повна енергія ЄНЕ не перевищувала 600 Дж.

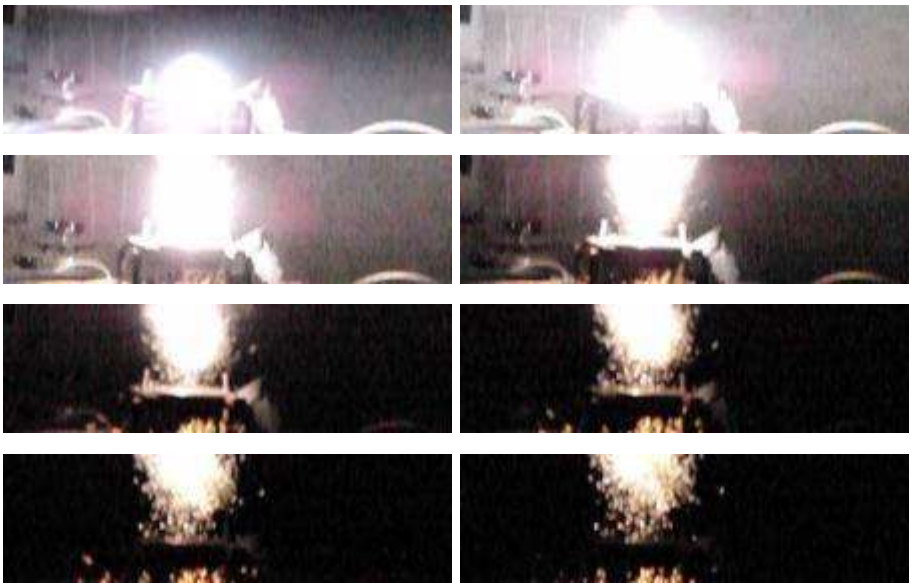


Рисунок 5.37 – Розвиток процесу плазмового формуванн: час між експозиціями дорівнює 1 мс

По області світимості чітко фіксується відокремлення плазмового формування від індуктора (рис. 5.38). Слід відзначити, що якби мав місце лише вибух провідника над індуктором, то область світимості набувала б лише напівсферичної форми. Шароподібна форма плазмового згустку, її відокремлення від індуктора, може свідчити про наявність накопичення

енергії магнітного поля у плазмовому формуванні розробленого типу за атмосферного тиску.

а *б*

Рисунок 5.38 – Загальний вигляд (*а*) та термограма (*б*) процесу метання плазмового згустку

Таким чином, розроблено та експериментально апробовано ЛІЕП, призначений для метання плазмового формування в атмосферному середовищі. В його основі покладено формування газоплазмового середовища у атмосферному середовищі шляхом електричного вибуху провідника в формі кільця, індукування вихрового струму у плазмовому формуванні та забезпеченні умов для накопичення енергії магнітного поля у плазмовому формуванні шляхом переривання магнітного зв’язку між індуктором та плазмовим формуванням.

РОЗДІЛ 6
ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ЛІНІЙНИХ ІМПУЛЬСНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

На базі ЛІЕП мультиякірної конфігурації були розроблені моделі електромагнітної катапульти для безпілотного літального апарату, магнітно-імпульсного пресу для керамічних порошкових матеріалів, пристрій для знищення інформації на SSD накопичувачі та електромеханічного пристрою для скидання ожеледних і снігових відкладень з проводу лінії електропередачі.

6.1 Електромагнітна катапульта безпілотного літального апарату

Задачу запуску безпілотного літального апарату (БПЛА) можна вирішити за рахунок електромагнітної катапульти, яка побудована на базі ЛІЕП-К-Е2 мультиякірної конфігурації. Електромагнітна катапульта БПЛА містить коаксіально встановлені дві суміжні рухливі котушки *1* і *2*, які виконані у формі плоских дисків, і два дискових ЕЯ *3* і *4* (рис. 6.1) [122].

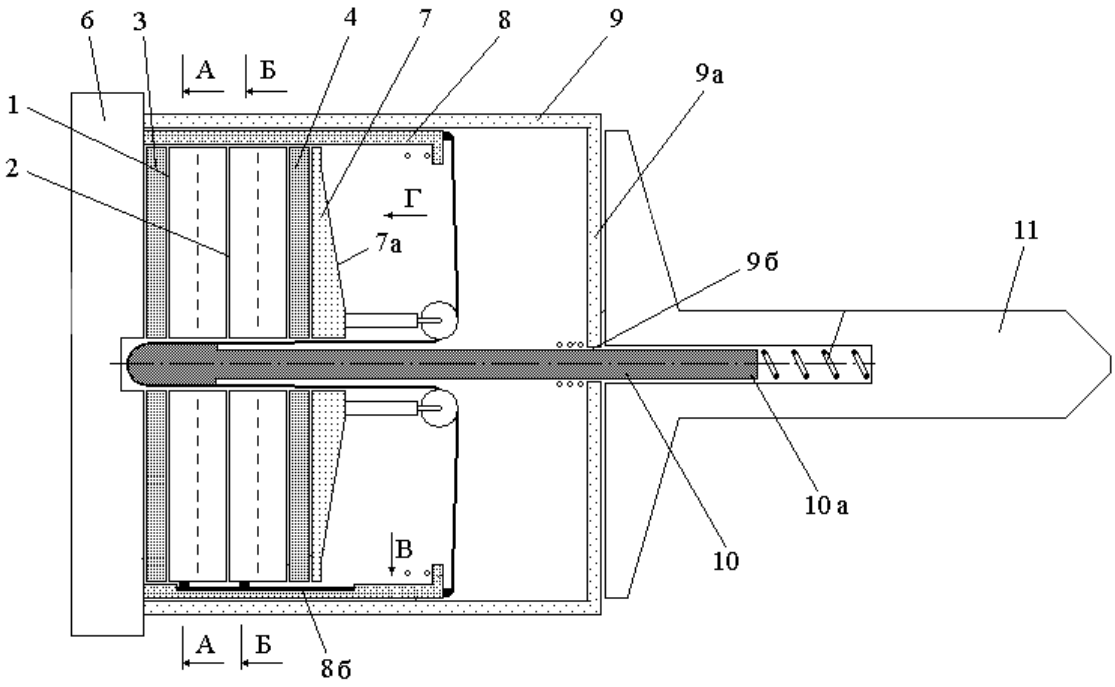


Рисунок 6.1 – Схема електромагнітної катапульти БПЛА в вихідному стані

Котушки *1* і *2* виконані з центральними внутрішніми отворами і збуджуються від імпульсного джерела електроживлення *5* (не показаний). Нерухомий ЕЯ *3* взаємодіє з упором *6*, а рухомий ЕЯ *4* взаємопов'язаний з силовим диском *7*, торцева сторона *7а* якого виконана з потовщенням до центральної осі. Рухомі котушки *1, 2* і якір *4* своїми зовнішніми бічними сторонами взаємодіють за допомогою ковзання з внутрішньою поверхнею направляючої труби *8*. Труба *8* і охоплючий її циліндричний корпус *9* приєднані до упору *6*. Напрямна труба *8* виконана з феромагнітного матеріалу і виконує функцію ФЕ. Циліндричний корпус *9* містить торцеву стінку *9а*, в якій виконано центральний направляючий отвір *9б*. У цьому отворі розташований рухомий направляючий стержень *10*, передній кінець якого *10а* взаємодіє з БПЛА *11*. Контактні виводи *1г* і *1д* котушки *1* розташовані в поздовжніх пазах направляючої труби 8 з контактними елементами *8а* і *8б* відповідно, а контактні виводи *2г* і *2д* котушки *2* розташовані в поздовжніх пазах направляючої труби *8* з контактними елементами *8б* і *8в* відповідно. З центральним контактним елементом *8б* взаємодіє за допомогою ковзання контактний вивід *1д* котушки *1* і контактний вивід *2г* котушки *2*. З боковим контактним елементом *8а* взаємодіє за допомогою ковзання контактний вивід *1г* котушки *1*, а з бічним контактним елементом *8в* взаємодіє за допомогою ковзання контактний вивід *2д* котушки *2* рис. 6.2 [122].

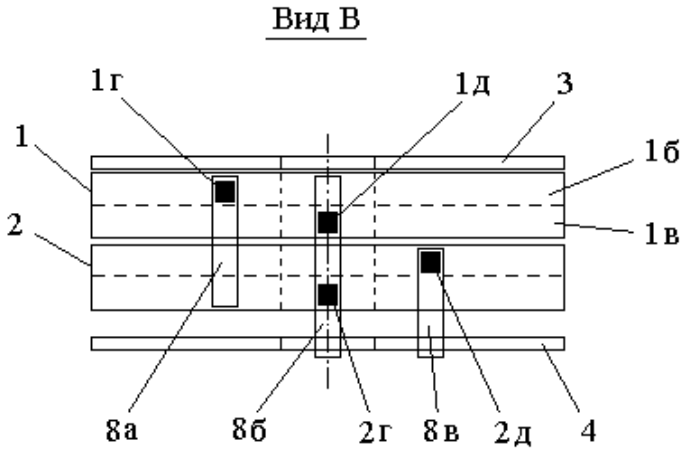


Рисунок 6.2 – Схема розташування контактних виводів котушок електромагнітної катапульти БПЛА

При подачі напруги від імпульсного джерела електроживлення в котушках *1* і *2* протікають струми протилежної полярності. При цьому в якорях *3* і *4* виникають індуковані струми. У ЕЯ *3* наводиться струм протилежної полярності зі суміжно розташованою котушкою *1*, а в ЕЯ *4* наводиться струм протилежної полярності зі суміжно розташованою котушкою *2* (рис. 6.3) [122].

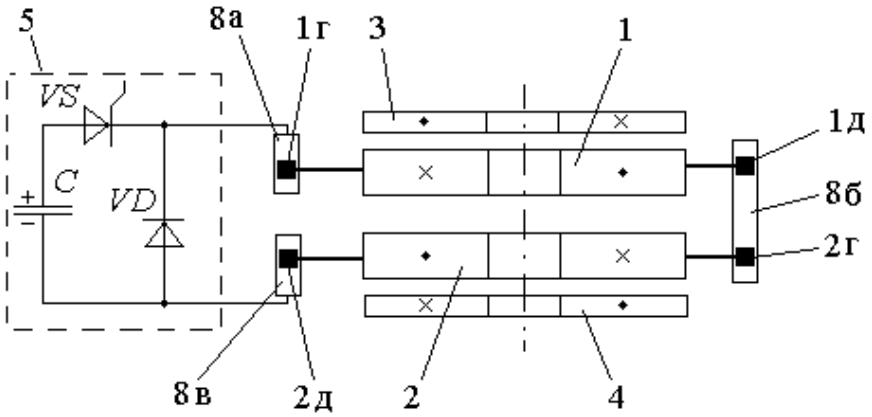


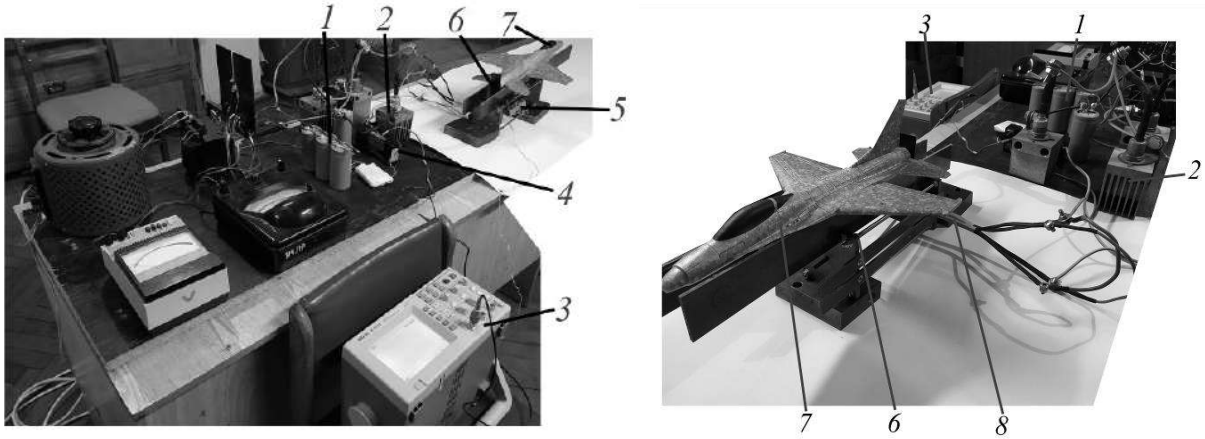
Рисунок 6.3 – Схема струмів в котушках і якорях ЛІЕП електромагнітної катапульти БПЛА

За рахунок електродинамічних сил відбувається відштовхування котушки *1* від нерухомого ЕЯ *3*. Від рухомої котушки *1* відштовхується котушка *2*, яка здобуває більш високу швидкість, ніж котушка *1* відносно якоря *3*. А від рухомої котушки *2* відштовхуються рухомий ЕЯ *4* та силовий диск *7*. При переміщенні рухомого якоря *4* з силовим диском *7*, напрямні колеса *12* натягують трос *13*, який впливає на задній кінець *10 б* рухомого направляючого стержня *10*. Передній кінець стержня *10 а* за допомогою пружного накопичувача енергії *14* впливає на БПЛА *11*, надаючи йому високу швидкість вильоту.

У порівнянні з відомими [123] електромагнітними пусковими пристроями запропонована катапульта характеризується зменшеними масогабаритними параметрами за рахунок компактного розташування двох дискових котушок і якорів, має підвищену надійність за рахунок відсутності послідовної комутації котушок в процесі руху феромагнітного якоря і забезпечує підвищену

швидкість вильоту за рахунок електродинамічних сил відштовхування, діючих на електропровідний якір, в порівнянні з електромагнітною силою притягнення, що діє на масивний феромагнітний якір в пристрої. Електродинамічні сили взаємодії між котушками і електропровідними якорями, істотно перевищують електромагнітні сили, що діють між котушками і феромагнітним якорем в відомому пристрої [124].

Для перевірки працездатності запропонованої конструктивної схеми була виготовлена модель електромагнітної катапульти БПЛА. Модель побудована на базі ЛІЕП-К-Е мультиякірної конфігурації. Модель містить коаксіально встановлені ЕЯ та дві дискові котушки, одна з яких виконує функцію ОІ, а друга функції КЯ. На рис. 6.4 показаний загальний вигляд стенду по дослідженню моделі електромагнітної катапульти БПЛА [111].



а *б*

Рисунок 6.4 – Загальний вигляд з тилу (*а*) та фронту (*б*) стенду по дослідженню моделі електромагнітної катапульти БПЛА: *1* – ЄНЕ (батарея електролітичних конденсаторів), *2* – напівпровідникові елементи керування, *3* – осцилограф Rigol DS5022M, *4* – шунт 75ШСМ, *5* – резистивний датчик переміщення, *6* – виконавчий елемент (штовхач), *7* – БПЛА, *8* – рухомі виводи ОІ та КЯ

На рис. 6.5 представлена модель катапульти без об'єкта розгону та зі знятими напрямними для БПЛА.

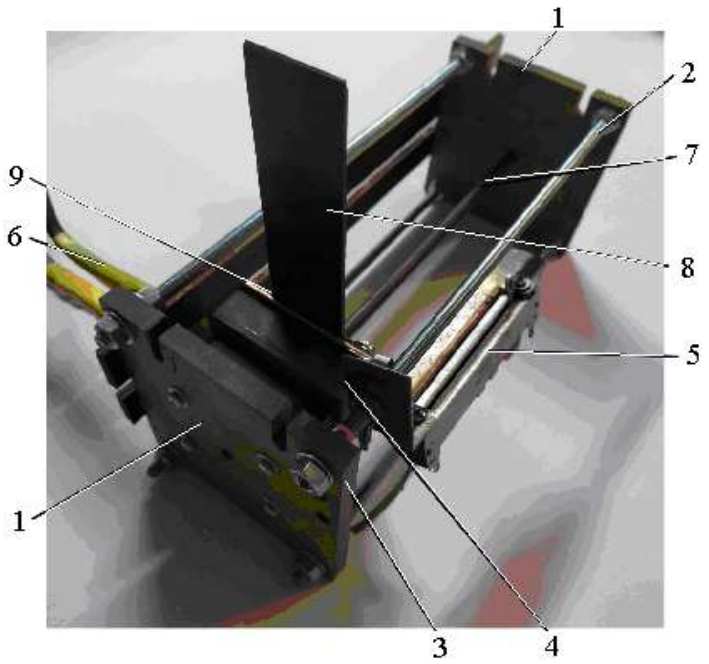
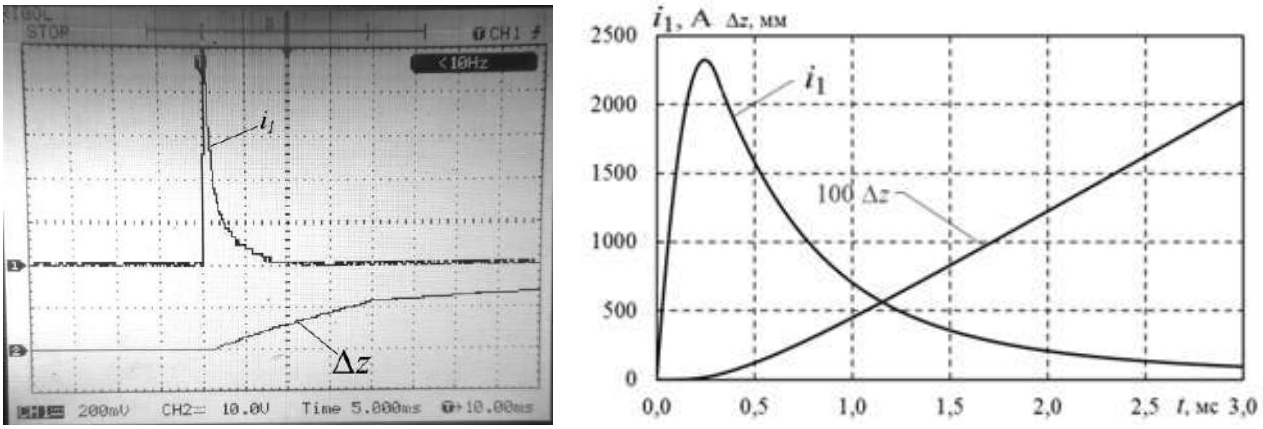


Рисунок 6.5 – Загальний вигляд моделі електродинамічної катапульти без БПЛА: 1 – опорна плита; 2 – кріпильні елементи; 3 – ОІ, 4 – ОЯ, 5 – датчик переміщення, 6 – гнучкі провідники; 7 – центральний напрямний стрижень; 8 – вертикальний штовхач; 9 – зачіп для БПЛА

Модель складається з двох опорних плит, фіксованих чотирма поздовжніми елементами кріплення. До опорної пускової плити приєднана ОІ, а до неї прилягає ОЯ. Нерухома ОІ та рухома ОЯ встановлені на центральному напрямному стрижні, що проходить через їх внутрішні отвори. До ОЯ прикріплений вертикальний штовхач із зачепом для БПЛА. ОЯ гнучкими провідниками з'єднана з ОІ та з імпульсним джерелом живлення. До ОЯ приєднано рухомий контакт резистивного датчика переміщення. До опорної гальмівної плити прикріплений демпфер, що забезпечує гасіння швидкості ОЯ (на фіг. 6 відсутня). При випробуваннях моделі катапульти пази опорних плит встановлюються дві напрямні пластини, на яких розміщується модель БПЛА.

На рис. 6.6 представлені експериментальні та розрахункові струми збудження ОІ і КЯ i_1 та переміщення Δz моделі БПЛА. Зазначимо різний масштаб по часу між експериментальними та розрахунковими показниками на рис. 6.6 *а* та рис. 6.6 *б*. Експериментальні та розрахункові значення струмів

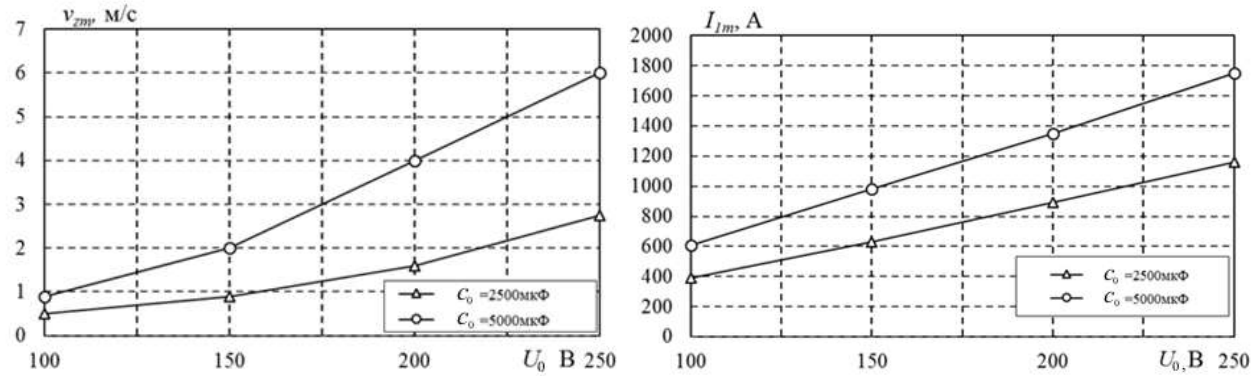
збудження моделі БПЛА з точністю до 5 % співпадають між собою, а переміщення з точністю до 10 %.



