

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

**Леденьов Володимир Васильович**

УДК 621.373.44: 621.98.044.06

**УДОСКОНАЛЕННЯ РОЗРЯДНОГО КОНТУРУ  
ГЕНЕРАТОРІВ СИЛЬНИХ  
ІМПУЛЬСНИХ МАГНІТНИХ ПОЛІВ  
З УЗГОДЖУЮЧИМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ**

Спеціальність 05.09.13 – Техніка сильних електричних та магнітних полів

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2001

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України, м.Харків

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор,  
Хименко Лев Тимофійович,  
Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", завідувач лабораторії кафедри інженерної електрофізики.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,  
Бржезицький Володимир Олександрович,  
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", завідувач кафедри техніки та електрофізики

високих напруг;

кандидат технічних наук,  
Таран Григорій Віталійович,  
Інститут плазмової електроніки і нових методів прискорення  
Національного наукового центру "Харківський фізико-технічний  
інститут" НАН України, начальник групи.

Провідна установа

Інститут електродинаміки Національної академії наук України, м. Київ

Захист відбудеться 04.10.2001 р. о 14 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за адресою:  
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

Автореферат розісланий 01.09.2001 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради

Болюх В.Ф.

### **ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ**

**Актуальність теми.** Генератори сильних імпульсних магнітних полів (ГСІМП) знаходять широке застосування у сучасній промисловості (наприклад, у магнітно-імпульсній обробці металів), наукових дослідженнях (в першу чергу, у фізиці, медицині), а також при випробуваннях на електромагнітну сумісність. Досить часто навантаженням ГСІМП є масивні одновиткові соленоїди. Вони мають високу міцність, просту конструкцію, але коефіцієнт використання енергії ємнісного нагромаджувача для цих індукторів буде малим. Для підвищення цього коефіцієнта перед індуктором установлюють трансформатор струму – узгоджуючий трансформатор (УТ).

Технологами і фізиками в останні роки було висунуто вимоги щодо створення ефективних ГСІМП з підвищеною частотою (70...120 кГц) розрядного струму. Створення таких генераторів різної потужності поставило нові вимоги і до конструкції УТ. УТ повинен мати конструкцію, що дозволяє компонувати елементи розрядного контуру ГСІМП таким чином, щоб індуктивність кола була мінімальною. Крім того, для ГСІМП великої потужності ця конструкція повинна надати змогу удосконалення розрядного контуру для забезпечення синхронного спрацьовування розрядників схеми.

Подібні вимоги практично не задовольняються за допомогою відомих конструкцій УТ. Тому для розв'язання цієї проблеми було потрібно створення нових типів УТ, зокрема, коаксіального і сегментного імпульсних трансформаторів, що дозволяють створити ефективні високочастотні ГСІМП.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертація виконувалась згідно з комплексною програмою 4.3.7.КП НТП країн-членів РЕВ до 2000 року, з розв'язанням проблеми 0.16.03, що була затверджена постановою ДКНТ

СРСР № 472/248 від 12.12.80, а також з діючим координаційним планом “Наукові основи створення нових енергозберігаючих технологій, машин і апаратів для харчової промисловості” Міністерства освіти та науки України. Номери державної реєстрації НДР, базових для підготовки дисертаційної роботи: 81065312, 0183.0080416, 0185.0080589, 0186.009638, 0187.094588, 0190.0047579, 0197U001890.

### **Мета і задачі дослідження.**

*Метою дослідження є удосконалення розрядного контуру ГСІМП шляхом використання нових типів узгоджувачих трансформаторів та розробка на цій основі ефективних технологічних магнітно-імпульсних установок (МІУ) різної енергоємності з підвищеною частотою розрядного струму (70...120 кГц).*

*Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:*

- провести аналіз існуючих типів імпульсних УТ потужних електрофізичних установок;
- розробити конструкції нових УТ коаксіального та сегментного типу;
- провести дослідження перехідних електромагнітних процесів у розрядному контурі ГСІМП з коаксіальним та сегментним УТ та розробити методику розрахунку оптимальних параметрів трансформаторів;
- розробити МІУ з підвищеною частотою розрядного струму та високою надійністю роботи з використанням коаксіального і сегментного УТ.