а *б*

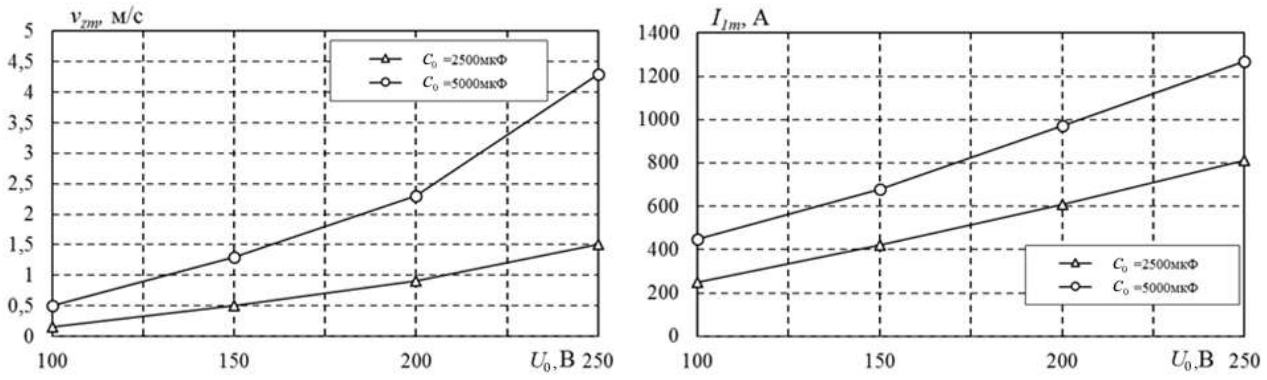
Рисунок 6.6 – Струм збудження ОІ і КЯ i_1та переміщення Δz моделі БПЛА:
а – осцилограма; *б* – розраховані характеристики

За допомогою виміряних значень переміщення Δz БПЛА були отримані експериментальні залежності його максимальної швидкості v_{zm} та амплітуди струму збудження I_{1m} від напруги U_0 та ємності C_0 ЄНЕ при паралельному та послідовному з'єднанні КЯ та ОІ (рис. 6.7, рис. 6.8).



а *б*

Рисунок 6.7 – Експериментальні залежності максимальної швидкості v_{zm} моделі БПЛА (*а*) та амплітуди струму збудження I_{1m} (*б*) від напруги U_0 та ємності C_0 ЄНЕ при паралельному з'єднанні КЯ та ОІ



а *б*

Рисунок 6.8 – Експериментальні залежності максимальної швидкості v_{zm} моделі БПЛА (*а*) та амплітуди струму збудження I_{1m} (*б*) від напруги U_0 та ємності C_0 ЄНЕ при послідовному з'єднанні КЯ та ОІ

При паралельному з'єднанні КЯ та ОІ збільшення ємності C_0 ЄНЕ в 2 рази практично в такій же пропорції збільшує максимальну швидкість БПЛА v_{zm}, яка реєструється в кінці ділянки розгону. Амплітуди струму в ОІ та КЯ I_{1m} від напруги U_0 збільшуються практично в лінійній залежності. При збільшенні ємності C_0 ЄНЕ у 2 рази збільшення амплітуд струму збудження I_{1m} відбувається в меншій мірі. При паралельному з'єднанні ОІ та КЯ максимальна швидкість моделі БПЛА v_{zm} та амплітуда струму збудження I_{1m} мають більші значення, ніж при послідовному з'єднанні цих елементів.

В табл. 6.1 представлені результати експериментальних і розрахункових досліджень моделі електромагнітної катапульти БПЛА при U_0 = 250 В та при ємностях C_0 = 2500 мкФ та 5000 мкФ ЄНЕ.

Таким чином експериментальні і розрахункові показники для моделі електромагнітної катапульти БПЛА достатньо добре узгоджуються між собою. Електричні показники, а саме амплітуда струму збудження I_{1m}, узгоджуються з точністю 4,5 %, а механічні показники, а саме максимальна швидкість БПЛА v_{zm}, узгоджуються з точністю 7 %.

Таблиця 6.1 – Результати експериментальних (Е) і розрахункових (З) досліджень і відносної похибки (ВП, %) моделі електромагнітної катапульти БПЛА

Тип перетворю-вача	Амплітуда струму збудження I_{1m}, А						Максимальна швидкість БПЛА v_{zm}, м/с					
	C_0 = 2500 мкФ			C_0 = 5000 мкФ			C_0 = 2500 мкФ			C_0 = 5000 мкФ		
	Е	Р	ВП	Е	Р	ВП	Е	Р	ВП	Е	Р	ВП
ЛІЕП-К$_p$-Е	1160	1215	4,7	1750	1839	5,1	2,7	2,9	7,4	6,6	7	6,1
ЛІЕП-К$_s$-Е	810	850	4,9	1270	1330	4,7	1,5	1,7	13,3	4,3	4,7	9,3

В ЛІЕП-К$_p$-Е з паралельним з'єднанням ОІ та КЯ амплітуди струмів збудження I_{1m} перевищують аналогічні величини ЛІЕП-К$_s$-Е з послідовним з'єднанням ОІ та КЯ на 43 %. При цьому максимальна швидкість БПЛА v_{zm}, реалізованого на базі перетворювача ЛІЕП-К$_p$-Е, на 60 % вище, ніж при використанні перетворювача ЛІЕП-К$_s$-Е.

6.2 Магнітно-імпульсний прес для керамічних порошкових матеріалів

Задачу розробки високоефективного магнітно-імпульсного пресу для керамічних порошкових матеріалів можна вирішити за рахунок використання перетворювача ЛІЕП-Е-Ф мультиякірної конфігурації [125].

Магнітно-імпульсний прес містить циліндричну матрицю *1*, яка заповнена керамічним порошковим матеріалом *2*. З одного торця матриці *1* встановлений пуансон *3*, а з другого торця плоска основа *4* (рис. 6.9). Пуансон *3* встановлений з можливістю взаємодії з дисковим індуктором *5*, який містить двошарову обмотку *6* з стрічкового проводу з внутрішнім вигином з одного шару в інший шар і з двома зовнішніми виводами для під'єднання до електричного блока живлення.

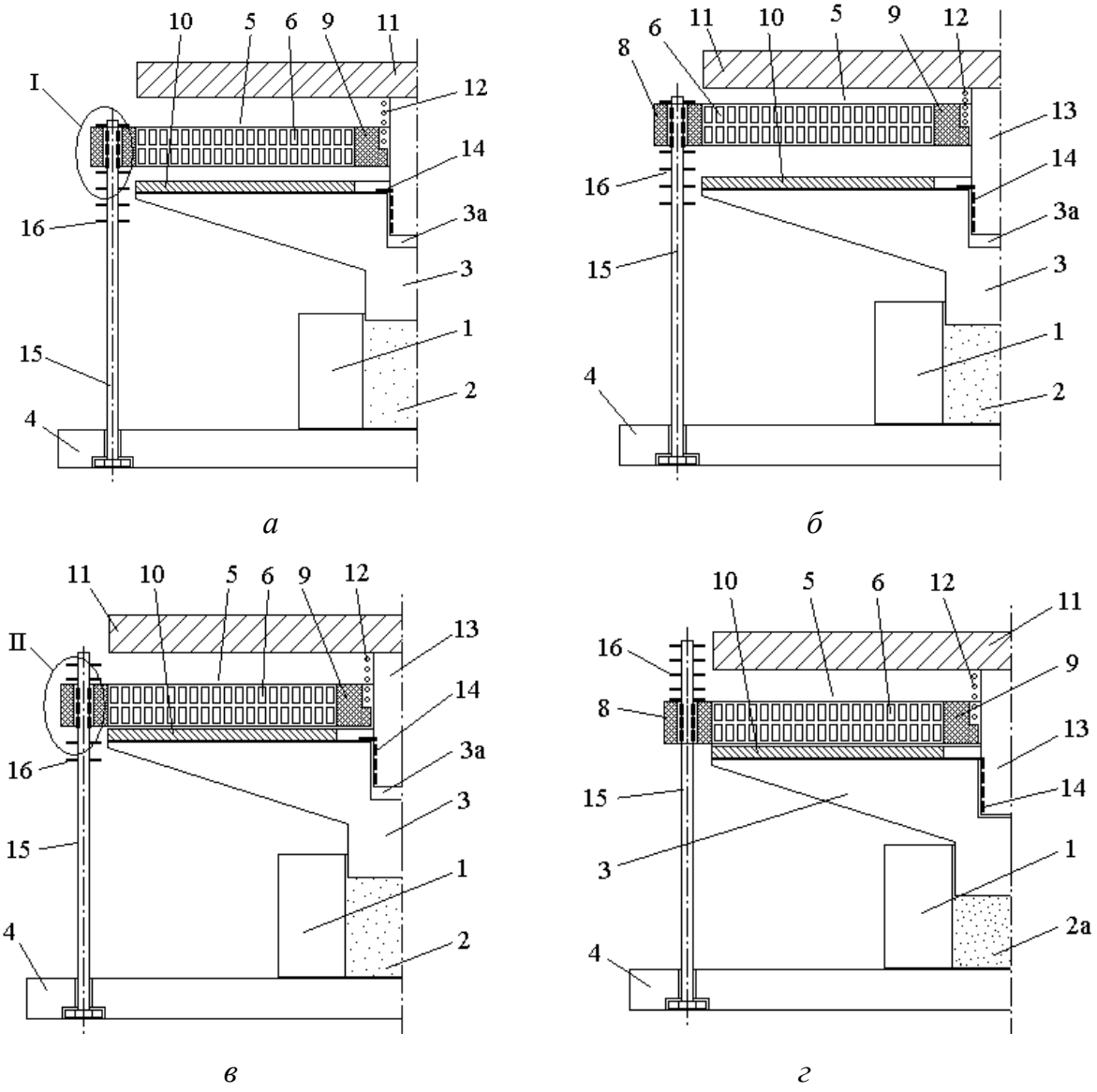


Рисунок 6.9 – Схема робочого процесу магнітно-імпульсного пресу на першому етапі при переміщенні ЕЯ (*а*), на другому етапі при переміщенні ФЯ (*б*), на третьому етапі при переміщенні індуктора (*в*), у кінцевому положенні (*г*)

До центру ФЯ *11* прикріплений циліндричний товкач *13*, бокова сторона якого ковзанням взаємодіє з внутрішньою боковою стороною внутрішньої обичайки *9* і з боковою стороною внутрішньої циліндричної виїмки *3а* пуансона *3*. На боковій стороні циліндричного товкача встановлені підпружинені храпові елементи *14*, які перешкоджають переміщенню товкача *13* відносно пуансона *3* в напрямку матриці *1* (рис. 6.10).

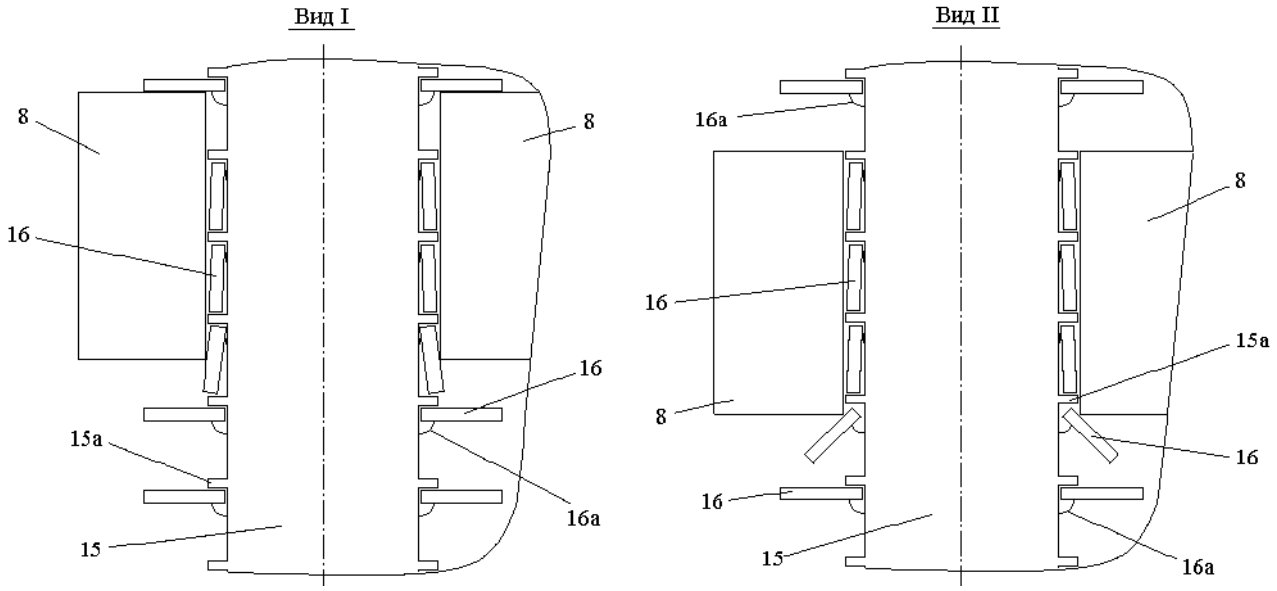


Рисунок 6.10 – Храпові елементи на першому (*а*) та на третьому (*б*) етапі робочого процесу

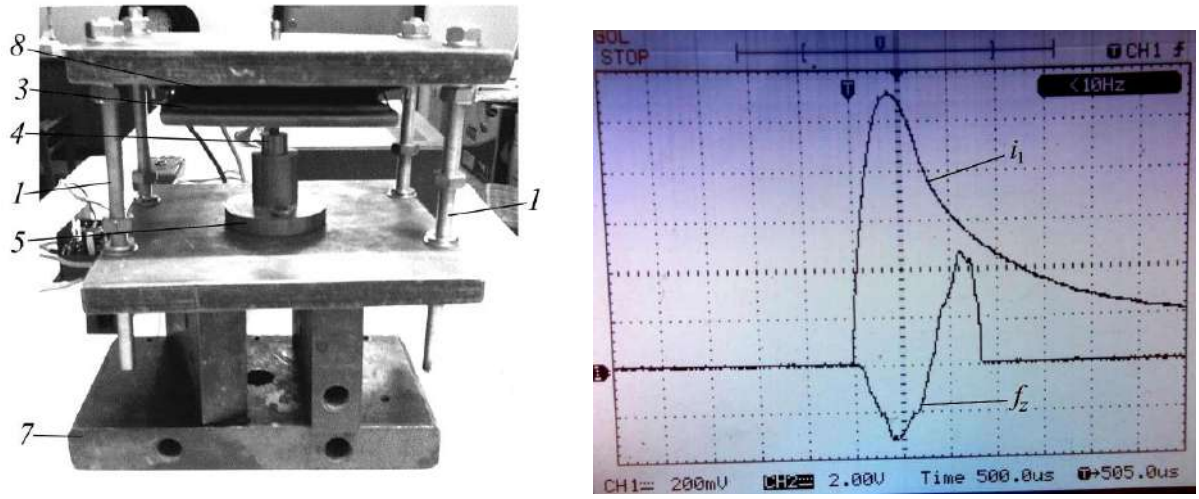
До пласкої основи *4* перпендикулярно прикріплений ряд впорядковано розташованих циліндричних опор *15*, кожна з яких проходить крізь отвір у зовнішній обичайці *8*. На бокових сторонах циліндричних опор *15* встановлені підпружинені храпові елементи *16*. Храпові елементи *16* являють собою пластини з пружинами *16а*, які упираються у виступи *15а* циліндричних опор *15* [125].

При подачі сигналу на елемент управління ЄНЕ розряджається на дисковий індуктор *5*. В ЕЯ *10* наводяться вихрові струми, внаслідок чого на нього з боку індуктора *5* діють ЕДЗ відштовхування. На ФЯ *11* з боку індуктора *5* діють ЕМЗ притягнення. Таким чином, обидві означені сили діють в одному напрямку. При цьому храпові елементи *16* перешкоджають переміщенню індуктора *5* в напрямку ФЯ *11*. Оскільки електромагнітні процеси перебігають повільніше ніж електродинамічні, то на першому етапі робочого процесу відбувається переміщення ЕЯ 10 (рис. 6.10 *а*). ЕЯ *10* переміщує пуансон *3*, який здійснює пресування керамічного порошкового матеріалу *2*. При такому переміщенні ЕЯ *10* бокова сторона циліндричного товкача *13* взаємодіє з боковою стороною внутрішньої циліндричної виїмки *3а* пуансона *3*.

Притиснуті підпружинені храпові елементи *14*, які виходять за пласку сторону пуансона *3*, розтискаються. На другому етапі робочого процесу відбувається переміщення ФЯ *11* і стискання пружин *12* (рис. 6.10 *б*) [125].

Оскільки розтиснуті храпові елементи *14* перешкоджають переміщенню товкача *13* відносно пуансона *3* в напрямку матриці *1*, то вони штовхають пуансон *3* в напрямку порошкового матеріалу *2*. Таким чином на пуансон діють і ЕДЗ, і ЕМЗ, які забезпечує підвищену силову дію на порошковий матеріал *2*. Крім того, ФЯ *11* екранує магнітні поля розсіювання індуктора, що важливо для електронного обладнання та обслуговуючого персоналу, а також посилює магнітне поле в зоні ЕЯ *10*, збільшуючи електродинамічну силу відштовхування, що також підвищує силову дію на порошковий матеріал *2*. На третьому етапі робочого процесу відбувається затухання струму в ОІ *6* індуктора *5*. При цьому пружини *12* повертають ФЯ *11* у вихідне положення, відштовхуючи його від індуктора. Індуктор *5* під дією сили тяжіння переміщується по циліндричних опорах *15* вниз до зіткнення з ЕЯ *10*. Після цього відбувається повторна подача сигналу на елемент управління магнітно-імпульсної установки, і робочий процес повторюється до необхідного ступеню пресування порошкового матеріалу *2*.

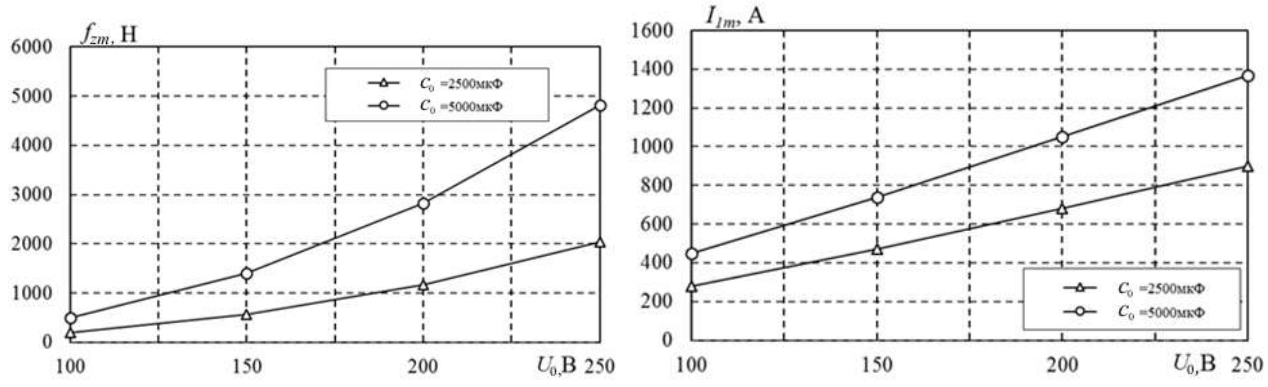
Для перевірки працездатності запропонованої конструкції була виготовлена лабораторна модель магнітно-імпульсного пресу, яка включає циліндричні опори *1*, індуктор *2*, ЕЯ *3*, пуассон *4*, матрицю *5*, електронний блок збудження ЄНЕ *6*, нижню опорну плиту *7* та верхню феромагнітну плиту *8*, яка виконує функцію ФЯ (рис. 6.11 *а*). Були проведені експерименти по пресуванню керамічних порошків, при яких реєструвались струм збудження i_1 в ОІ та сили f_z, яку здійснювався пуансоном на керамічний порошок (рис. 6.11 *б*) [110].



а *б*

Рисунок 6.11 – Загальний вигляд лабораторної моделі магнітно-імпульсного пресу (*а*), осцилограма струму збудження i_1 та сили f_z на керамічний порошок лабораторної моделі магнітно – імпульсного пресу (*б*)

На рис. 6.12 представлені експериментальні залежності амплітуди сили f_{zm}, що діє на керамічний порошок, та амплітуди струму індуктора I_{1m} від напруги U_0 ЄНЕ, при ємностях C_0 = 2500 мкФ та 5000 мкФ. Отримані експериментальні залежності з точністю до 12–17 % співпадають з розрахунковими результатами (табл. 6.2).



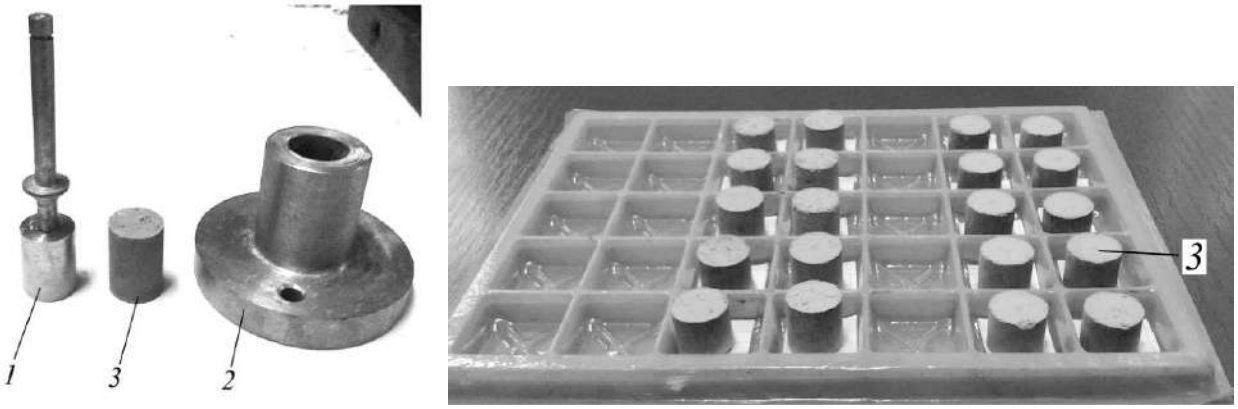
а *б*

Рисунок 6.12 – Експериментальні залежності амплітуди сили f_{zm} (*а*) та амплітуди струму індуктора I_{1m} (*б*) від напруги U_0 ЄНЕ лабораторної моделі магнітно-імпульсного пресу

Таблиця 6.2 – Результат експериментів (Е) і розрахунків (Р) та відносної похибки (ВП, %) лабораторної моделі магнітно-імпульсного пресу при U_0 = 250 В

Амплітуда струму ОІ I_{1m}, А						Амплітуда сили f_{zm}, Н					
C_0 = 2500 мкФ			C_0 = 5000 мкФ			C_0 = 2500 мкФ			C_0 = 5000 мкФ		
Е	Р	ВП	Е	Р	ВП	Е	Р	ВП	Е	Р	ВП
900	950	5,6	1370	1430	4,4	2040	2215	8,6	4820	5230	8,6

На рис. 6.13 представлені результати роботи лабораторної моделі магнітно-імпульсного пресу [126].



а *б*

Рисунок 6.13 – Зовнішній вигляд елементів лабораторної моделі пресу (*а*) та сукупність сформованих зразків (*б*): *1* – пуансон, *2* – матриця, *3* – сформований зразок

В експериментах використовувалися шамотно-глинисті порошки з однаковим співвідношенням компонентів, але різним гранулометричним складом. Імпульсне пресування показало, що при ударній дії пуансона здатність керамічних порошків ущільнюватися залежала від гранулометричного складу, зусилля пресування і кількості ударних імпульсів. Збільшення кількості силових імпульсів ущільнює керамічний порошок, знижуючи пористість і водопоглинання отриманих після випалювання керамічних матеріалів. Встановлено, що імпульсне пресування дозволяє отримати компакти, щільність яких виявилася на 12 % більша за щільність зразків, отриманих статичним

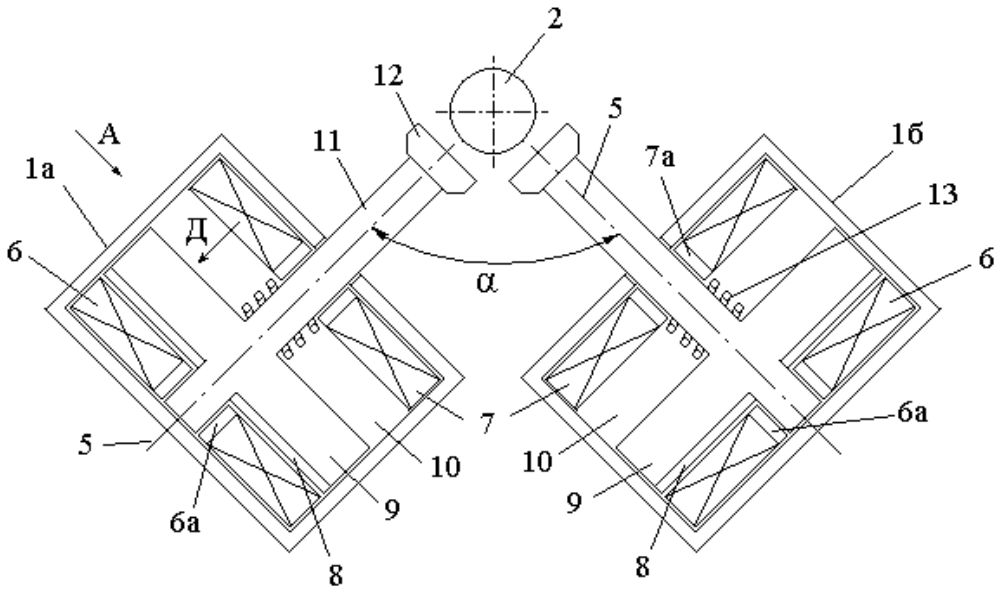
пресуванням. Це відповідним чином позначилося і на щільності обпалених зразків.

Таким чином, пресування з використанням магнітно-імпульсного пресу представляє ефективний спосіб пресування керамічних порошків і може служити резервом енергозбереження в керамічних технологіях. Експериментально встановлено, що імпульсне пресування керамічних порошків дозволяє отримати компакти, щільність яких на 12 % більша за щільність зразків, отриманих статичним пресуванням.

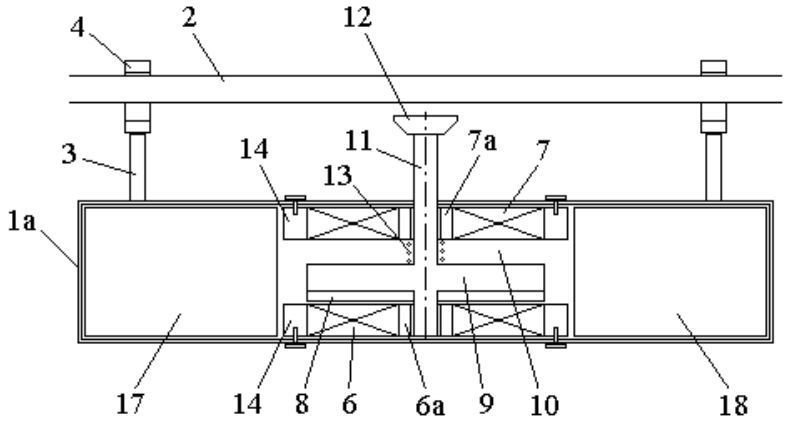
6.3 Електромеханічний ударний пристрій для скидання ожеледних і снігових відкладень з проводу лінії електропередачі

На базі ЛІЕП-Е-Ф мультиякірної конфігурації розроблено електромеханічний ударний пристрій для скидання ожеледних і снігових відкладень з проводу лінії електропередачі [127].

Пристрій для скидання ожеледних і снігових відкладень з дроту електропередачі містить однакові лівий *1а* і правий *1б* зовнішні корпуси. Ці корпуси витягнуті уздовж напрямку дроту *2*. Корпуси *1а* і *1б* розташовані один навпроти одного під кутом $\alpha = 90–120^{\circ}$. На протилежних краях кожного корпусу встановлені опори *3*, які приєднані до двох підвісних кілець *4*, всередині яких розташований провід *2* (рис. 6.14). У середній частині кожного корпусу на осі *5* розташовані нижня *6* і верхня *7* ОІ, які з'єднані послідовно. Пари ОІ *6* і *7* за допомогою електронного комутатора *Q* по черзі підключаються до ЄНЕ C_0. ОІ *6* і *7* намотані на електроізоляційних втулках *6а* і *7а* відповідно (рис. 6.15) [127]. До нижньої ОІ *6* прилягає дисковий ЕЯ *8*, який прикріплений до дискового ФЯ *9*, встановленому з зазором *10* навпроти верхньої ОІ *7*. ЕЯ *8* прикріплений до ФЯ *9*, який з’єднаний з напрямним стрижнем *11*, зверху якого встановлено бойок *12*.



а



б

Рисунок 6.14 – Конструкція електромеханічного пристрою для скидання ожеледних і снігових відкладень з проводу лінії електропередач: *а* – вигляд спереду; *б* – вигляд А

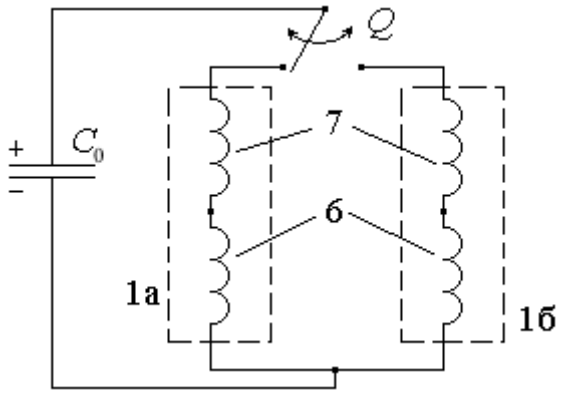


Рисунок 6.15 – Електрична схема живлення пристрою для скидання ожеледних і снігових відкладень з проводу лінії електропередач

Направляючий стержень *11* охоплений пружиною *13*, встановленою в зазорі *10* між верхньою ОІ *7* і ФЯ *9*. Направляючий стержень *11* виконаний з феромагнітного матеріалу, а бойок *12* виконаний з матеріалу високої міцності, наприклад з нержавіючої сталі. Корпуси *1а* і *1б* виконані з феромагнітного матеріалу і зафіксовані між собою за допомогою планки 1в, розташованої в нижній їх частині.

При появі ожеледних і снігових відкладень на дроті *2* блок управління *18* запускає пристрій в роботу. При цьому починається заряд ЄНЕ C_0. Після заряду ЄНЕ електронний комутатор *Q* підключає до нього одну пару ОІ *6* і *7*, розташованих в одному, наприклад в лівому *1а* зовнішньому корпусі. При цьому ОІ *6* індукує вихрові струми в ЕЯ *8*, внаслідок чого між ними виникають ЕДЗ відштовхування. А магнітне поле ОІ *7* впливає на ФЯ *9*, внаслідок чого між ними виникають ЕМЗ притягнення. Під дією сумарних ЕДЗ і ЕМЗ відбувається переміщення направляючого стрижня *11* уздовж осі *5* в електроізоляційних втулках *6а* і *7а*. Феромагнітний направляючий стержень *11* і корпуси *1а* і *1б* підсилюють магнітне поле, створене ОІ *6* і *7*, що сприяє збільшенню ЕДЗ і ЕМЗ, що діють на якорі *8* і *9*. Зазначені сили діють узгоджено в одному напрямку.

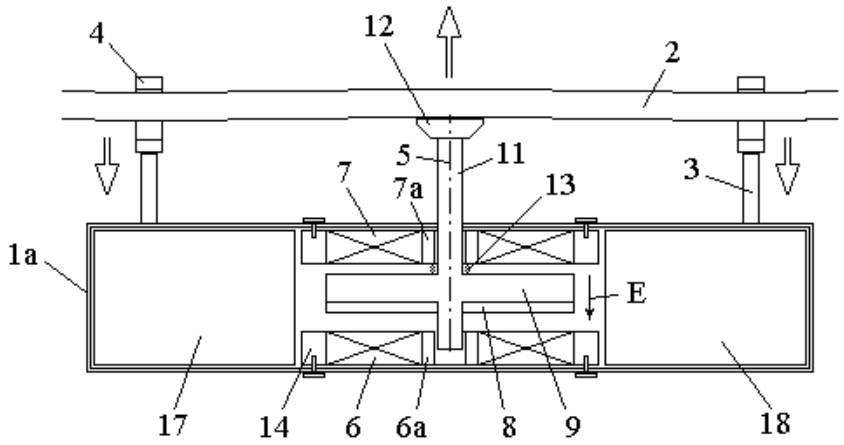


Рисунок 6.16 – Пристрій для скидання ожеледних та снігових відкладень з проводу лінії електропередач в момент спрацювання

Бойок *12* вдаряє по дроту *2* під кутом до вертикальної площини, скидаючи з нього ожеледні і снігові відкладення. При цьому через віддачу на

два підвісних кільця *4* через опори *3* діють сили, протилежні силі удару бойка, яка дорівнює сумі ЕДЗ і ЕМЗ. Оскільки опори встановлені на краях корпусу *1а*, то через зазначені сили виникає згинальний момент, що діє на провід *2* (рис. 6.16) [127]. Виникаючі під дією даного моменту коливання проводу *2* сприяють додатковому скиданню з нього ожеледних і снігових відкладень.

У перший момент більш ефективні ЕДЗ відштовхування, а в інший час після цього більш ефективні ЕМЗ притягнення. У міру переміщення дискових якорів *8* і *9* ЕДЗ зменшуються, а ЕМЗ зростають. Після закінчення токового імпульсу в ОІ *6* і *7* під дією пружини *13* бойок *12* повертається в початковий стан. Почергове підключення ОІ лівого *1а* і правого *1б* зовнішніх корпусів створює знакозмінну горизонтально спрямовану силу і відповідні коливання проводу *2*. Це сприяє ефективному скиданню ожеледних і снігових відкладень з дроту *2*.

Для перевірки ефективності пристрою та очищення проводів ЛЕП було розроблено експериментальний стенд (рис. 6.17). Стенд містить силовий трансформатор *Т1*, опорні ізолятори 2, між якими натягнутий досліджувана ділянка дроту 3 ЛЕП марки АС-50 довжиною 1,2 м, трансформатор струму 4 типу Т-0,66 УЗ-100/5, блок управління 5, ЕЯ 6 , ударний диск 7, ОІ 8, елемент кріплення 9, пружина 10, каркас 11. Вторинна обмотка силового трансформатора 1 послідовно з'єднана з трансформатором струму 4 і ділянкою досліджуваного проводу 3, забезпечуючи струм «у проводі» на рівні 0 – 40 А. Трансформатор струму 4 забезпечує блок управління 5 робочою напругою U_0 для системи моніторингу та заряду ЄНЕ, які знаходяться всередині блоку управління. Виконаний у формі диска ЕЯ 6 з'єднаний з ударним диском 7 і елементом 9 жорстко кріпиться до проводу 3 ЛЕП в середині прольоту. Блок управління 5 здійснює контроль показників вологості та температури навколишнього середовища. Пружина 10 притискає ЕЯ 6 до ОІ 8, забезпечуючи аксіальне переміщення ЕЯ з поверненням у вихідне положення.

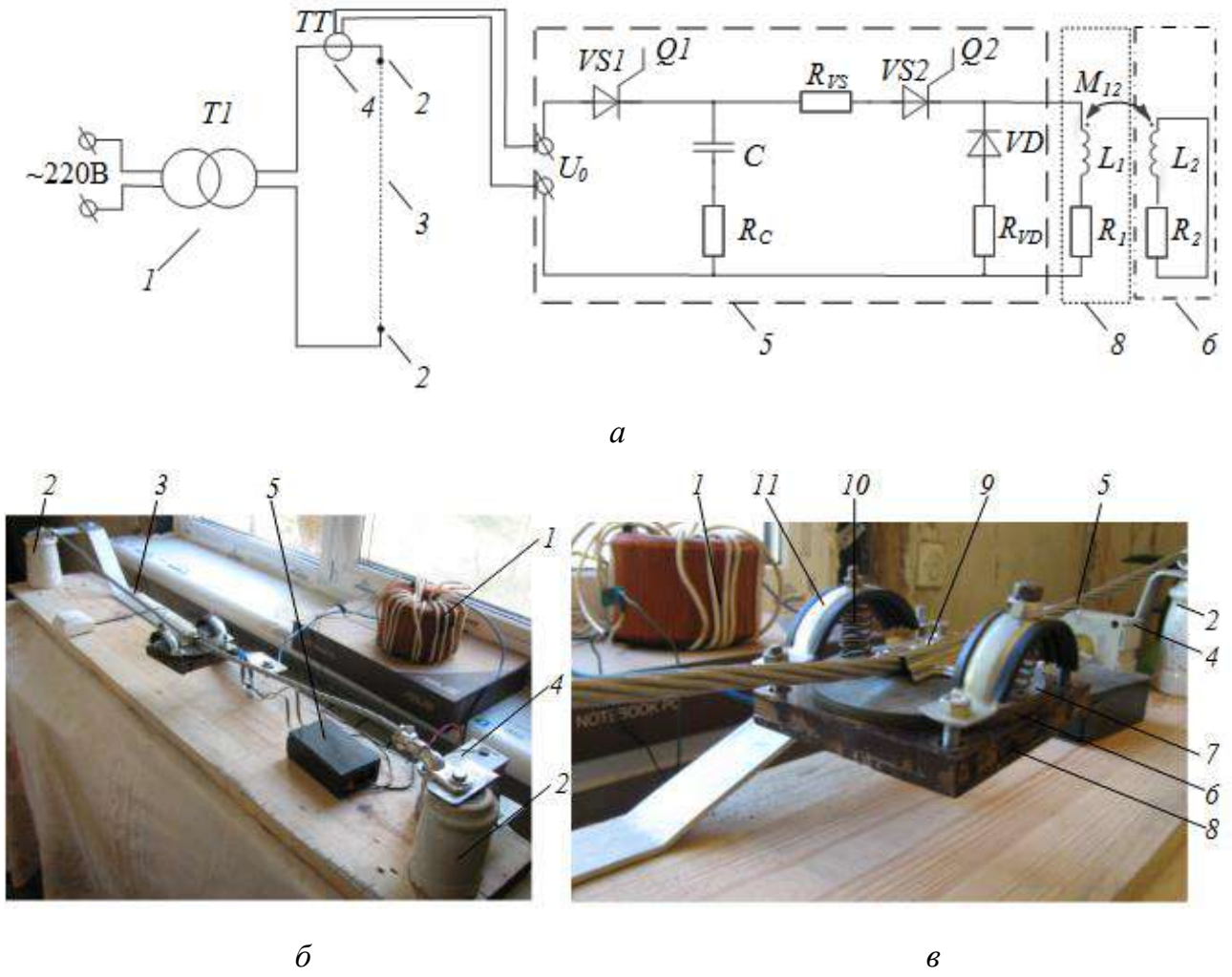


Рисунок 6.17 – Електрична схема (*а*) та експериментальний стенд пристрою ударно-механічного очищення проводів ЛЕП від налипання снігу та зледеніння: вид зверху (*б*) та спереду (*в*)

При виникненні умов налипання снігу та зледеніння блок управління 5 здійснює заряд ЄНЕ. Після зарядки ЕНЭ до заданої величини здійснюється збудження ОІ 8, магнітне поле якої збуджує струми в ЕЯ 6. ЕДЗ, що виникають при цьому, відштовхують ЕЯ від ОІ, що призводить до поперечного переміщення проводу 3 ЛЕП. Одночасно при цьому відбувається стиснення зворотних пружин 10. У процесі ударно-механічного впливу на провід 8 відбувається струшування снігу, що налип, і розтріскування ожеледиці. На провід діє подвійний удар, викликаний прямим та зворотним ходом ЕЯ щодо ОІ. На рис. 6.18 показані результати роботи пристрою очищення дроту ЛЕП від ожеледиці.

а *б*

Рисунок 6.18 – Провода ЛЕП до (*а*) і після (*б*) роботи пристрою

В експериментах використовувався провід марки АС-90 завдовжки 28 м із товщиною ожеледиці 2 – 5 мм. Пристрій дозволив ефективно позбутися вже сформованого заледеніння і не дозволив сформуватися новоствореному. Частота роботи пристрою склала 1 удар за 4 хвилини, з розрахунковою величиною силового впливу f_{zm} = 16 кН. Пристрій ефективний і для очищення дахів будинків від зледеніння та бурульок. При дії ударним диском з якорем по поверхні даху виникає ударна хвиля і відбувається розтріскування льоду, що дозволяє легко видаляти його (рис. 6.19).

а *б*

Рисунок 6.19 – Стан поверхні криши з обледенінням до (*а*) і після (*б*) роботи пристрою

6.4 Електромеханічний ударний пристрій для очищення технологічного обладнання від сипких матеріалів

Розглянемо пристрій ударно-механічної очистки технологічного обладнання від сипких матеріалів. Пристрій призначений для усунення зависань матеріалів у бункерах, очищення стінок бункерів, силосів, перевантажувальних пристроїв від завислих, налиплих, примерзлих сипких матеріалів, струшування рукавів та електродів рукавних електрофільтрів з метою регенерації фільтрів та ін.

На рис. 6.20 представлений експериментальний макет бункера, до внутрішніх стінок якого прилипає сипкий матеріал, наприклад, цемент.

Рисунок 6.20 – Експериментальний макет бункера з пристроєм ударно-механічного очищення: *1* – стінка бункера; *2* – ОІ; *3* – струмівводи; *4* – кріплення ОІ

На зовнішній поверхні однієї зі стінок бункера шириною 55 см і висотою 50 см розташований пристрій ударно-механічного очищення. Було досліджено дві конструкції пристрою, в яких є однакові ЄНЕ та ОІ, яка прикріплена до стінки бункера, що виконаний із сталі товщиною 1 мм ($0{,}1H_1$). ОІ намотана мідним дротом перетином a×b = 1,8×4,8 з числом витків N_1 = 26. Геометричні

параметри ОІ: H_1 = 5 мм, D_{ex1} = 100 мм, D_{in1} = 5 мм. Параметри ЄНЕ відповідають ЛІЕП з табл 2.1

У першому пристрої ЕЯ прилягає як до ОІ, так і до стінки бункера (рис. 6.21,а). ЕЯ виконаний із алюмінієвої прямокутної пластини з параметрами: висота $H_2 = H_1$, довжина $A = 1{,}16D_{ex1}$, ширина $B = D_{ex1}$. У другому пристрої ЕЯ відсутній і ОІ безпосередньо взаємодіє зі сталевою стінкою бункера (рис. 6.21,б). У цій установці вихровий струм, індукований магнітним полем ОІ, виникає в стінці бункера, що призводить до ЕДЗ між нею та ОІ. Експериментальне дослідження процесу ударно-механічного очищення стінок бункера від сипких матеріалів показало ефективність пристрою (рис. 6.22). Було визначено, що застосування пристрою з ЕЯ (рис. 6.21,а) не завжди доцільно. Це пов'язано з тим, що ЕЯ має певну масу та її швидкість v_z, навіть за незначному переміщенні (на відстань $\Delta z<0{,}01D_{ex1}$), нижче, швидкості переміщення стінки бункера. Однак для пристрою з ЕЯ характерно в 3 рази більш високе значення F_z і в 1,5 рази більше f_{zm}, що демонструється ступенем очищення стінок. Таким чином, при необхідності рівномірної очистки всієї поверхні бункера доцільно пристрій з ЕЯ, а при необхідності локальної очистки - пристрій без ЕЯ.

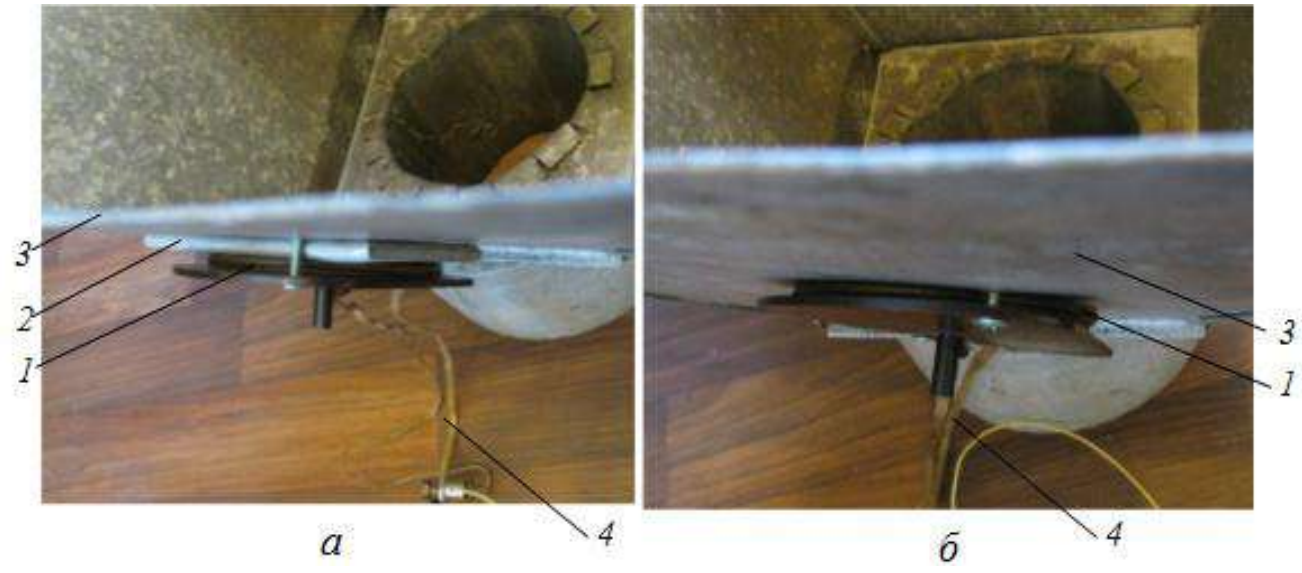


Рисунок 6.21 – Вид зверху на пристрій ударно-механічного очищення бункера з ЕЯ (*а*) та без ЕЯ (*б*): 1 – ОІ; 2 – ЕЯ; 3 – стінки бункера; 4 – струмівводи

а *б* *в*

Рисунок 6.22 – Поверхня бункера до (*а*), в процесі (*б*) та після (*в*) роботи пристрою очищення

6.5 Електромеханічні пристрої знищення інформації на цифрових накопичувачах

Для важливої інформації на цифровому накопичувачі необхідний захист від несанкціонованого доступу сторонніми особами. Для запобігання витоку інформації за наявності резервних копій доцільно її знищення. Останнім часом з'явилося сімейство пристроїв, що забезпечують знищення інформації від несанкціонованого доступу за допомогою магнітного поля, що збуджується, різного характеру. Однак у своїй зберігається можливість відновлення інформації спеціальними засобами [158 – 162].