*Об'єкт дослідження – генератори сильних імпульсних магнітних полів з ємнісним нагромаджувачем енергії.*

*Предмет дослідження – розрядний контур ГСІМП з імпульсними трансформаторами для узгодження навантаження.*

*Методи дослідження.* Перехідні процеси у контурах, що досліджувалися, розраховувалися методами теорії кіл з використанням схем заміщення та методами теорії електромагнітного поля. Диференціальні та інтегро-диференціальні рівняння розв'язувалися чисельним методом. Оптимізація параметрів УТ здійснювалась методами пошуку екстремуму функції декількох змінних. Експериментальні дослідження та технологічні випробування виконано на фізичних моделях та реальних МІУ з УТ. Імпульсні струми вимірювалися за допомогою поясу Роговського власної розробки.

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

Сформульовано ідею використання елементів струмопроводу розрядного контуру ГСІМП як первинну обмотку узгоджувачого трансформатора, на основі якої розроблено конструкції нових узгоджувачих пристроїв – коаксіального та сегментного трансформаторів.

Запропоновано схеми заміщення цих узгоджувачих трансформаторів та методику розрахунку трансформаторів.

Розроблено схему потужного кільцевого ГСІМП з узгодженням та доведено ефективність та надійність її роботи.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

Результати роботи знайшли практичне застосування у лабораторії магнітно-імпульсної обробки металів кафедри інженерної електрофізики НТУ “ХПІ” при розробці та створенні високочастотних МІУ з коаксіальними УТ: МІУ-2С (максимальна енергія 2,4 кДж, власна частота 145 кГц), МІУ-10ВЧ (9,6 кДж, 90 кГц), а також потужної МІУ кільцевого типу з узгодженням: МІУ-40С (38,4 кДж, 90 кГц). Установки впроваджено на підприємствах п/я А-7615. п/я М-5836, “Автоцветлит” (м. Мелітополь), “Сокил” (м. Київ).

Результати дисертаційної роботи використовуються на кафедрі інженерної електрофізики НТУ “ХП” для навчальної підготовки фахівців за спеціальністю “Техніка і електрофізика високих напруг”.

Отримані результати можуть бути використані при створенні потужних імпульсних електрофізичних установок для наукових досліджень та випробувань.

**Особистий внесок здобувача.** У роботах, що виконано в співавторстві [1,2], здобувачем запропоновано схеми заміщення УТ, проведено розрахунки оптимальних параметрів УТ. У роботі [4] здобувачем запропоновано удосконалення схеми інтегратора пояса Роговського, що дозволило отримати перехідну характеристику з крутим фронтом. У роботі [14] здобувачем наближеним методом одержано аналітичні вирази для імпульсів струму у розрядному колі МПУ з УТ. У роботі [15] здобувачем розроблено математичну модель перехідного електромагнітного процесу при розряді нагромаджувача на сегментний УТ.

В авторських свідоцтвах запропоновано наступне. У роботі [6] – установа феромагнітного осердя у сегментному УТ. У роботі [7] – виконувати первинну обмотку коаксіального УТ у вигляді масивної пластини. У роботі [8] – розміщувати виводи секцій робочої обмотки та провідник, що їх з'єднує, у радіальному розрізі масивної плити індуктора. У роботі [9] – виконувати шини вторинної обмотки сегментного УТ таким чином, щоб вони мали контур перерізу, що є коаксіальним до перерізу шини первинної обмотки. У роботі [10] – використовувати у конструкції розрядника МПУ елементи сегментного УТ, а також використовувати штир вторинної обмотки схеми підпалювання у вигляді двох ізольованих частин. У роботі [11] – використовувати для підсилення магнітного зв'язку торцеву поверхню вторинних витків-втулок коаксіального УТ. У роботі [12] – використовувати електрод підпалювання у вигляді масивного витка, що є коаксіальним осі розрядника з паралельними дисковими електродами. У роботі [13] – ініціювати пробій розрядника за допомогою краплини рідини.

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на наступних науково-технічних конференціях: “Использование импульсных источников энергии в промышленности” (м. Харків, 1985 р.); “Механизация и автоматизация процессов пластического формообразования и упрочнения тонкостенных деталей” (м. Казань, 1984 р.); “Электрический разряд в жидкости и его применение в промышленности” (м. Миколаїв, 1984 і 1988 рр.); “Состояние и перспективы развития электротехнологии” (м. Іваново, 1989 р.); “Создание комплексов электротехнического оборудования, высоковольтной, преобразовательной, сильноточной и полупроводниковой техники” (м. Москва, 1990 р.); “Информационные технологии: наука, техника, технология, оборудование, здоровье” (м. Харків, 1997, 1998, 1999, 2000 рр.).