Електромеханічний пристрій знищення інформації на цифровому накопичувачі, наприклад, флеш-накопичувачі може бути побудований на базі ЛІЕП-Е-Ф. Пристрій містить феромагнітний каркас 1, всередині якого коаксіально розташовані ОІ 2, ЕЯ 3 і феромагнітний якір-бойок 4, спрямований у бік цифрового накопичувача 5 (рис. 6.23,а). ЕЯ 3 виконаний у формі втулки та диска. Нижня стінка каркаса 1 виконана з вигином 1а цифрового накопичувача 5. У каркасі встановлені плоскі пружини 6. До верхньої кришки каркаса 1б приєднаний ізоляційний корпус 7, в якому фіксована ОІ 2. При надходженні сигналу на знищення інформації цифрового накопичувача 5 здійснюють розряд ЄНЕ. При цьому струм в ОІ 2 збуджує магнітне поле, взаємодія якого зі струмом ЕЯ створює ЕДЗ відштовхування, а взаємодія з розширеною частиною

бойка створює ЕМЗ тяжіння. Розподіл магнітного поля на момент максимуму сили показано на рис. 6.23,б. ЕДЗ та ЕМЗ переміщують якір з бойком у бік цифрового накопичувача, утворюючи в ньому отвір.

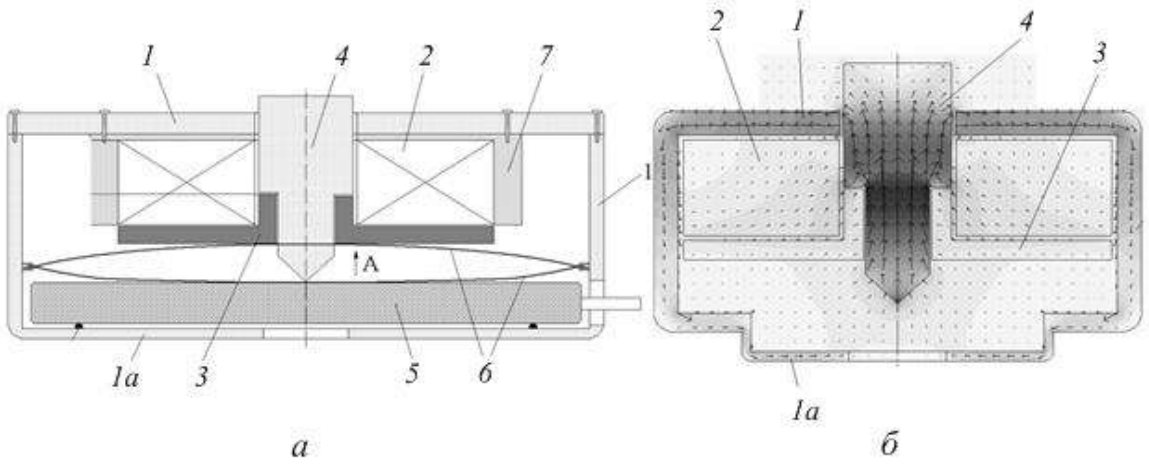


Рисунок 6.23 – Пристрій знищення інформації на цифровому накопичувачі (*а*) та розподіл індукції магнітного поля в момент максимуму ЕДЗ (*б*)

На рис. 6.24 показаний експериментальний зразок пристрою знищення інформації. Індуктор прямокутної форми містить ОІ, яка просочена епоксидною смолою з подальшим її затвердінням, та ізоляційний каркас.

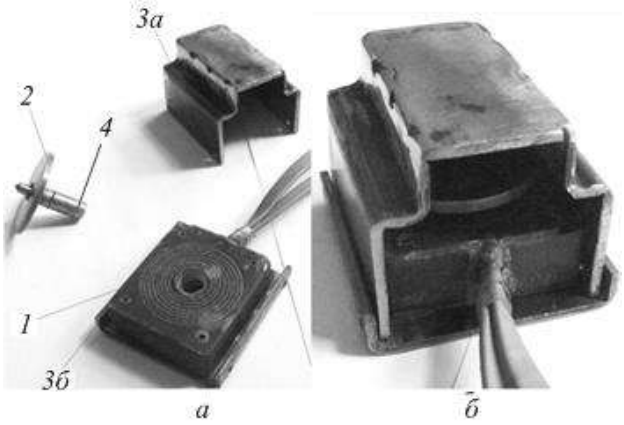
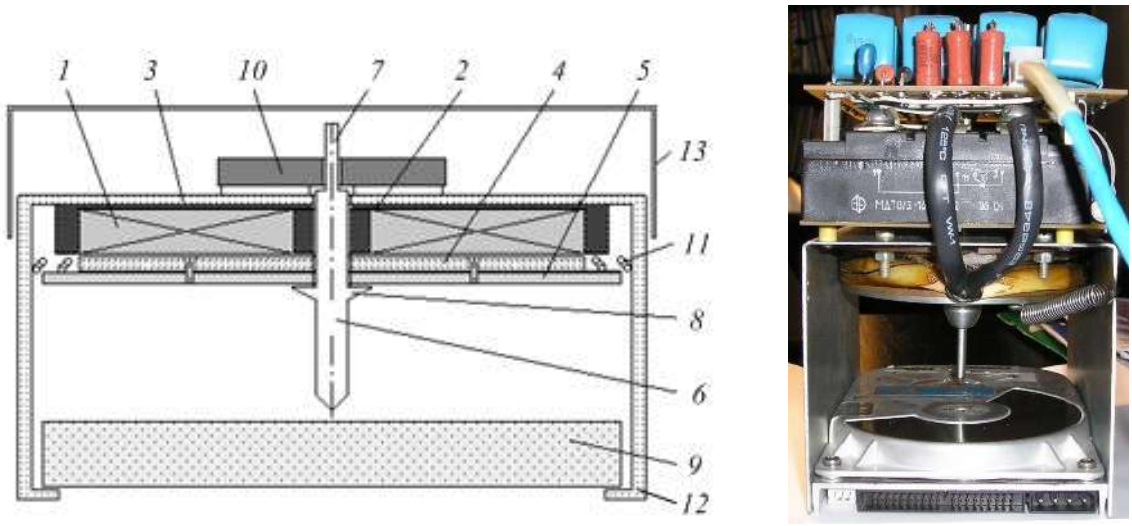


Рисунок 6.24 – Елементи (*а*) та загальний вигляд (*б*) експериментального зразка пристрою знищення інформації: *1* – індуктор; *2* – ЕЯ; *3а* – феромагнітний корпус; *3б* - феромагнітна основа; 4 – феромагнітний якір-бойок

Електромеханічний пристрій знищення інформації на жорстких магнітних дисках (НЖМД) може бути побудований на базі ЛІЕП-Е. Такий

пристрій містить нерухомий індуктор 1 з багатовитковою ОІ, яка охоплена феромагнітним екраном 2 і замонолічена епоксидною смолою (рис. 6.25).



а б

Рисунок 6.25 – Конструктивна схема (а) та пристрій (б) знищення інформації на НЖМД

Індуктор прикріплений до каркаса 3. Напроти ОІ встановлений ЕЯ 4, з'єднаний з силовим диском 5. У центрі індуктора 1, ЕЯ і силового диска виконані отвори, в яких розташований рухомий бойок 6, що має кінцеву частину 7 і завзятий виступ 8. Загострений кінець бойка 6 встановлений навпроти НЖМД 9, яке кінцева частина 7 розташована в зазорі оптичного датчика положення 10. Пружина 11, прикріплена до каркаса 3 і силової пластини 5, забезпечує щільне притискання ЕЯ 3 до індуктора 1.

Зверху пристрою встановлений захисний кожух 12. Після подачі керуючого імпульсу ОІ 1 виникає імпульс струму, який збуджує магнітне поле. Взаємодія магнітного поля ОІ та індукованих струмів у ЕЯ призводить до виникнення ЕДЗ відштовхування ЕЯ від ОІ. Якір разом з силовою пластиною штовхає бойок, загострений кінець якого пробиває НЖМД 9.

На рис. 6.26 показано пристрій знищення інформації на НЖМД, що розміщується у системному блоці комп'ютера. Було встановлено, що пробій стандартного НЖМД бойком відбувається після одного удару. У разі

пробивання НЖМД з особливо міцним корпусом, пристрій збуджує серію імпульсів для проникнення бойка на задану глибину (рис. 6.27). Диски НЖМД можуть виготовлятися із алюмінієвого сплаву або зі скла (моделі фірм Hitachi, Fujitsu). Диски, виготовлені зі скла при випробуваннях, дробилися на уламки (рис. 6.28).

а *б* *в*

Рисунок 6.26 – Вид пристрою знищення інформації на НЖМД із захисним кожухом збоку (а), спереду (б) та зверху (в) зі знятим кожухом

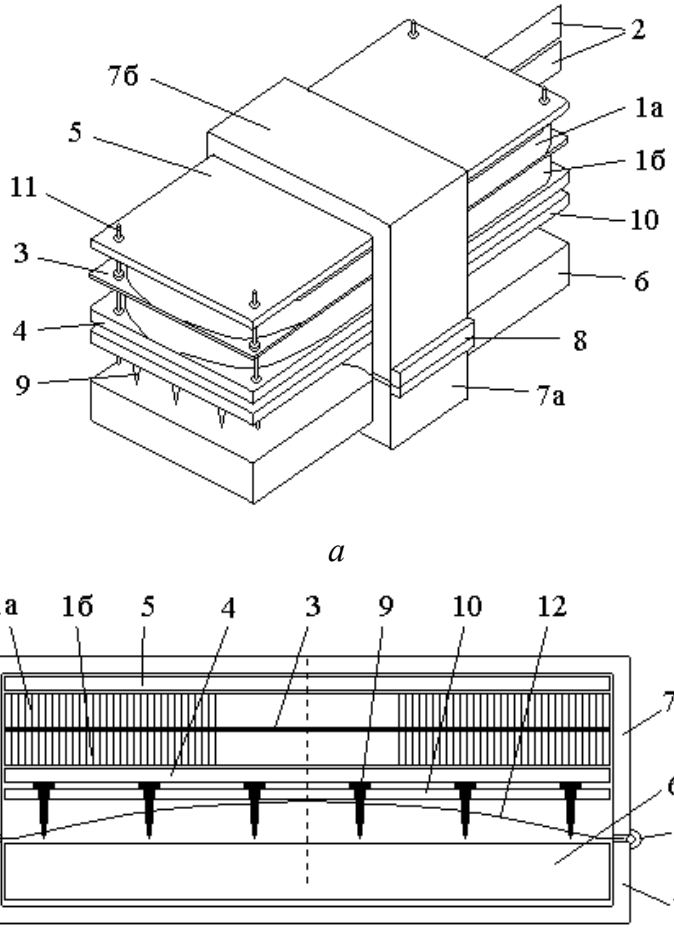
а *б* *в*

Рисунок 6.27 – Загальний вигляд НЖМД зі знятою кришкою (а), отвір у диску (б) та вм'ятина у двигуні (в) після дії пристрою

На основі перетворювача ЛІЕП-Е2 розроблено конструкцію, виготовлено та випробувано пристрій для знищення інформації на SSD накопичувачі. Пристрій містить індуктор *1*, який виконаний з двох шарів обмотки *1 а* і *1 б* з зовнішніми електричними контактами *2*, між якими розташована неметалева

пластина *3* (рис. 6.29) [108]. Виконані у формі овалу шари обмотки індуктора *1* намотані з стрічкового дроту і за допомогою епоксидної смоли з'єднані з пластиною *3*.

Рисунок 6.28 – Дроблення магнітного диска НЖМД зі скла після дії пристрою



а

б

Рисунок 6.29 – Загальний вигляд (*а*) і поперечний переріз (*б*) пристрою для знищення інформації на SSD накопичувачі

Пристрій містить РЕЯ *4* і НЕЯ *5*. Індуктор *1* зафіксовано щодо об'єкта впливу цифрового SSD накопичувача інформації *6* за допомогою фіксуючої скоби *7*, що охоплюють їх прямолінійні ділянки. Передня частина скоби *7 а* охоплює цифровий накопичувач *6*, а задня частина скоби *7 б* охоплює НЕЯ *5*. Частини скоби фіксуються між собою за допомогою рознімних фіксаторів *8*. Ударний виконавчий елемент містить упорядковано розташовані загострені бойки *9* в формі загартованих цвяхів. Капелюшок кожного бойка розташований між РЕЯ *4* і ударною пластиною *10*, а стрижні бойків виконані у формі загостреного конуса і зафіксовані в отворах ударної пластини *10*. РЕЯ *4* і ударна пластина *10* з'єднані між собою. РЕЯ *4*, НЕЯ *5*, неметалева *3* і ударна *10* пластини виконані у формі прямокутників, що відповідає формі цифрового SSD накопичувача інформації *6*. У кутових ділянках пластини *3* перпендикулярно закріплені направляючі стійки *11*, які проходять крізь направляючі отвори РЕЯ та НЕЯ і ударної пластини *10*.

Направляючі стійки приєднані до неметалевої пластини *3*. Пристрій містить плоску пружину *12*, середня частина якої взаємодіє з ударною пластиною *10*, а її кінці закріплені щодо задньої і передньої частин скоби в роз'ємних фіксаторах *8*. У вихідному стані пружини *12* своєю середньою частиною притискають ударну пластину *10* разом з РЕЯ *4* до обмотки індуктора *1б*, а обмотку *1а* до НЕЯ *5*.

При необхідності знищення інформації, розміщеної на твердотільному цифровому SSD накопичувачі, наприклад, при надходженні сигналу про несанкціонований доступ, відбувається розряд ємнісного накопичувача енергії на індуктор. При цьому відбувається переміщення ударної пластини *10* з бойками *9*, які проникають в масив цифрового накопичувача *6*, безповоротно знищуючи інформацію яка знаходилась на ньому. Крім того, РЕЯ і НЕЯ екранують магнітне поле, яке утворене індуктором, що сприятливо для близько розташованих електронних і біологічних об'єктів.

На підставі проведених досліджень був розроблений експериментальний зразок пристрою, призначеного для знищення інформації на SSD накопичувачі, який побудований на базі ЛІЕП-Е2. Для проведення експериментальних досліджень зразка використовувався електронний блок формування імпульсу *3*, ЄНЕ, акумулятор та пусковий пристрій (рис. 6.30).

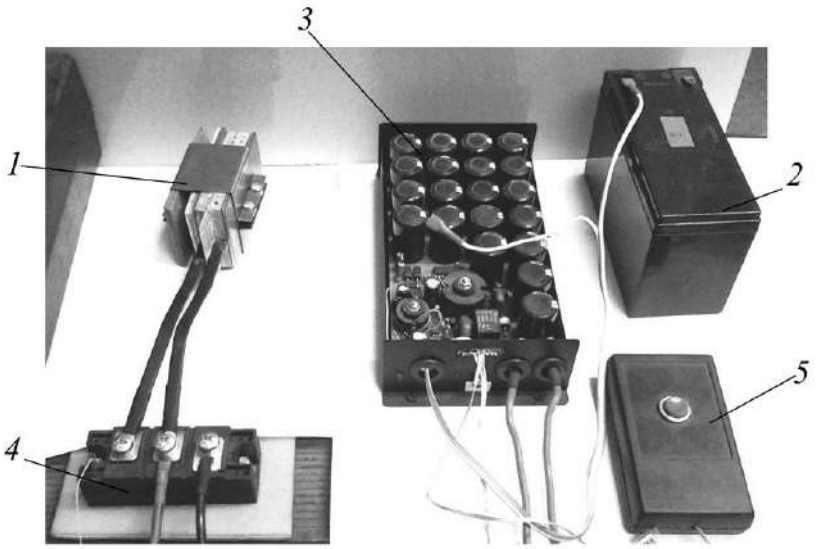
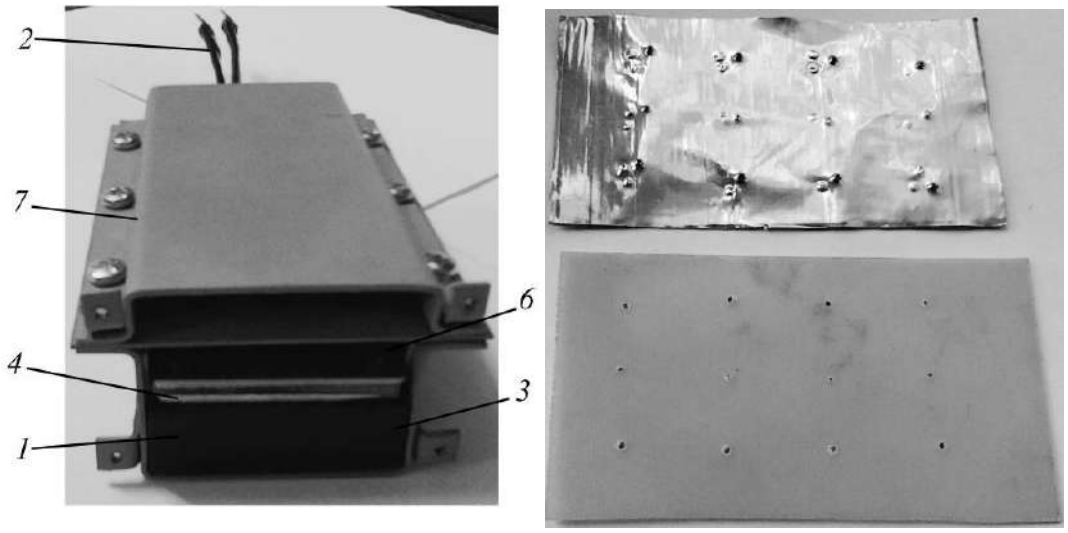


Рисунок 6.30 – Експериментальна установка для випробовування пристрою:
1 – зразок пристрою; *2* – акумулятор; *3* – електронний блок формування імпульсу збудження з ЄНЕ; *4* – діодно-тиристорний блок; *5* – пульт керування

При експериментальних дослідженнях в якості об'єкта впливу використовувалася багатошарове середовище, яке виготовлено з тонких сталевих листів, затиснутих листами ДСП і склотекстолітом. Така конструкція середовища дозволяла візуально оцінити глибину проникнення бойків в об'єкт впливу. Як показали експерименти, після спрацьовування пристрою бойок ефективно пробивав практично все багатошарове середовище, що дозволило оцінити ступінь руйнування SSD накопичувача.

На рис. 6.31 показаний модернізований дослідний зразок пристрою для знищення інформації на SSD накопичувачі і результати його впливу на багатошарове середовище. В модернізованому експериментальному зразку індуктор був покритий декоративною чорною плівкою і були вдосконалені

фіксуючі скоби, які виконували функцію зовнішнього корпусу і повністю охоплювали об'єкт впливу і НЕЯ.



а *б*

Рисунок 6.31 – Пристрій для знищення інформації на SSD накопичувачі: модернізований експериментальний зразок (*а*) і результати його впливу на багатошарове середовище (*б*): *1* – індуктор; *2* – зовнішні електричні виводи; *3* – неметалева пластина; *4* – РЕЯ; *5* – НЕЯ; *6* – багатошарове середовище; *7* – фіксуюча скоба

Для знищення інформації в корзіні серверу обмотка індуктора розміщується між НЖМД (рис. 6.32).

а б в

Рисунок 6.32 – Пристрій для знищення інформації в корзині серверу (а) та його індуктори товщиною 8 мм (в) та 1 мм (в)

В цьому випадку індуктор діє своїм магнітним полем на НЖМД і механічно руйнує його активні електропровідні елементи за рахунок впливу на них ЕДЗ зі сторони ОІ**.**

6.6 Балістичний гравіметр для вимірювання прискорення вільного падіння з індукційно-динамічною катапультою

Існують гравіметри для визначення абсолютного значення прискорення вільного падіння g шляхом вимірювання параметрів вільного польоту вертикально підкинутої догори пробного тіла. Основними елементами такого гравіметра є: вакуумна камера з розміщеної в ній катапультою для підкидання пробного тіла у вигляді куткового оптичного відбивача, лазерний інтерферометр переміщень, електронно-рахункова система для обробки інтерференційного сигналу з виходу інтерферометра з метою обчислення g і керування роботою катапульти.

Відомий балістичний гравіметр, в якому катапульта для підкидання пробного тіла виконана у вигляді якоря соленоїда і напрямних елементів для вертикального руху якоря. Недоліком катапульти з соленоїдним електромагнітним приводом є те, що при кидку пробного тіла наявна віддача, яка через механічний зв’язок діє на рахункову систему – лазерний інтерферометр, збуджуючи в ньому вертикальні коливання і вносячи похибку у результат виміру g.

Відомий балістичний гравіметр, який містить пробне тіло з оптичним відбивачем, вакуумну камеру, каретку штовхача з напрямними елементами, соленоїдний електромагнітний привод, що складається з якоря і котушки, причому каретка штовхача зв’язана з якорем соленоїда рівноплечим пантографом, забезпечуючи при цьому зменшення віддачі катапульти при підкиданні пробного тіла. В даному гравіметрі за рахунок зменшення віддачі катапульти при підкиданні пробного тіла забезпечується підвищення точності виміру прискорення вільного падіння g.

Недоліком відомого технічного рішення є багатоступенева передача енергії від електричного джерела, що живить обмотку котушки, на вертикальне переміщення каретки з пробним тілом. Забезпечення зазначеного перетворення енергії здійснюється через переміщення якоря вниз, осьове розтискання і радіальне стискання пантографа відносно нерухомої осі, механічна взаємодія підшипників каретки і якоря з напрямними елементами. При осьовому розтисканні пантографа відбувається механічна взаємодія значної кількості шарнірних елементів як між собою, так і з нерухомою віссю, яка з'єднана з вакуумною камерою. Оскільки зазначений електро-, магнітної, механічний штовхач механічно пов'язаний з іншими нерухомими елементами, наприклад зі стінками вакуумної камери, то під час роботи балістичний гравіметр зазнає дії різних механічних коливань, спричинених ударно-вібраційними процесами.

Через механічну взаємодію рухомих з нерухомими елементами при роботі у вакуумі необоротно змінюються контактні поверхні: виникають мікроскопічні тріщини, руйнуються поверхневі, наприклад, окисні плівки, збільшується коефіцієнт тертя, а знос елементів може досягнути неприпустимих величин, які виключають нормальне функціонування гравіметра.

Відомий балістичний гравіметр з індукційно-динамічною катапультою для симетричного способу вимірювання прискорення вільного падіння, який містить пробне тіло з оптичним кутковим відбивачем, вакуумну камеру, штовхач пробного тіла, напрямні елементи, електромеханічний привод, який складається з коаксіально розташованих якоря і котушки з обмоткою. Катапульта виконана у вигляді обмотки дискової форми, яка підключається до ємнісного накопичувача енергії і розташована в котушці з ізоляційного матеріалу, якір виконаний у вигляді диска з електропровідного матеріалу, нижня сторона якого повернена до верхній стороні обмотки котушки, а верхня сторона з'єднана з силовим штовхаючим диском так, що упорядковано розташовані в тангенціальному напрямку на одному радіусі силового диска, принаймні, три отвори з підшипниками охоплюють напрямні елементи, які

виконані у вигляді вертикальних стійок круглого перерізу. Обмотка з'єднана з ємнісним накопичувачем енергії за допомогою двох зустрічно-паралельно з'єднаних керованих тиристорів, один з яких забезпечує початкове відштовхування, а інший – наступне гальмування якоря відносно обмотки котушки. Катапульта здійснює безпосередню передачу енергії від електричного джерела, що живить обмотку котушки, на вертикальне переміщення пробного тіла. При такому електромеханічному перетворенні енергії за допомогою магнітного поля не відбувається механічної взаємодії різних механічних елементів між собою і з вакуумною камерою.

Основний недолік балістичного гравіметра полягає у створенні короткочасного та потужного силового імпульсу при підкиданні якоря з пробним тілом вертикально вверх, який викликає автосейсмічні коливання фундаменту та всіх механічних елементів гравіметра. Внаслідок цих коливань виникає відповідна складова похибки вимірювання прискорення вільного падіння g.

Розглянемо балістичний гравіметр для симетричного способу вимірювання прискорення вільного падіння з індукційно-динамічною катапультою, яка забезпечує знижені автосейсмічні коливання фундаменту. Гравіметр містить пробне тіло 1 з оптичним кутковим відбивачем 2, які розміщені в вакуумній камері 3 (рис. 6.33). Зверху камери 3 розташований лазерний випромінювач 4. Вакуумна камера має масивне дно 5, на якому встановлено демпфер 6, що тримає силову плиту 7. На плиті 7 розміщені індуктор катапульти, який включає каркас 8 і обмотку 9, та напрямні стійки 10. Коаксіально з обмоткою 9 індуктора встановлено якір 11, який виконаний у вигляді диска з електропровідного матеріалу. Якір 11 прикріплений до силового диску 12, на якому встановлено пробне тіло 1. На краях силового диску 12 розміщені підшипники 13, які охоплюють напрямні стійки 10. В верхній частині стійки 10 приєднані до вакуумної камери 3 за допомогою пружних демпферів 14. Масивне дно 5 вакуумної камери встановлено на фундаменті 15.

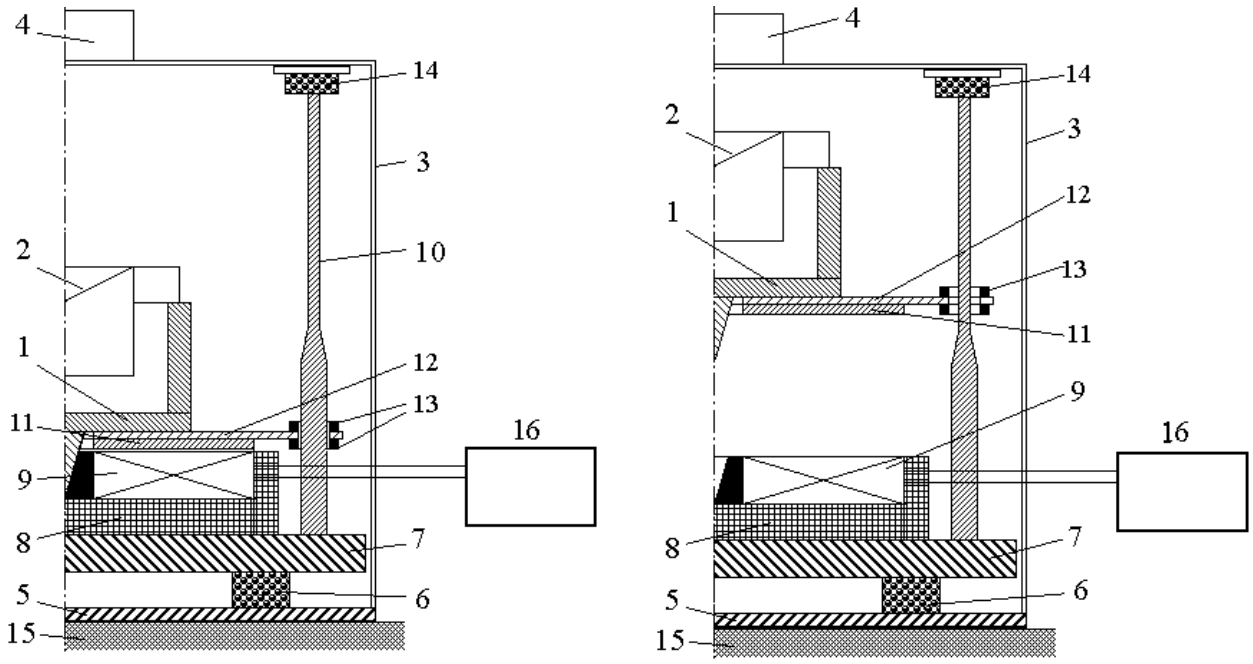


Рисунок 6.33 – Схема гравіметра у вихідному стані (а) та в момент вільного польоту якоря з пробним тілом (б)

Обмотка 9 індуктора індукційно-динамічної катапульти з'єднана з джерелом живлення 16, яке включає блок живлення постійного струму 17, секції C_1, C_2,..., C_n ємнісного накопичувача енергії, тиристори VS_1', VS_2',..., VS_n' секцій ємнісного накопичувача енергії, які забезпечують підкидання якоря 11 з пробним тілом 1 вверх, та тиристори VS_1'', VS_2'',..., VS_n'' секцій ємнісного накопичувача енергії, які забезпечують початкове живлення 1, 2, ..., *n*-ї секцій ємнісного накопичувача енергії та гальмування якоря 11 при падінні вниз (рис. 6.34).

Пара тиристорів VS_1' і VS_1'', VS_2' і VS_2'',..., VS_n' і VS_n'' з'єднані з секціями C_1, C_2,..., C_n ємнісного накопичувача енергії зустрічно-паралельно. Тиристори підключені до блоку керування 18. Тиристори VS_1', VS_2',..., VS_n' секцій ємнісного накопичувача енергії, які забезпечують підкидання якоря 11 з пробним тілом 1 вверх, приєднані до пускового пристрою 19 блоку керування 18. Пусковий пристрій 19 забезпечує послідовне надходження сигналів на відкриття тиристорів VS_1', VS_2',..., VS_n'. Тиристори VS_1'', VS_2'',..., VS_n'' секцій ємнісного накопичувача енергії, які забезпечують початкове живлення 1, 2, ...,

n-ї секцій ємнісного накопичувача енергії та гальмування якоря 11 при падінні вниз. підключені до пускового пристрою 20 блоку керування 18, який забезпечує їх відкриття.

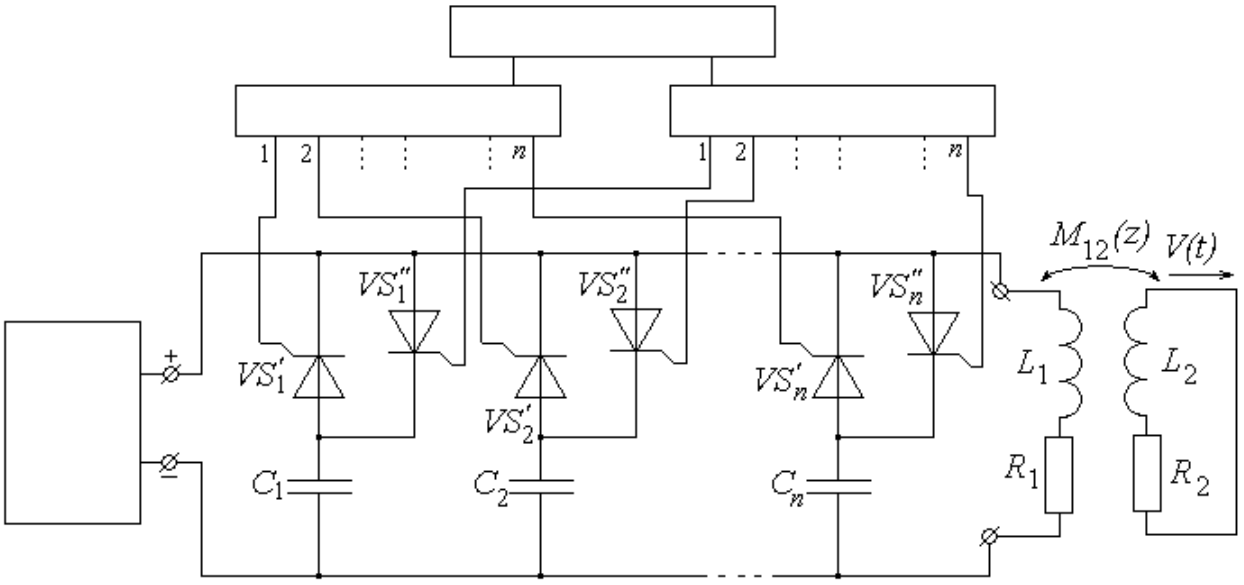
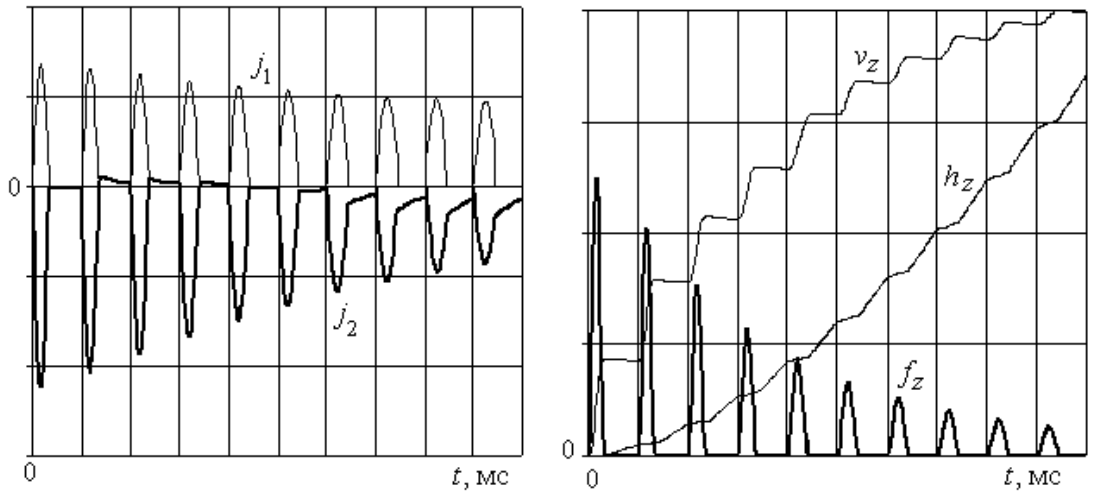
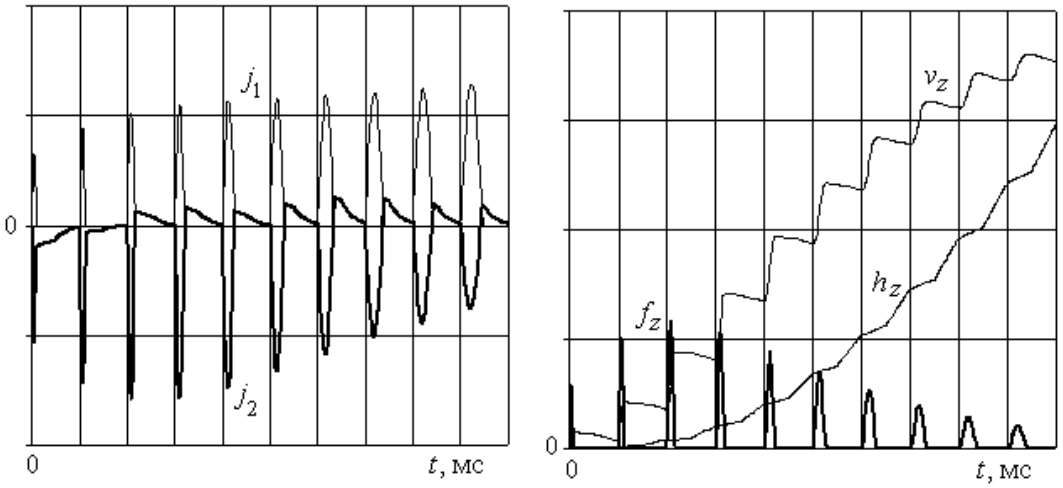


Рисунок 6.34 – Електрична схема балістичного гравіметра з індукційно-динамічною катапультою

Ємність секції C_{i+1} ємнісного накопичувача енергії, яка відкривається для підкидання якоря 11 з пробним тілом 1 вверх при надходженні сигналу від пускового пристрою 19 блоку керування 18, більша за ємність C_i секції, яка була відкрита попереднім сигналом від цього пускового пристрою 19. Тиристори VS_1'', VS_2'',..., VS_n'' секцій ємнісного накопичувача енергії, які забезпечують початкове живлення 1, 2, ..., *n*-ї секцій ємнісного накопичувача енергії та гальмування якоря 11 при падінні вниз, підключені до пускового пристрою 20 блоку керування 18 так, що він здійснює одночасне або послідовне їх відкриття. Ємність секцій C_1, C_2,..., C_n ємнісного накопичувача енергії, які послідовно відкриваються для підкидання якоря з пробним тілом вверх, збільшується лінійно або пропорційно величині вертикального переміщення якоря (рис. 6.35).



а



а *б*

Рисунок 6.35 – Густина струму в ОІ j_1 і в ЕЯ j_2 (а) та ЕДЗ f_z, що діє на якір, швидкість v_z і переміщення h_z якоря вздовж вертикальної осі z при збудженні пакетом імпульсів від 1, 2, ., n-ї секцій ЄНЕ, що мають однакові ємності (*а*) та ємність яких збільшується лінійно (*б*)

Виконання ємнісного накопичувача енергії у вигляді ряду секцій, з'єднаних паралельно, дозволяє підключати їх до обмотки індукційно-динамічної катапульти в різні моменти часу. За рахунок цього істотно зменшується амплітуда та збільшується тривалість дії силового імпульсу, який діє між обмоткою котушки та якорем катапульти.

Збільшення ємностей секцій ємнісного накопичувача енергії, які послідовно відкриваються для підкидання якоря з пробним тілом вверх, є лінійним або пропорційним величині вертикального переміщення якоря

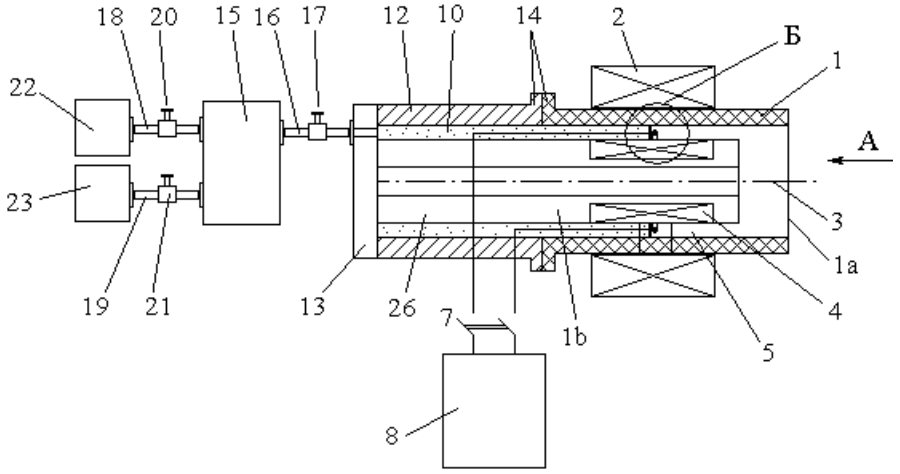
відносно обмотки котушки. Перший варіант легше реалізувати на практиці, а другий варіант більш ефективний для зменшення амплітуди силового імпульсу.

Тиристори, які забезпечують гальмування якоря при падінні вниз, підключені до пускового пристрою блоку керування, який забезпечує їх відкриття для двох функцій: 1) початкове живлення секцій ємнісного накопичувача енергії, 2) гальмування якоря. Ці тиристори можуть бути підключені до блоку керування так, що він здійснює одночасне або послідовне їх відкриття. Перший варіант технічно легше здійснити на практиці, а другий варіант дозволяє здійснити більш плавне гальмування якоря з пробним тілом та забезпечити початкове живлення секцій ємнісного накопичувача енергії більш низьким струмом.

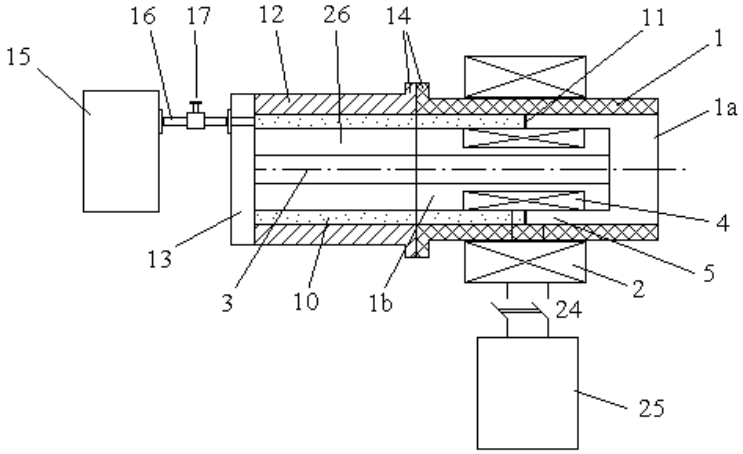
6.7 Газодетонаційний прискорювач плазмового утворення в повітряному середовищі

Розглянемо газодетонаційний прискорювач плазмового кільця в повітряному середовищі атмосферного тиску, в якому забезпечується підвищення питомої потужності, простота в управлінні роботою, підвищення надійності, зменшення витрат під час виготовлення і експлуатації, зменшення габаритних розмірів. Газодетонаційний прискорювач складається з циліндричної напрямної труби 1, зовнішнього циліндричного магніту 2 і системи термічної іонізації речовини до плазмового стану, які коаксіально розташовані уздовж осі 3 (рис. 6.36). Один з торців 1a циліндричної напрямної труби 1 є відкритим і знаходиться в повітряному середовищі, а на іншому її торці 1b розташована система формування газового потоку.

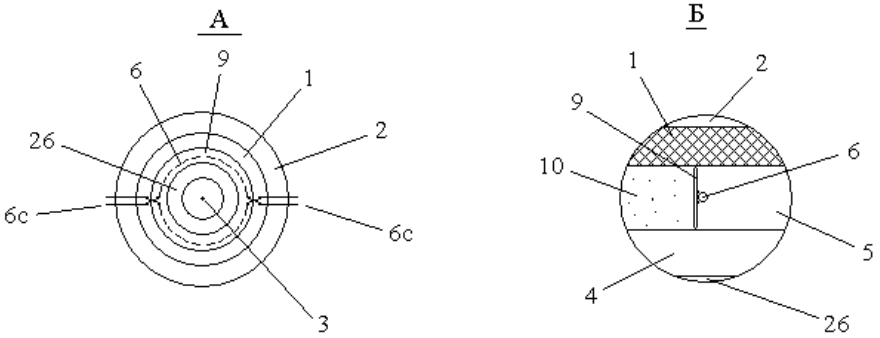
Зовнішній циліндричний магніт 2 охоплює напрямну трубу 1. Система термічної іонізації речовини до плазмового стану розташована всередині напрямної труби 1. Труба 1 виконана з ізоляційного матеріалу, наприклад, із склотекстоліту.



а



б



в г

Рисунок 6.36 - Схема газодетонаційного прискорювача плазмового кільця в повітряному середовищі: а – електропровідне кільце виконано у вигляді дроту; б – електропровідне кільце виконано у вигляді фольги у формі плоского диску; в – вид А; г – вид Б

Усередині напрямної труби 1 коаксіально розташовано внутрішній циліндричний магніт 4, який утворює з зовнішнім циліндричним магнітом

магнітну систему, яка формує поперечну по відношенню до осі 3 компоненту індукції магнітного поля. Система термічної іонізації речовини складається, щонайменше, з електропровідного кільця, яке розташовано в зазорі 5 між напрямною трубою 1 і внутрішнім циліндричним магнітом 4. На рис. 6.37 електропровідне кільце виконано у вигляді дроту 6, та яке складається з двох однакових частин 6a та 6b,.кінці 6c яких з'єднані між собою і підключені через комутатор 7 до високовольтного імпульсного накопичувача енергії 8.