**Публікації.** За результатами дисертації опубліковано 24 роботи: 2 статті у наукових журналах, 4 статті у збірниках наукових праць, 2 депоновані статті, 8 авторських свідоцтв, 8 тез доповідей на науково-технічних конференціях.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатку. Повний обсяг дисертаційної роботи складає 209 сторінок, 50 ілюстрацій на 50 сторінках, 2 таблиці на 2 сторінках та 1 таблиця по тексту, 1 додаток на 7 сторінках, список використаних джерел із 130 найменувань на 12 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтована актуальність дисертаційної роботи, сформульовані мета та задачі досліджень. Викладено основні наукові та практичні результати, які отримані в роботі. Приведено дані щодо апробації результатів роботи.

**У першому розділі** проведено огляд та аналіз конструкцій узгоджуючих трансформаторів потужних імпульсних електрофізичних установок, приведено схеми заміщення розрядного контуру установок з узгоджувачами трансформаторами, порядок розрахунку і проектування таких трансформаторів.

Узгоджуючі трансформатори є ефективними засобами підвищення коефіцієнта використання енергії нагромаджувача для одновиткових індукторів. Крім того, установлення узгоджувача дозволяє знизити вимоги до ізоляції індуктора та конструкції комутатора, бо значно знижується величина струму, що комутується, при тому ж значенні напруженості магнітного поля в індукторі.

Усю різноманітність конструкцій узгоджувачів трансформаторів умовно можна поділити на три основні типи: трансформатори з багатовитковою первинною обмоткою; індуктори з концентраторами магнітного поля; кабельні трансформатори.

Розрахунок параметрів узгоджувача та перехідних процесів у розрядному контурі генератора зазвичай ведеться за допомогою еквівалентних схем заміщення методами теорії електричних кіл. Величина і фізичний сенс параметрів схеми заміщення залежать, у першу чергу, від вибору самої схеми заміщення. Розрахунок значень параметрів схеми може бути проведений, наприклад, виходячи з режимів холостого ходу та короткого замикання трансформатора.

Існуючі конструкції узгоджувачів трансформаторів забезпечують добре узгодження навантаження генератора та, у ряді випадків, мають мінімальну індуктивність розсіяння.

Але компоновка розрядного контуру ГСІМП не завжди є оптимальною з точки зору досягнення мінімальної загальної індуктивності контуру, що дуже важливо при створенні генераторів з підвищеною частотою розрядного струму.

Існуючі конструкції узгоджувачів трансформаторів не дають змоги удосконалення розрядного контуру ГСІМП великої енергоємності з метою забезпечення надійної синхронної роботи усіх розрядників схеми.

Проведений аналіз стану питання дозволив сформулювати мету роботи і поставити задачі дослідження.

**У другому розділі** викладено результати досліджень коаксіального узгоджувача трансформатора.

Коаксіальний УТ є новим типом узгоджувача трансформатора, що розроблено на кафедрі інженерної електрофізики НТУ “ХПІ”. Первинна обмотка коаксіального УТ має вигляд масивного штиря 1, а вторинна обмотка виконана у вигляді масивних втулок 2, 3 (рис. 1). Втулки і штир відокремлюються один від одного ізоляційними прокладками 4, 5. Працює коаксіальний УТ таким чином: при розряді нагромаджувача  $C$  у первинній обмотці протікає первинний струм  $I_1(t)$ . Він наводить у витках-втулках вторинної обмотки струми  $I_2(t)$ . За допомогою кабельної ошиновки 6 струм  $I_1(t)$  і струми  $I_2(t)$  підсумовуються в індукторі навантаження  $L_H$ . Отже, у навантаженні має місце помноження струму і коефіцієнт використання енергії нагромаджувача зростає.

Для розрахунків УТ запропоновані схеми заміщення з індуктивним та гальванічним зв'язком між обмотками (рис. 2). Остання схема є аналогічною відомій схемі заміщення автотрансформатора.

Умова ефективної роботи коаксіального УТ:

$$L_H \leq L_2, \quad (1)$$

де  $L_2$  – індуктивність вторинної обмотки.

*Рис. 1. Конструкційна схема коаксіального УТ.*

У цьому випадку величина струму у навантаженні (якщо нехтувати активними опорами) визначається виразом:

$$I_H(t) = (1 + M / L_2) I_1(t) = (1 + n) I_1(t), \quad (2)$$

де  $M$  – взаємодуктивність обмоток,  
 $n$  – кількість вторинних витків-втулок.