Дріт 6 з'єднано з фольгою 9 із діелектричного матеріалу, який обмежує вихід газодетоційного газу 10 із напрямної труби 1. Електропровідне кільце виконано у вигляді фольги 11 в формі плоского диску, що обмежує вихід газодетонаційного газу 10 з напрямної труби 1.

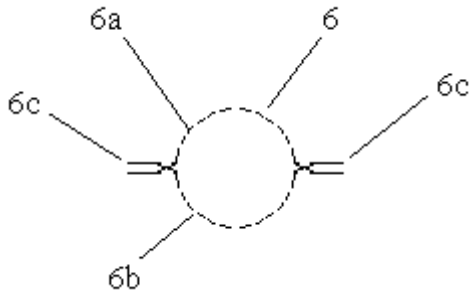


Рисунок 6.37 – Електропровідне кільце у вигляді дроту, що складається з двох однакових частин, кінці яких з'єднані між собою

Система формування газового потоку складається з газодетонаційної труби 12, яка закрита торцевою стінкою 13 з одного з торців, і системи подачі газодетонаційного газу 10. Газодетонаційна труба 12 коаксіально розташована і з'єднана з напрямною трубою 1 за допомогою з'єднувальних фланців 14. Газодетонаційна труба 12 виконана з матеріалу підвищеної міцності, наприклад, з нержавіючої сталі.

Система подачі газодетонаційного газу 10 складається з ємності 15 для газодетонаційного газу 10 підвищеного тиску, яка через трубопровід 16 і клапан 17 приєднана до торцевої стінки 13 газодетонаційної труби 12. До ємності 15 за допомогою трубопроводів 18 і 19, на яких встановлені клапани,

відповідно 20 і 21 під'єднані ємність 22 зі стисненим газом і ємність з окислювачем 23, наприклад, киснем.

Зовнішній 2 і внутрішній 4 циліндричні магніти можуть бути виготовлені у вигляді висококоерцитивних постійних магнітів. Зовнішній 2 і внутрішній 4 циліндричні магніти можуть бути виконані у вигляді електромагнітів, які через комутатор 24 підключаються до джерела живлення 25. Це джерело живлення може бути змінного струму високої частоти або імпульсним, наприклад, ємнісним накопичувачем енергії. Внутрішній циліндричний магніт 4 встановлено на внутрішній циліндричній напрямній трубі 26, яка прикріплена до торцевої стінки 13 газодетонаційної труби 12.

Газодетонаційний прискорювач працює наступним чином. Відкриваються клапани 20 і 21 через трубопроводи 18 і 19 з ємностей 22 і 23 стиснений горючий газ і окислювач подаються в ємність 15, утворюючи газодетонаціонний газ 10. Після цього відкривають клапан 17 і через трубопровід 16 газодетонаціонний газ 10 підвищеного тиску надходить в газодетонаційну 12 і в напрямну 1 труби. Клапани 20, 21 і 17 закривають.

За рахунок наявності фольги 9 з діелектричного матеріалу і електропровідної фольги 11 в формі плоского диска підвищується густина газодетонаційного газу 10 в газодетонаційній 12 і напрямних 1 трубах, перешкоджаючи його виходу в навколишнє повітряне середовище через відкритий торець 1а циліндричної напрямної труби 1.

Відразу ж після цього замикають комутатор 7, і високовольтний імпульсний накопичувач енергії 8 підключається до дроту 6 в формі кільця. Відбувається при цьому електричний вибух, який переводить дріт в плазмений стан в формі кільця, вісь якого поєднана з віссю напрямної труби 1. Під час вибуху дроту 6 відбувається детонація газодетонаційного газу 10 підвищеної густини. Внаслідок цього газ з високою швидкістю витікає через газодетонаційну трубу 12, з'єднувальні фланці 14 і напрямну трубу 1 в напрямку її відкритого торця 1а. Цей газовий потік прискорює плазмове

створення в формі кільця в зазорі 5 між напрямною трубою 1 її внутрішнім циліндричним магнітом 4 у цьому ж напрямку.

Під час руху плазмове кільце перетинає поперечну по відношенні до осі 3 компоненту індукції магнітного поля. У плазмовому кільці індукується вихровий струм, який додатково розігріває плазмове кільце і збільшує в ньому енергію магнітного поля. Внаслідок цього плазмове кільце, що має високу питому потужність, з високою швидкістю вилітає з напрямної труби 1 на значну відстань.

За умови виконання зовнішнього 2 та внутрішнього 4 циліндричних магнітів у вигляді електромагнітів після наповнення газодетонаційної 12 і напрямної 1 труб газодетонаційним газом 10 замикають комутатор 24. Імпульсне або високочастотне джерело живлення 25 збуджує в електропровідний фользі 11 в формі плоского диску вихровий струм високої густини. Внаслідок чого електричний вибух переводить фольгу 11 в плазмовий стан в формі кільця з наступною детонацією газу 10 і переміщенні його в напрямку відкритого торця 1а циліндричної напрямної труби 1.

На базі запропонованої концепції розроблено дві конструкції газодетонаційного прискорювача плазмового кільця в повітряному середовищі атмосферного тиску. В першій конструкції газодетонаційного прискорювача обмеження витоку газу здійснюється зовнішньою мембраною, яка встановлена на торці напрямної труби. Внутрішній циліндричний магніт, який утворює з зовнішнім циліндричним магнітом магнітну систему, знаходиться всередині напрямної труби. В цій конструкції напрямна труба виконана з ізоляційного матеріалу, наприклад, склотекстоліту. В другій конструкції газодетонаційного прискорювача обмеження газу здійснюється внутрішньою мембраною, на якій закріплено електропровідне кільце (виток мідного проводу) системи термічної іонізації речовини (рис. 6.38). В цій конструкції магнітна система винесена на зовнішній торець прискорювача. Мембрана, що обмежує витік газу, розташована між напрямною трубою і магнітною системою. В цій конструкції

напрямна труба може бути виконана металевою, наприклад, з нержавіючої сталі.

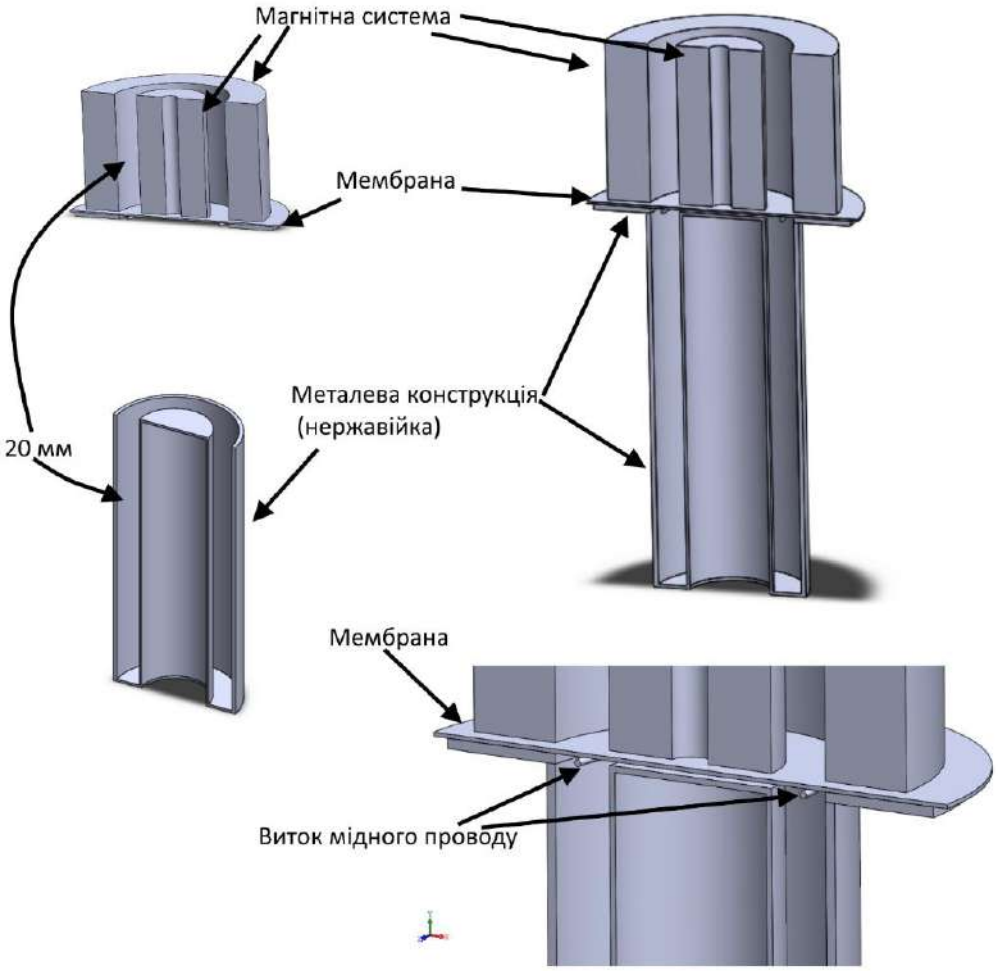
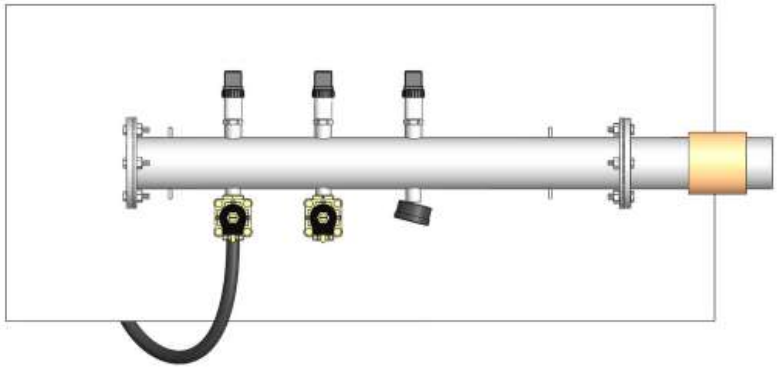


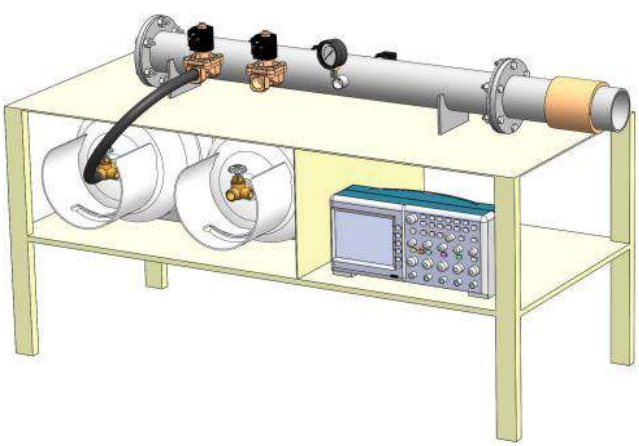
Рисунок 6.38 – Конструкція газодетонаційного прискорювача плазмового кільця, у якого магнітна система розташована зовні напрямної труби

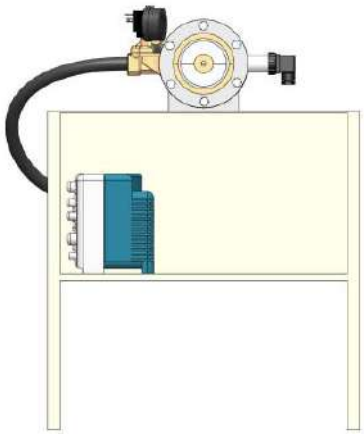
Внутрішній циліндричний магніт спільно з зовнішнім циліндричним магнітом утворює магнітну систему, яка формує поперечну компоненту індукції магнітного поля по відношенню до осі напрямної труби. Ця магнітна система дозволяє індукувати в рухомому плазмовому кільці вихровий струм, що збільшує час існування плазмового утворення та відстань вильоту з напрямної труби. За рахунок магнітної системи здійснюється збільшення магнітної енергії у плазмовому кільці, що прискорюється.

На рис. 6.39 показано загальний вигляд газодетонаційного прискорювача плазмового кільця з магнітною системою, яка розташована зовні напрямної труби.



а





б в

Рисунок 6.39 – Загальний вигляд газодетонаційного прискорювача плазмового кільця з магнітною системою, яка розташована зовні напрямної труби: а – загальний вигляд зверху; б – загальний вигляд збоку; в – загальний вигляд спереду

Таким чином, підвищення надійності, зниження витрат і зменшення габаритних розмірів пристрою досягається за рахунок відсутності складних механічних, електронних і електромагнітних пристроїв, наприклад, турбіни і її приводного двигуна і більш простішої магнітної системи. За рахунок імпульсного режиму роботи і відсутності складних пристроїв знижуються енерговитрати на експлуатацію.

ВИСНОВКИ

Проведений аналіз стану досліджень і розробок в області лінійних імпульсних електромеханічних перетворювачів силового і швидкісного призначення показав, що в якості ударно-силових і прискорювальних пристроїв використовуються перетворювачі індукційного, електродинамічного та електромагнітного типів.

ЛІЕП використовуються в багатьох сферах науки, техніки та безпеки. Можна відзначити такі застосування цих перетворювачів: ударно-конденсаторне зварювання, обробка металів, штамповка, клепально-збірні й формувальні операції, магнітно-індукційні преси для кераміки, випробувальні системи на ударні навантаження, швидкодіючі електричні апарати, пристрої знищення інформації при несанкціонованому доступі, клапанно-коммутаційна апаратура, сейсмічні джерела, пристрої очищення бункерів від залишків матеріалів та ліній електропередач від обледеніння, пускові установки та ін.

Найбільш розповсюдженими є ЛІЕП індукційного типу з масивним або багатовитковим короткозамкненим електропровідним якорем, лінійні імпульсні електромеханічні перетворювачі електромагнітного типу з феромагнітним якорем та електромеханічні перетворювачі електродинамічного типу з багатовитковим котушковим якорем, який електрично з’єднаний з обмоткою індуктора.

Для розрахунку ЛІЕП удосконалено математичну модель за рахунок включення феромагнітного, котушкового та суцільного електропровідного якорів, які взаємодіють з рухомим якорем. Математична модель містить взаємопов’язані електричні, магнітні, механічні та теплові процеси і враховує магнітні та теплофізичні нелінійні залежності;

Встановлено, що практично всі перетворювачі мультиякірних конфігурацій мають більш високу ефективність, у порівнянні з перетворювачем з одним якорем. Так, у порівнянні з перетворювачем з одним електропровідним якорем перетворювач силового призначення з котушковим і суцільним

електропровідним якорями забезпечує збільшення амплітуди електродинамічних зусиль в 1,46 рази та величину імпульсу електродинамічних зусиль в 2,09 рази.

Встановлено вплив коливально-загасаючої, аперіодичної та аперіодичної з підживленням форм струмів збудження на ефективність перетворювачів мультиякірних конфігурацій. Показано що в ЛІЕП силового призначення величина імпульсу електродинамічних зусиль в залежності від форми струму збудження збільшується в 2,2–2,6 рази у порівнянні з перетворювачем з одним суцільним електропровідним якорем.

Проведено експериментальні дослідження ЛІЕП мультиякірних конфігурацій з одночасним вимірюванням струму збудження, переміщення, сили виконавчого елементу, індукції магнітного поля розсіювання та температури обмотки індуктора. Це дозволило визначити основні показники перетворювачів силового та швидкісного призначення й підтвердити основні теоретичні результати.

Збудження ЛІЕП від секцій ємнісного накопичувача енергії серією імпульсів дозволяє за рахунок розтягування у часі процесу силового впливу суттєво зменшити амплітуду електродинамічної сили, яка проявляється як сила віддачі. Для перетворювачів, що працюють у швидкісному режимі, доцільно збільшення показника розподілу ємностей по секціях ЄНЕ до певної величини , а для перетворювача, що працює в силовому режимі, доцільно використовувати однакові ємності для всіх секцій ЄНЕ.

Збудження ЛІЕП індукційного типу від джерела змінного струму дозволяє при роботі ЛІЕП в ударно-силовому режимі багаторазово збільшувати час силової дії на виконавчий елемент. Така тривала силова дія необхідна в пресах з великим діапазоном енергії впливу, у приводах станів холодної прокатки, у вібросмішувачах, дозаторах, насосах, у випробувальних комплексах для перевірки відповідальної апаратури на силові навантаження, в магнітно-імпульсних пристроях для пресування порошків кераміки, електродинамічної обробки зварних з'єднань та ін.

Встановлено, що силові та швидкісні показники ЛІЕП електродинамічного типу вищі, ніж у ЛІЕП індукційного типу при виконанні якорів у вигляді багатовиткових обмоток. Однак необхідно враховувати, що конструктивно ЛІЕП електродинамічного типу є більш складним через наявність гнучких або ковзних контактів для живлення обмотки якоря. В цьому перетворювачі між обмотками існує електрична і магнітна зв'язок, а в ЛІЕП індукційного типу – лише магнітна.

Встановлено вплив вибухомагнітного генератора на показники ЛІЕП індукційного типу. Встановлено, що за умови зростання початкової індуктивності котушки цього компактного генератора відбувається зростання коефіцієнта посилення енергії.

Запропоновано та експериментально апробовано ЛІЕП, призначений для метання плазмового формування в атмосферному середовищі. В його основі покладено формування газоплазмового середовища у атмосферному середовищі шляхом електричного вибуху провідника в формі кільця, індукування вихрового струму у плазмовому формуванні та забезпеченні умов для накопичення енергії магнітного поля у плазмовому формуванні шляхом переривання магнітного зв’язку між індуктором та плазмовим формуванням.

Запропоновано та випробувано на базі ЛІЕП з котушковим якорем та двома електропровідними якорями модель електромагнітної катапульти безпілотного літального апарату. На базі перетворювача з електропровідним та феромагнітним якорями запропоновані конструкції магнітно-імпульсного пресу для керамічних порошкових матеріалів та електромеханічного пристрою для скидання ожеледних і снігових відкладень з проводу лінії електропередачі. На базі перетворювача з двома електропровідними якорями запропоновано конструкцію та випробувано пристрій для знищення інформації на твердотільному цифровому SSD накопичувачі.

Запропоновано індукційно-динамічною катапультою балістичного лазерного гравіметра, призначеного для вимірювання прискорення вільного падіння, що забезпечує знижені автосейсмічні коливання фундаменту. В цьому

гравіметрі ємнісний накопичувач енергії виконаний у вигляді ряду секцій, з’єднаних паралельно. Це дозволяє підключати їх до обмотки індукційно-динамічної катапульти в різні моменти часу. За рахунок цього істотно зменшується амплітуда та збільшується тривалість дії силового імпульсу, який діє між обмоткою котушки та якорем катапульти.

Запропоновано концепцію газодетонаційного прискорювача плазмового кільця в повітряному середовищі атмосферного тиску, в якому забезпечується підвищення питомої потужності, простота в управлінні роботою, підвищення надійності, зменшення витрат під час виготовлення і експлуатації, зменшення габаритних розмірів.

Таким чином, лінійні імпульсні електромеханічні перетворювачі, які забезпечують розгін виконавчого елементу на короткій активній ділянці до високої швидкості та забезпечують потужні силові імпульси при незначному його переміщенні є перспективним напрямком розвитку електромеханіки. Вони характеризуються короткочасним робочим режимом, значними імпульсними електромагнітними та механічними навантаженнями, які суттєво перевищують аналогічні показники традиційних лінійних електродвигунів з тривалим режимом роботи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Чемерис В. Т. Імпульсні електромеханічні перетворювачі поступального та обертального руху / В. Т. Чемерис // Энергетика и энергосбережение. – 2012. – № 5(1). – С. 9-10.
2. Bissal A., Comparison of two ultra – fast actuator concept / A. Bissal, J. Magnusson, G. Engdahl // IEEE Transsactions on Magnetics. – 2012. – Vol. 48, № 11. – P. 3315-3318.
3. Косцов Э. Г. Микроэлектромеханический ускоритель твердотельных объектов / Э. Г. Косцов // Автометрия. – 2012. – Т. 48, № 4. – С. 93-103.
4. Туманов И. Е. Параметрический электромагнитный возбудитель низкочастотных механических колебаний для систем контроля, измерения и дозирования массы многофракционных жидких продуктов / И. Е. Туманов // Электротехника. – 2013. – № 8. – С. 48-52.
5. Cho D. J. Novel electromagnetic actuator using a permanent magnet and an inter – locking mechanism for a magnetic switch / D. J. Cho, D. K. Woo, J. S. Roetal // IEEE Transsactions on Magnetics. – 2013. – Vol. 49, № 5. – P. 2229-2232.
6. Jeong Y. W. High-speed AC circuit breaker and high – speed ORC/ Y. W. Jeong, H. W. Lee, S. W. Lee, Y.G. Kim // 22nd International Conference on Electricity Distribution, 10-13 June 2013. – Stockholm, 2013. – P. 16-18.
7. Анисимов Г. И. Импульсные способы зачистки остатков смерзшихся грузов / Г. И. Анисимов // Промышленный транспорт. – 1988. – № 2. – С. 22-25.
8. Upshaw J. L. Micrometeoroid impact simulations using a rail gun electromagnetic accelerator / J. L. Upshaw, J. P. Kajs // IEEE Transactions on Magnetics. – 1991. – Vol. 27, № 1. – P. 607-610.

9. Jacobs W. A. Magnetic launch assist – NASA’s vision for the future / W. A. Jacobs // IEEE Transactions on Magnetics. – 2001. – Vol. 37, № 1. – P. 55-57.
10. Тютькин В. А. Магнитно – импульсный способ разрушения сводов и очистки технологического оборудования от налипших материалов / В. А. Тютькин // Электротехника. – 2002. – № 11. – С. 24-28.
11. Электродинамический импульсный клапан для получения молекулярных пучков/ Мазуренко М. И., Петухов В. А., Поведайло В. А. и др. // Приборы и техника эксперимента. – 2002. - № 2. – С. 152-155.
12. McNab I. R. Launch to space with an electromagnetic rail gun / I. R. McNab // IEEE Transactions on Magnetics. – 2003. – Vol. 39, № 1. – P. 295-304.
13. Reck B. First design study of an electrical catapult for unmanned air vehicles in the several hundred kilogram range / B. Reck // IEEE Transactions on Magnetics. – 2003. – Vol. 39, № 1. – P. 310-313.
14. Fair H. D. Electromagnetic launch science and technology in the United States enters a new era / H. D. Fair // IEEE Transactions on Magnetics. – 2005. – Vol. 41, № 1. – P. 158-164.
15. Торлин В. Н. Поведение электронных блоков и устройств под действием ударных нагрузок при ДТП / В. Н. Торлин, А. А. Ветрогон, С. В. Огрызков // Автомобильный транспорт. – 2009. – Вып. 25. – С. 178-180.
16. Чемерис В. Т. Многоступенчатый индукционный ускоритель макротел: поиск технических решений / В. Т. Чемерис // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2011. – № 3(40). – С. 45.
17. Оценка относительной конечной массы наноспутника, доставляемой в околоземное пространство с помощью импульсных стартовых и корректирующих устройств / Ю. В. Герасимов, Г. К. Каретников, А. Б. Селиванов, А. С. Фионов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. : Машиностроение. – 2013. – № 3. – С. 69-76.
18. Thom K. Theory of an electromagnetic mass accelerator for achieving hyper velocities. Technical note D-886, NASA, Washington (USA). – June 1961.

19. Мишкин В. Н. Сравнительная оценка арретирующих устройств на электродинамическом и электромагнитном принципе действия / В. Н. Мишкин, А. И. Толстик // Электромагнитные импульсные системы. – Новосибирск : Наука, 1989. – С. 114-117.
20. Балтаханов А. М. Расчет электромагнитных и электромеханических переходных процессов в индукционно – динамических системах / А. М. Балтаханов, В. Н. Бондалетов // Электричество. – 1981. – № 1. – С. 64-67.
21. Ивашин В. В., Особенности динамики работы и энергетических диаграмм импульсного электромагнитного привода при параллельном и последовательном соединении обмоток возбуждения / В. В. Ивашин, В. П. Пенчев // Электротехника. – 2013. – № 6. – С. 42-46.
22. Shuttleworth R. Double – sided Thomson coil based actuator: Finite element design and performance analysis / R. Shuttleworth, D. S. Vilchis – Rodriguez, M. Barnes // 8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2016), 19 April 2016. – Glasgow, UK. – P. 1-6.
23. Research on inter-stage coupling of three – stage reconnection electromagnetic launching system / L. Y. Li, X. P. Li, Q. G. Li, et al. // IEEE Transactions on Magnetics. – 2009. – Vol. 45, № 1. – P. 354-357.
24. Карпенко Л. Н. К вопросу о проектировании оптимальных индукционно – динамических приводов / Л. Н. Карпенко, Т. Г. Булавина // Известия вузов. Электромеханика. – 1985. – № 12. – С. 105-108.
25. Characteristic analysis and design of a Thomson coil actuator using an analytic method and a numerical method / D. K. Lim, D. K. Woo, I. W. Kim et al. // IEEE Transactions on Magnetics. – 2013. – Vol. 49, № 12. – P. 5749-5755.
26. Dynamic characteristics of non-ferromagnetic pulse electromechanical accelerator / D. Mayer, B. Ulrych, M. Skopek et al. // Технічна електродинаміка. – 2000. – Ч. 9. – С. 18-23.
27. Li W. Parametric analysis of Thomson-coil actuator using adaptive equivalent circuit method / W. Li, C. S. Koh // 14th Biennial IEEE Conference on

Electromagnetic Field Computation (CEFC), 9-12 May 2010. – Chicago, USA, 2010. – P. 1.

28. Simulation analysis of the temperature field in an induction launcher / S. Q. Li, X. C. Guan, B. Lei, Z. Y. Li // IEEE Transsactions on Plasma Science. – 2013. – Vol. 41, № 5. – P. 1055-1060.
29. Engel T. G. Prediction and verification of electromagnetic forces in helical coil launchers / T. G. Engel, D. Surls, W. C. Nunnally // IEEE Transactions on Magnetics. – 2003. – Vol. 39, № 1. – P. 112-115.
30. А. с. 1677808 СССР, МКИ H02K 33/00. Импульсный электромеханический преобразователь / В. Т. Чемерис, А. В. Пацев, А. Н. Шац. – № 4730542/07 ; заявл. 14.08.89 ; опубл. 15.09.91, Бюл. № 18.
31. On the design of a coil gun as a rapid-fire grenade launcher / M. Liao, Z. Zabar, D. Czarkowski // IEEE Transactions on Magnetics. – 1999. – Vol. 35, № 1. – P. 148-153.
32. Transition between two section of a linear induction launcher / X. N. Lu, Z. Zabar, E. Levi et al. // IEEE Transactions on Magnetics. – 1995. – Vol. 31, № 1. – P. 493-498.
33. Burgess T. J. Multistage induction mass accelerator / T. J. Burgess, M. Cowan // IEEE Transactions on Magnetics. – 1984. – Vol. 20, № 2. – P. 235-238.
34. Musolino A. Analysis of the performance of a combined coil – rail launcher / S. Barmada, A. Musolino, M. Raugi et al. // IEEE Transactions on Magnetics. – 2001. – Vol. 37, № 1. – P. 37-38.
35. Кораблев Г. А. К проблеме охлаждения рабочих катушек электромагнитных машин / Г. А. Кораблев, С. И. Джансугуров // Комплексное использование минерального сырья. – 1987. – № 9. – С. 10-15.
36. Пат. РФ № 2042254, МКИ H02K 33/00. Электромеханический преобразователь Спирякова / Г.Н.Спиряков. – № 4946878/07 ; заявл. 20.06.91 ; опубл. 20.08.95, Бюл. № 23.
37. Li W. Design of the Thomson – coil actuator of an arc eliminator using adaptive equivalent circuit method / W. Li, C. S. Koh // International Conference on

Electrical Machines and Systems (ICEMS). – Incheon, South Korea, 2010. – P. 1721-1724.

38. А.с. 1247998 СССР, МКИ H02K 33/12. Электромагнитный ударник / В. И. Кушаков, М. К. Кравцов, В. Д. Софиенко и др. – № 3827325/24 ; заявл. 17.12.84 ; опубл. 30.07.86, Бюл. № 28.
39. Пат. України № 23537, МПК H02K 41/025. Лінійний електродвигун ударної дії / В. Ф. Болюх, О. М. Марков, В. Ф. Лучук, І. С. Щукін. – № 97062960 ; заявл. 23.06.97 ; опубл. 31.08.98, Бюл. № 4.
40. Patent US 8,686,814 B2 PCT United States Pub. No.: WO2011/128516 Electric switching device with ultra-fast actuating mechanism and hybrid switch comprising one such device / Julien Bach, Cédric Bricquet // Appl. No.: 13/639,726, PCT Filed: Apr. 15, 2010, Date of Patent: Apr. 1, 2014, 5 Drawing Sheets.
41. Пат. Евроаз. № 011246, МКИ F02M 51/06 Электродинамический привод / И. О. Кирилюк, В. А. Корогодский, С. Г. Ломов. – № 200701722 ; заявл. 19.07.2006 ; Опубл. 27.02.2009.
42. Chang P. Drive Circuits for Ultra-fast and Reliable Actuation of Thomson Coil Actuators used in Hybrid AC and DC Circuit Breakers / P. Chang, A. Huang, I. Husain // 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 12 May 2016. – CA, USA, 2016. – P. 10-16.
43. Chang P. Evaluation of design variables in Thompson coil based operating mechanisms for ultra-fast opening in hybrid AC and DC circuit breakers / P. Chang, A. Huang, I. Husain // 2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). – 11 May 2015. – Charlotte, NC, USA, 2015. – P. 1-8.
44. Li W. Design of the Thomson – coil actuator of an arc eliminator using adaptive equivalent circuit method / W. Li, C. S. Koh // International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). – Incheon, South Korea, 2010. – P. 1721-1724.
45. Стрижаков Е. Л. Автоматизированная установка для магнитно-

импульсной сварки. / Е. Л. Стрижаков, Н. А. Хахин, Д. С. Бацемакин // Автоматическая сварка. – 2004. – № 2 – С. 53-55.

46. Пат. РФ № 70839, МПК В23К 20/06. Устройство для ударной конденсаторной сварки стержневых деталей с плоским основанием / С. В. Нескоромный Е. Л. Стрижаков. – № 200713908/22; заявл. 13.08.07; опубл. 20.02.2008, Бюл. № 5.
47. Стрижаков Е. Л. Ударная конденсаторная сварка с магнитно – импульсным приводом / Е. Л. Стрижаков, С. В. Нескоромный, Р. В. Меркулов // Сварочное производство. – 2009. – № 2. – С. 33-35.
48. Карпухин В. Ф. Особенности схемы встречного метания заготовок при магнитно-импульсной сварке / В. Ф. Карпухин // Труды междунар. науч.-техн. конф. «Магнитно-импульсная обработка материалов. Пути совершенствования и развития», 18–19 сентября 2007 г. // СГАУ. – Самара : Изд-во. учеб. лит. – С. 99-103.
49. Вибір параметрів електромеханічного перетворювача індукційного типу для електродинамічної обробки зварних з'єднань / І. П. Кондратенко, А. В. Жильцов, М. О. Пащин, В. В. Васюк // Технічна електродинаміка. – 2017. – № 5. – С. 83-88.
50. Ивашин В. В. Использования энергии импульсного магнитного поля для привода инструмента штамповочных машин / В. В. Ивашин, Н. А. Иванников, Ю. И. Кривонос // Прогрессивные технологии обработки материалов : материалы междунар. науч.-техн. конф. – Минск : УНПЦ «Метолит» БГПА, 1998. – С. 61-62.
51. Магнитно-эластоимпульсная вырубка-пробивка тонколистовых материалов / К. Н. Богоявленский, В. Б. Гиндин, В. С. Мамутов и др. // Кузнечно – штамповочное производство. – 1984. – № 2. – С. 12-14.
52. Mamutov V. S. Computer simulation of pulse pressure by me chanical consentrator / V. S. Mamutov, A. V. Mamutov // In International workshop: Nondestructive Testing and Computer Simulation in Science and Engineering / Proceeding of SPIE. Bellingham. – 2001. – Vol. 4627. – P. 239-242.

53. Разработка эффективных технологических устройств для магнитно-эластоимпульсной вырубки-пробивки тонколистовых материалов / Г. Н. Здор, А. В. Мамутов, В. С. Мамутов, Д. В. Смотраков // Металлообработка. – 2001. – № 2. – С. 28-32.
54. Синельников А. Я. Магнитно – импульсная обработка материалов. / А. Я. Синельников // Пути совершенствования и развития : Труды международной научно-технической конференции 18-19 сентября 2007 г. СГАУ. – Самара: Изд-во учеб. лит, 2007. – С. 170-180.
55. Combined Magnetic Pulsed Compaction of Oxide Ceramic Powder Materials. / M. Viktor, E. Indriksone, E. Beljaeva, V. Glushchenkov // Engineering Materials and Tribology XXIV. – January 2016. – Vol. 674, № 6. – P. 88-93.
56. Эффективность методов прессования корундо – циркониевых порошков различной дисперсности / Ю. М. Анненков, В. В. Иванов, А. С. Ивашутенко, А. А. Кондратюк // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308, № 7. – С. 39-42.
57. Пат. України № 118237, МПК B08B 7/02. Пристрій для очищення поверхонь від налиплих або намерзлих сипких матеріалів / С. П. Борткевич, О. В. Матвієнко. – № 02122 заявл. 06.03.2017. опубл. 25.07.2017, Бюл. № 14.
58. Li W. An adaptive equivalent circuit modeling method for the eddy current – driven electromechanical system / W. Li, Y. W. Jeong, C. S. Koh // IEEE Transactions on Magnetics. – 2010. – Vol. 46, № 6. – P. 1859-1862.
58. Тютькин В. А. Магнитно-импульсный способ разрушения сводов и очистки технологического оборудования от налипших материалов / В. А. Тютькин // Электротехника. – 2002. – № 11. – С. 24-28.
59. Индукционно-динамическая система очистки сушильного оборудования / П. В. Кузнецов, Н. С. Толмачев, В. Д. Харитонов и др. // Молочная промышленность. – 1989. – № 1. – С. 25-26.
60. Анисимов Г. И. Импульсные способы зачистки остатков смерзшихся грузов / Г. И. Анисимов // Промышленный транспорт. – 1988. – № 2. – С.

22-25.

61. Пат. РФ № 2153403, МПК B08B7/02. Способ для очистки поверхностей от различного рода отложений и устройство для его осуществления / Борткевич С. П., Гордиенко В. М., Иванов В. К., Матвиенко О. В. – № 981349/12 ; заяв. 22.12.1998 ; опубл. 27.07.2000.
62. Гурин А. Г. Автокорреляционные характеристики и разрешающая способность электродинамических излучателей / А. Г. Гурин // Сборник научных трудов Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков : ХГПУ, 1999. – Вып. 7, ч. 3. – С. 197-201.
63. Пат. РФ № 2457509, МПК G01V1/02. Кодоимпульсный сейсмоисточник / Ивашин В. В., Кудинов А. К., Иванников Н. А. № 2011111660/28 ; заявл. 28.03.2011 ; опубл. 27.07.2012.
64. Пат РФ № 2253136, МПК G01V1/02. Наземный электромагнитный вибрационный сейсмоисточник / Ивашин В. В., Позднов М. В., Прядилов А. В. – № 2004106/28; заявл. 25.02.2004 ; опубл. 27.05.2005.
65. Милых В. И. Анализ магнитного поля в линейном электродвигателе для источников сейсмических колебаний / В. И. Милых, С. В. Ткаченко // Електротехніка і електромеханіка. – 2009. – № 2. – С. 43-47.
66. Милых В. И. Математическая модель и анализ импульсного режима работы линейного электродвигателя при независимом питании его обмоток / В. И. Милых, С. В. Ткаченко // Електротехніка і електро - механіка. – 2011 – № 2. – С. 31-38.
67. Подольцев О. Д. Електромагнітні процеси в імпульсному ектродинамічному випромінювачі для збудження пружних коливань у бетонних конструкціях / О. Д. Подольцев, К. А. Городжа, Б. А. Трощинський // Технічна електродинаміка. – 2019. – № 3. – С. 23-28.
68. Бондар Р. П. Комплексна модель з частотно-залежними параметрами для розрахунку робочих характеристик магнітоелектричного вібратора / Р. П. Бондар, О. Д. Подольцев // Технічна електродинаміка. – 2017. – № 1. – С. 44-51.

69. Бондар Р. П. Моделювання електромеханічних процесів лінійного магнітоелектричного двигуна привода двомасової віброударної системи / Р. П. Бондар, Г. М. Голенков // Технічна електродинаміка. – 2019. – № 6. – С. 43-48.
70. Нейман Л. А. Моделирование процессов в электромагнитном вибрационном преобразователе с потерями энергии в магнитопроводе / Л. А. Нейман, В. Ю. Нейман // Доклады ТУСУРа. – 2016. – Т. 19, № 1. – С. 73-78.
71. Ross R. Electro – Impulse Deicing of the NASA Lewis Altitude Wind Tunnel Turning Vanes / R. Ross // J. AIRCRAFT. – 1988. – Vol. 25, № 6. – P. 499-502.
72. Пат. РФ № 2446532, МПК H02G7/16. Способ удаления льда и снега с проводов и грозозащитных тросов линий электропередачи и устройство для его осуществления / Иванов Е. Н. – № 2010150519/07 ; заявл. 10.12.2010 ; опубл. 27.03.2012.
73. Спесивцев А. В. Защита информации в персональных компьютерах / А. В. Спесивцев. – Москва: Радио и связь, 1992. – С.140-149.
74. Пат. № 80585 Україна, МПК G11B 5/024. Пристрій для захисту інформації, розміщеної на носії запису, від несанкціонованого доступу / Болюх В. Ф., Марков О. М., Лучук В. Ф., Щукін І. С. – № 200505448 ; – заявл. 07.06.2005 ; опубл. 10.10.2007, Бюл. № 16.
75. Пат. РФ № 2305329, МКИ G11B 5/024. Способ защиты информации и устройство для его осуществления / Болюх В. Ф., Марков А. М., Лучук В. Ф., Щукин И. С. – № 2005120956 ; – заявл. 04.07.2005; опубл. 28.08.2007, Бюл. № 24.
76. Болюх В. Ф. Высокоэффективные импульсные электромеханические и электромагнитные устройства уничтожения информации на цифровых накопителях / В. Ф. Болюх, И. С. Щукин // Електротехніка і електромеханіка. – 2015. – № 5. – С. 36-46
77. Татмышевский К. В. Магнитно-импульсные установки для испытаний

изделий авиакосмической техники на ударные воздействия / К. В. Татмышевский, С. А. Козлов // Авиакосмическое приборостроение. – 2005. – № 12. – С. 52-57.

78. Татмышевский К. В. Магнитно-импульсные метательные установки для проведения ударных испытаний взрывательных устройств боеприпасов / К. В. Татмышевский, М. Л. Семенович, С. А. Козлов // Известия РАРАН. – 2005. – № 4. – С. 22-31.
79. Comparative studies on two electromagnetic repulsion mechanisms for high-speed vacuum switch / Z. Mingzhi, W. Yi, L. Peng, W. Huabin // IET Electric Power Applications. – Vol. 12, Iss. 2 – P. 140-148.
80. Li Z. Research on the mathematic model and movement characteristics simulation of new fast repulsion mechanism / Z. Li, R. Jiangjun, L. Peng // 2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 19-22 Sept. – Chengdu, China, 2016.
81. Zhao Y. Research on ultra-fast vacuum mechanical switch driven by repulsive force actuator / Y. Zhao, H. Junjia, J. Xin // Review of Scientific Instruments. – 2016. – Vol. 87, Iss. 12. – P.103-109.
82. Байда Е. И. Особенности динамики быстродействующего индук–ционно-динамического привода с бистабильным фиксатором поло–жения контактов выключателя на базе постоянных магнитов / Е. И. Байда, В. В. Литвиненко, А. А. Чепелюк // Електротехніка і електромеханіка. – 2020. – № 1. – С. 3-9.
83. Analysis and design of a high-speed permanent magnet characteristic actuator using eddy current effect for high-voltage vacuum circuit breaker / F. Shuhua, X. Miao, L. Heyun, H. Siulau // IET Electric Power Applications. – 2016. – Vol. 10, Iss.4. – P. 268-275.
84. Majka A. Analysis of the Required Thrust of an Aircraft Aided During Take-Off and Landing by Ground-Based System Using Magnetic Levitation Technology / A. Majka // Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition – January 2013.

85. Kondratiuk M. Stand of an Electromagnetic Multi-Coil Launcher for Micro Aerial Vehicles / M. Kondratiuk, L. Ambroziak // Solid State Phenomena. – 2013. – Vol. 198. – P. 334-339.
86. Kondratiuk M. Comparison of Electromagnetic Coil Launcher Model with Real-Device Characteristics / M. Kondratiuk, L. Ambroziak // Solid State Phenomena. – 2014. – Vol. 214. – P. 58-66.
87. Snow W. R. Mass driver reaction engine characteristics and performance in earth orbital transfer missions / W. R. Snow, R. S. Dunbar // IEEE transactions on magnetics. – 1982. – Vol. 18, № 1. – P. 176-189.
88. Lipinski R. S. Space application for contactless coil guns / R. S. Lipinski, S. Beard, J. Bover // IEEE transactions on magnetics. – 1993. – Vol. 29, № 1. – P. 691-695.
89. Skurdal B. D. Multimission Electromagnetic Launcher / B. D. Skurdal, R. L. Gaigler // IEEE transactions on magnetics. – 2009. – Vol. 45, № 1. P. 458-462.
90. Study on the Effect and the Direction Accuracy of Active Electromagnetic Protection System / S. Li, Y. Gui, C. Yu et al. // IEEE transactions on magnetics. – 2009. – Vol. 45, № 1. – P. 351-353.
91. Подольцев А. Д. Мультифизическое моделирование в электротехнике / А. Д. Подольцев, И. Н. Кучерявая. – Київ : Ін-т електродинаміки НАН України, 2015. – 305 с.
92. Васьковский Ю. Н. Расчет электродинамических процессов в импульсном индукционном двигателе с применением метода конечных элементов / Ю. Н. Васьковский, В. Т. Чемерис // Техническая электродинамика. – 1990. – № 25. – С. 7-15.
93. Bissal A. Licentiate thesis on the design of ultra-fast electro-mechanical / A. Bissal. – Stockholm, Sweden. – 2013. – 120 p.
94. Подольцев А. Д. Многомасштабное моделирование в электротехнике А. Д. Подольцев.– Киев : Ин-т электродинамики НАН Украины, 2011. – 255 с.

95. Болюх В. Ф. Исследование линейных импульсных электромеханических преобразователей комбинированного типа / В. Ф. Болюх, А. И. Кочерга, А. П. Месенко, И. С. Щукін // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2018. – № 27 (103). – С. 55-64.
96. Болюх В. Ф. Исследование комбинированных линейных импульсных электромеханических преобразователей ударно-силового действия / В. Ф. Болюх, А. И. Кочерга, И. С. Щукин // Вісник НТУ «ХПІ». Сер.: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 5 (1281). – С. 59-66.
97. Болюх В. Ф. Теоретичні і експериментальні дослідження систем збудження лінійних імпульсних електромеханічних перетворювачів / В. Ф. Болюх, О. І. Кочерга, // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXVI міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2018, 16-18 травня 2018 р. – Ч. II. – Харків: НТУ «ХПІ». – С. 57.
98. Красников Г. Е. Моделирование физических процессов с использованием пакета Comsol Multiphysics / Г. Е. Красников, О. В. Нагорнов, Н. В. Старостин. – Москва : НИЯУ МИИ, 2012. – 184 с.
99. Официальный сайт компании Comsol. – Режим доступу: https://www.comsol.com.
100. Кочерга А. И. Линейные импульсные электромеханические преобразователи комбинированного типа / В. Ф. Болюх, А. И. Кочерга, И. С. Щукин // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXVI міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2018, 16-18 травня 2018 р. – Ч. II. – Харків : НТУ «ХПІ». – С. 58.
101. Болюх В. Ф. Электромеханические процессы в линейном импульсно-индукционном электромеханическом преобразователе с подвижным индуктором и двумя якорями / В. Ф. Болюх, А. И. Кочерга, И. С. Щукин // Електротехніка і електромеханіка. – 2018. – № 2. – С.11-17.
102. Болюх В. Ф. Влияние параметров якоря линейного импульсного

преобразователя на его эффективность/ В. Ф. Болюх, А. И. Кочерга, // Електротехніка і електромеханіка. – 2017. – № 6. – С. 21-26.

103. Болюх В. Ф. Порівняльний аналіз конструктивних типів комбінованих лінійних імпульсних електромеханічних перетворювачів / В. Ф. Болюх, О. І. Кочерга, І. С. Щукін // Технічна електродинаміка. – 2018. – № 4. – С. 84-88.
104. Bolyukh V. F. Investigation of linear impulse electromechanical converter / V. F. Bolyukh, O. I. Kocherga, I. S. Shchukin // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXV міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2017 – 17-19 травня 2017р. Ч. ІІ. – Харків: НТУ «ХПІ». – С. 155.
105. Bolyukh V. F. Theoretical and experimental study of linear impulse induction type electromechanical converter / V. F. Bolyukh, O. I. Kocherga // Прикладні науково-технічні дослідження: матеріали міжнар. наук.-прак. конф., 5-7 квіт. 2017р. Івано-Франківськ: Симфонія форте, 2017. – С. 82.
106. Болюх В. Ф. Дослідження лінійного імпульсного електродинамічного перетворювача / В. Ф. Болюх, О. І. Кочерга // Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики. – Київ: ФЕА НТУУ «КПІ», 2018. – С. 340-342. – Режим доступу: http://jour.fea.kpi.ua
107. Болюх В. Ф. Анализ эффективности линейных импульсных электромеханических преобразователей различных типов / В. Ф. Болюх, А. И. Кочерга // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2018. – № 1-2. – С. 38-43.
108. Болюх В. Ф. Исследование линейного импульсного электромеханического преобразователя индукционного типа с двойным якорем, предназначенного для уничтожения информации на SSD накопителе / В. Ф. Болюх, Ю. В. Кашанский, А. И. Кочерга, И. С. Щукин // Електротехніка і електромеханіка. – 2018. – № 5. – С.17-23.
109. Болюх В. Ф. Силовые показатели линейного ударно-индукционного преобразователя с комбинированным якорем / В. Ф. Болюх, А. И. Кочерга

// Тези доповідей І Всеукраїнської наук.-практ. конф. «Проблеми сучасної електроенергетики, електротехніки та електромеханіки: теорія і практика» 14-15 грудня 2017. - Харків: ХНУМГ ім. О.М.Бекетова. – С. 33-36.

110. Болюх В. Ф. Линейный ударный электромеханический преобразователь электромагнитно-индукционного типа / В. Ф. Болюх, А. И. Кочерга, И. С. Щукин // Вісник НТУ «ХПІ». Сер.: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 1 (1223). – С. 131-139.
111. Болюх В. Ф. Силові показники лінійних імпульсних електромеханічних перетворювачів індукційного та електродинамічного типів / В. Ф. Болюх, О. І Кочерга // Матеріали V Всеукраїнської науково-технічної конференції «Молодь: наука та інновації – 2017». - Дніпро, 28 листопада 2017 р. – Д.: ДВНЗ НГУ, 2017. – Т. 11. – С. 7-9.
112. Chang P. A Fast Mechanical Switch for Medium Voltage Hybrid DC and AC Circuit Breakers / P. Chang, H. Iqbal, L. Bruno // IEEE Transactions on Industry Applications. – July 2016. – Vol. 52, Iss. 4. – P. 2911-2918.
113. Chang P. Evaluation of Design Variables in Thompson Coil based Operating Mechanisms for Ultra-Fast Opening in Hybrid AC and DC Circuit Breakers / P. Chang, H. Iqbal, H. Alex // 2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) – 15-19 March 2015. – Charlotte, NC, USA, 2015. – P. 1048-1056.
114. Lequesne B. Drive Circuits for Ultra-fast and Reliable Actuation of Thomson Coil Actuators used in Hybrid AC and DC Circuit Breakers / Lequesne B., P. Chang, H. Alex, H. Iqbal // 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition 20-24 March 2016. – Long Beach, CA, USA, 2015. – P. 1235-1242.
115. Болюх В. Ф. Исследование линейного импульсно-индукционного электромеханического преобразователя при различных схемах питания индуктора / В. Ф. Болюх, А. И. Кочерга, И. С. Щукин // Електротехніка і електромеханіка. – 2018. – № 1. – С. 21-28.

116. Болюх В. Ф. Влияние формы импульса тока возбуждения на эффективность линейного импульсно-индукционного электро-механического преобразователя / В. Ф. Болюх, А. И. Кочерга, И. С. Щукин // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXVI міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2018, 16-18 травня 2018 р. Ч. II. – Харків : НТУ «ХПІ». – С. 59.
117. Болюх В. Ф. Comparative analysis of constructive types of combined linear pulmonary electromechanical converters / V. F. Bolyukh, A. I. Kocherga // Матеріали II міжнародної науково-практичної конференції «Прикладні науково-технічні дослідження». 3 квітня 2018 р. – Івано-Франківськ. Прикарпатський національний університет ім. В. Стефаника. – С. 66.
118. Болюх В. Ф. Влияние параметров якоря линейного импульсного преобразователя на его эффективность/ В. Ф. Болюх, А. И. Кочерга, И. С. Щукин // Електротехніка і електромеханіка. – 2017. – № 6. – С. 21-26.
119. Bolyukh V. F. Efficiency of a Linear Pulse Electromechanical Converter of Induction Type with a Two-section Power Capacitor of Energy / V. F. Bolyukh, A. I. Kocherga, I. S. Schukin // 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). Conference proceedings. – September 10-14, 2018. – Kharkiv, Ukraine. – P.332-337.
120. Болюх В. Ф. Методика экспериментальных исследований линейных импульсных электромеханических преобразователей / В. Ф. Болюх, А. И. Кочерга, С. В. Олексенко И. С. Щукин // Електротехніка і Електромеханіка. – 2017. – №2. – С. 18-28.
121. Bolyukh V. F. Theoretical and experimental study of linear impulse induction type electromechanical converter / V. F. Bolyukh, O. I. Kocherga // Прикладні науково-технічні дослідження: матеріали міжнар. наук.-прак. конф., 5-7 квіт. 2017р. Івано-Франківськ: Симфонія форте, 2017. – С. 82.
122. Пат. України № 119100, МПК B64F 1/06, B64C 39/02, F41B 6/00, F41F 1/00. Електромагнітний пусковий пристрій для безпілотного

літального апарата / Болюх В. Ф., Кочерга О. І., Лучук В. Ф., Щукін І. С. - Заявка №a201709105. – Заявл. 14.09.2017. – Надрук. 25.04.2019, Бюл. 8.

123. Kondratiuk M. Simulation Model of an Electromagnetic Multi-Coil Launcher for Micro Aerial Vehicles / M. Kondratiuk, L. Ambroziak // Solid State Phenomena. – 2013. – Vol. 198. – P. 406-411.
124. Kondratiuk M. Concept of the magnetic launcher for medium class unmanned aerial vehicles designed on the basis of numerical calculations / M. Kondratiuk, L. Ambroziak // Journal of Theoretical and Applied Mechanics January. – 2016. – Vol. 45. – P. 31-39.
125. Пат. України № 120143, МПК B22F3/087, B22F3/02. Пристрій для магнітно-імпульсного пресування керамічних порошкових матеріалів/ Болюх В. Ф., Кочерга О. І., Щукін І. С., Щукіна Л. П. – Заявка № a201801863; – заявл. 23.02.2018; – опубл. 10.10.2019, Бюл. 19.
126. Bolyukh V. F. Investigation of linear impulse electromechanical converter / V. F. Bolyukh, O. I. Kocherga, I. S. Shchukin // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я: тези доповідей XXV міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2017 – 17-19 травня 2017р. Ч. II. – Харків: НТУ «ХПІ». – С. 155.
127. Пат. України № 120661. МПК H02G 7/16. Пристрій для скидання ожеледних і снігових відкладень з проводу лінії електропередачі / Болюх В. Ф., Кочерга О. І., Лучук В. Ф., Щукін І. С. – № a201803355; – заявл. 30.03.2018 ; – опубл. 10.01.2020, Бюл. № 1.
128. Bolyukh V.F. Influence of the form of pulse of excitation on the speed and power parameters of the linear pulse electromechanical converter of the induction type / V. F. Bolyukh, I. I. Katkov // Proceedings ASME., Salt Lake City, Utah, USA, November 11–14, 2019, vol. 2B: Advanced Manufacturing, no. IMECE2019-10388, V02BT02A047, 8 p.
129. Bolyukh V. F. Influence of an excitation source on the power indicators of a linear pulse electromechanical converter of induction type / V. F. Bolyukh, I. S. Shchukin // Технічна електродинаміка. - 2021. - № 3. - С. 28-36.

130. Ljutenko L. A. Expansion of cylindrical tubular workpieces on high-voltage magnetic-pulse installation with controlled vacuum discharger. // Electrical Engineering & Electromechanics - 2021. -№3. - pp. 42-46.
131. Болюх В. Ф. Вплив обмеження тривалості струму обмотки якоря на робочі показники лінійного імпульсного електромеханічного перетворювача індукційного типу / В. Ф. Болюх., І. С. Щукін // Електротехніка і електромеханіка. – 2021. - № 6. – С. 3-10.
132. Bolyukh V.F., Katkov I.I. Cryogenic cooling system “Krioblast” increased efficiency and lowered the operation time of protective electrical induction-induced devices. / V. F. Bolyukh, I. I. Katkov // ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE). – 15-21 November 2013. – №8. – pp. V08BT09A003.
133. Болюх В. Ф. Сравнительный анализ силовых и скоростных показателей линейных импульсных электромеханических преобразова- телей электродинамического и индукционного типов / В. Ф. Болюх, И. С. Щукин, Ю. В. Кашанский, // Технічна електродинаміка. – 2019. - № 6. – С. 35–42.
134. Bolyukh V.F. Concept of an induction-dynamic catapult for a ballistic laser gravimeter / V. F. Bolyukh, A. I. Vinnichenko // Measurement Techniques. - 2014. - Vol. 56. - Issue 10. - P. 1098-1104.
135. Bolyukh V. F. Effect of self-seismic oscillations of the foundation on the readout of a ballistic gravimeter with an induction-dynamic catapult / V. F. Bolyukh, A. V. Omel’chenko, A. I. Vinnichenko, // Measurement Techniques. – 2015. - Vol. 58. – № 2. - P. 137-142.
136. Bolyukh V. F. Effect of self-seismic oscillations of the foundation on the readout of a ballistic gravimeter with an induction-dynamic catapult. / V.F. Bolyukh, A.V. Omel’chenko, and A.I. Vinnichenko // Measurement Techniques. – 2015. – vol. 58 – №2. – pp. 137-142.
137. X. Liu Analysis of the capacitor-aided meat grinder circuits for an inductive pulsed power supply / X. Liu, X. Yu, R. Ban et al. // IEEE Transactions on

plasma science. – 2017. – vol. 45 – №7 – pp. 1339-1346.

138. Y. Zhou Research on a novel drive unit of fast mechanical switch with modular double capacitors. / Y. Zhou, Y. Huang, W. Wen, et al. // Journal of Engineering. – 2019. – vol. 19 – №17. – pp. 4345-4348.
139. Bolyukh V. F. Influence of the Form of Pulse of Excitation on the Speed and Power Parameters of the Linear Pulse Electromechanical Converter of the Induction Type. / V.F. Bolyukh and I.I. Katkov// Proceedings ASME. – November 11–14, 2019. – vol. 2B – № IMECE2019-10388. – pp. 8-16.
140. Bolyukh V. F. The thermal state of an electromechanical induction converter with impact action in the cyclic operation mode / V. F. Bolyukh and I. S. Shchukin // Russian electrical engineering. –2012. – vol. 83. – №10. – pp. 571–576.
141. Bolyukh V. F. Cryogenic cooling system “Krioblast” increased efficiency and lowered the operation time of protective electrical induction-induced devices, /V. F. Bolyukh and I. I. Katkov, // ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings IMECE 2013. – 2013. – vol.8B, – №105847.
142. Болюх В.Ф., Щукин И.С. Линейные индукционно-динамические преобразователи. - Saarbrucken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing. - 2014. – 496 с.
143. Driga M. D. Electromagnetic induction launchers, / M. D. Driga, W.F. Weldon, H. H. Woodson // IEEE Transaction on Magnetics. – 1986. – vol. 22 – №6. – pp. 1453-1458.
144. Balikci A. Improved performance of linear induction launchers, / Balikci A., Zabar Z., Birenbaum L. // IEEE Transactions on Magnetics. – 2005. – vol. 41. – №1. – pp. 171–175.
145. Bolyukh V. F. Investigation of a linear pulse-induction electromechanical converter with different inductor power supply circuits. / V. F. Bolyukh , A. I. Kocherga, I. S. Schukin //Electrical engineering & Electromechanics. – 2018. – № 1 – pp. 21-28.

146. Bolyukh V.F. Influence of the Form of Pulse of Excitation on the Speed and Power Parameters of the Linear Pulse Electromechanical Converter of the Induction Type / V. F. Bolyukh, I. I. Katkov // Proceedings ASME. – November 11–14, 2019 – vol. 2B. – Advanced Manufacturing, no. IMECE2019-10388.
147. Bolyukh V. F. Effect of electric conducting element on indicators of Linear pulse electromechanical converter induction type, Technical Electrodynamics. – 2020. – №3. – pp. 22-29.
148. Bolyukh V. F. Efficiency of linear pulse electromechanical converters designed to create impact loads and high speeds, / V. F. Bolyukh , S. V.,Schukin I.S. //Electrical engineering & Electromechanics. – 2015. –№3 – pp. 31-40.
149. Bolyukh V. F. The thermal state of an electromechanical induction converter with impact action in the cyclic operation mode, / V. F. Bolyukh, I. S. Shchukin //Russian electrical engineering. – 2012. – vol. 83. – no. 10. – pp. 571–576.
150. Bissal A. Comparison of two ultra-fast actuator concept./ A. Bissal, Magnusson J., Engdahl G. // IEEE Transactions on Magnetics. – 2012. – Vol. 48. - N11.- pp. 3315-3318.
151. Болюх В. Ф. Сравнительный анализ линейных импульсных электромеханических преобразователей электромагнитного и индукционного типов. / В. Ф. Болюх, С. В. Олексенко, И. С. Щукин //Технічна електродинаміка. – 2016. – № 5. – С. 46-48.
152. Zhang M. Comparative studies on two electromagnetic repulsion mechanisms for high-speed vacuum switch. / Zhang M., Wang Y., Li P., Wen H. // IET Electric Power Applications. – 2018. – Vol. 12. – No 2. – pp. 247-253.
153. Bolyukh V. F. Efficiency of linear pulse electromechanical converters designed to create impact loads and high speeds. / Bolyukh V. F., Oleksenko S. V., Schukin I. S. // Electrical engineering & Electromechanics. – 2015. – № 3. – pp. 31-40.
154. Bolyukh V. F. Influence of an excitation source on the power indicators of a linear pulse electromechanical converter of induction type. / Bolyukh V. F., Shchukin I. S. // Техн. електродинаміка. – 2021. – № 3. – С. 28-36.

155. Bolyukh V. F. Influence of the Form of Pulse of Excitation on the Speed and Power Parameters of the Linear Pulse Electromechanical Converter of the Induction Type. / Bolyukh V. F., Katkov I. I. // Proceedings ASME. – 2019. – vol. 2B – p.8
156. Bolyukh V. F. Features of excitation of a linear electromechanical converter of induction type from an AC source. / Bolyukh V. F., Kashansky Yu. V., Schukin I. S. // Electrical Engineering & Electromechanics. – 2021. –№.1. – pp. 3–9.
157. Bolyukh V. F. The thermal state of an electromechanical induction converter with impact action in the cyclic operation mode. /Bolyukh V. F., Shchukin I. S. // Russian electrical engineering. – 2012. – vol. 83. – №. 10. – pp. 571–576.
158. Разрушающие методы уничтожения информации на НЖМД [электронный ресурс]/ С. Коженевский, С. Чеховский, С. Прокопенко // Библиографи ческий весник – режим доступа к журн.: http://www.epos.ua/ view.php/about_research_datakill.
159. Барсуков В.С. Чтобы сохранить информацию, ее необходимо уничтожить / В.С. Барсуков // Спец. техника. – 2001. – № 6. – С. 45 – 53.
160. Уничтожение данных. Практический подход [электронный ресурс] / И. Гордиенко // режим доступа к журн.: http://www.ferra.ru/online/storage-/s25303/, 2003.
161. Рохманюк В. М. Аппаратура экстренного уничтожения записей на магнитных носителях / В.М. Рохманюк, Е.М. Фокин // БДИ. – 2009. – № 5. – С. 78 – 83.
162. Боборыкин С. Н. Оценка эффективности средств уничтожения информации, хранящейся в накопителях на жестких магнитных дисках / С.Н. Боборыкин, С.С. Рыжиков // Спец. техника. – 2001. – № 3. – С. 54 – 60

ЗМІСТ

стор.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ……... 3

ВСТУП ……..... 5

Розділ 1. **АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ СФЕР ВИКОРИСТАННЯ ЛІНІЙ – НИХ ІМПУЛЬСНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ** 7

1.1. Загальна характеристика ЛІЕП …….. 7

1.2. Застосування ЛІЕП як ударно-силових пристроїв …….. 14

1.3. Застосування ЛІЕП в якості електромеханічних прискорювачів . 25

Розділ 2. **МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЛІНІЙНОГО ІМПУЛЬСНОГО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА** ……... 30

2.1. Постановка задачі та основні припущення……. 33

2.1.1. Розрахунок електромагнітних процесів ЛІЕП мультиякірної конфігурації …….. 34

2.1.2. Електрична схема ЛІЕП мультиякірної конфігурації ……. 43

2.1.3. Розрахунок механічних та теплових процесів ЛІЕП …….... 49

2.2. Реалізація комп’ютерної моделі ЛІЕП ……. 50

2.3. Апробація математичної та комп’ютерної моделі ЛІЕП ……... 55

Розділ 3. **АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК І ПОКАЗНИКІВ ЛІНІЙНИХ ІМПУЛЬСНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ МУЛЬТИЯКІРНИХ КОНФІГУРАЦІЙ** …… 62

3.1. Класифікація ЛІЕП мультиякірних конфігурацій ……. 62

3.2. Аналіз електромеханічних характеристик ЛІЕП мультиякірних конфігурацій силового призначення ……... 65

3.3. Аналіз ефективності ЛІЕП мультиякірних конфігурацій силового призначення ……. 74

3.4. Дослідження ЛІЕП мультиякірної конфігурації швидкісного призначення ……... 78

3.5. Експериментальні дослідження ЛІЕП мультиякірних

конфгурацій …… 91
3.5.1. Техніка та методика експериментальних досліджень ЛІЕП 91
3.5.2. Результати експериментальних та розрахункових досліджень ……. 99
Розділ 4. **ВПЛИВ ФОРМИ СТРУМУ ЗБУДЖЕННЯ НА ЕФЕКТИВ – НІСТЬ ЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВО РЮВАЧІВ…** 109
4.1. Електромеханічні характеристики ЛІЕП індукційного типу при різних формах струму збудження індуктора ……. 109
4.2. Дослідження ЛІЕП мультиякірних конфігурацій при різних формах струму збудження індуктора ……. 117
4.3. Вплив обмеження тривалості струму обмотки якоря на робочі показники ЛІЕП індукційного типу …… 129
4.4. Підвищення ефективності ЛІЕП за рахунок збудження серією імпульсів …… 137
4.5. Живлення ЛІЕП індукційного типу від джерела змінного струму 158
4.6. Порівняльний аналіз силових та швидкісних показників ЛІЕП електродинамічного та індукційного типів…… 167
Розділ 5. **ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІНІЙНОГО ІМПУЛЬСНОГО ПРИСКО – РЮВАЧА** …….. 173
5.1. Вплив початкового зміщення обмоток на показники ЛІЕП циліндричної конфігурації ……. 173
5.2. ЛІЕП з ємнісним накопичувачем енергії і додатковою ємністю в колі якоря ……... 185
5.3. Лінійний імпульсний електромеханічний прискорювач з вибухомагнітним генератором …… 198
5.4. Лінійний імпульсний прискорювач плазмового згустку…… 208
Розділ 6. **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ І ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ЛІНІЙНИХ ІМПУЛЬСНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧ – НИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ** ……... 220
6.1. Електромагнітна катапульта безпілотного літального апарату … 220

6.2. Магнітно-імпульсний прес для керамічних порошкових матеріалів …….. 227
6.3. Електромеханічний ударний пристрій для скидання ожеледних і снігових відкладень з проводу лінії електропередачі ……... 233
6.4. Електромеханічний ударний пристрій для очищення технологічного обладнання від сипких матеріалів ……... 239
6.5. Електромеханічні пристрої знищення інформації на цифрових накопичувачах …… 241
6.6. Балістичний гравіметр для вимірювання прискорення вільного падіння з індукційно-динамічною катапультою …… 249
6.7. Газодетонаційний прискорювач плазмового утворення в повітряному середовищі …….. 255
ВИСНОВКИ ……. 262
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ …… 266

Наукове видання

БОЛЮХ Володимир Федорович
КОРИТЧЕНКО Костянтин Володимирович
КОЧЕРГА Олександр Іванович

ЛІНІЙНІ ІМПУЛЬСНІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

МОНОГРАФІЯ
для спеціалістів в області імпульсної електромеханіки,
студентів, аспірантів та наукових співробітників

Відповідальний за випуск проф. Коритченко К. В.
Роботу рекомендував до видання ктн. Чепелюк О. О.

В авторській редакції

План 2022 р., поз.64

Підп. до друку _____. Формат 60×84 1/16. Папір офсетний.
Riso-друк. Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк._____.
Наклад 50 прим. Зам. № _____. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ».
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017 р.
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2

Виготовлювач ТОВ «Планета-Принт», Харків, 61002, вул. Багалія, 16