*Рис. 2. Еквівалентні схеми заміщення ГСІМП з коаксіальним УТ.*

Відзначимо, що індуктивність розсіяння для коаксіального УТ буде тільки на первинному боці. Коефіцієнт зв'язку між обмотками дорівнює:

$$k_c = \sqrt{L_1 / L_T}, \quad (3)$$

де  $L_1$  – індуктивність первинної обмотки;

$L_T$  – індуктивність труби, що складається з втулок вторинних витків.

Перехідний процес у розрядному контурі генератора з коаксіальним УТ описується диференціальними рівняннями третього порядку, які розв'язувалися чисельним методом за відомою процедурою чи наближеним методом у припущенні малого загасання коливань. В останньому випадку:

$$I_H(t) \approx \frac{U_0}{\omega L} \frac{M + L_2}{L_2 + L_H} \sin \omega t, \quad (4)$$

де  $U_0$  – початкова напруга нагромаджувача;

$L$  – повна індуктивність розрядного кола.

Результати розрахунків чисельним та наближеним методами добре збігаються (при виконанні умови (1)).

Цікавою особливістю коаксіального УТ є вплив на величину розрядних струмів кабельної ошиновки, що з'єднує штир та втулки вторинних витків з навантаженням. Зовнішній і внутрішній провідники відрізків коаксіального кабелю є, по суті, частинами первинної обмотки та вторинних витків. Таким чином, ошиновку необхідно урахувати при розрахунках розрядних струмів як елемент трансформатора, а не тільки струмопровід.

З аналізу системи рівнянь, записаних для кожного вторинного витка, з урахуванням магнітного зв'язку між жилою та обпліткою відрізків кабелю ошиновки, впливає:

$$I_H(t) = I_1(t) \frac{L_{2пол} + M + 2M_K / mn^2}{L_{2пол} + L_H - 2M_K(n-1) / mn^2}, \quad (5)$$

де  $M_K$  – взаємна індуктивність між жилою та обпліткою відрізка кабельної

ошиновки;

$m$  – кількість паралельних відрізків кабелю;

$L_{2пол}$  – повна індуктивність вторинної обмотки;

$$L_{2пол} = L_2 + (L_{жс} + L_{об}) / mn, \quad (6)$$

де  $L_{жс}, L_{об}$  – індуктивності жили та обплітки відрізка кабелю, відповідно.

Розрахунки струмів за формулою (5) добре погоджуються з експериментом. Найкращим для виконання ошиновки є кабель ФКП-1/50, бо при однаковій довжині він має найбільший коефіцієнт зв'язку між жилою та обпліткою.

Для розрахунку оптимальних параметрів коаксіального УТ функцією мети був коефіцієнт використання енергії:

$$\eta = L_H I_H^2 / L I_1^2 = \eta(L_1, n). \quad (7)$$

Параметри оптимізації – індуктивність первинної обмотки  $L_1$  та кількість вторинних витків  $n$  (вважалося, що  $L_H = const, k_c = const$ ). Задача розв'язувалася методом сканування за обмежувальною умовою:

$$f(L_1, n) \geq f_{зад}, \quad (8)$$

де  $f$  – частота стуму у розрядному колі ГСІМП.

Діапазони змінювання:  $n = 1 \dots 10$ ;  $L_I = 20 \dots 300$  нГн.

Індуктивність  $L_I$  варіювалася, головним чином, за рахунок кількості паралельних відрізків кабелю ошиновки. Конструкційні параметри штиря первинної обмотки (висота, діаметр) і, як наслідок, його індуктивність вважалися постійними. Обмеження висоти штиря для кожної конкретної установки з коаксіальним УТ виникає з вимог ергономіки щодо загальної висоти установки.

Кількість вторинних витків-втулок для усіх високочастотних ГСІМП, що розроблялися, дорівнювала 1. Таким чином, коефіцієнт використання енергії зростав у 2...3 рази порівняно з МІУ без УТ та забезпечувалась підвищена частота розрядного струму.

Були також одержані формули для розрахунку оптимальної індуктивності навантаження  $L_H$  (при  $L_H = const$ ,  $k_C = const$ ) та максимальної величини  $L_H$ , для якої ще зберігається ефективність узгодження.

На кафедрі інженерної електрофізики НТУ “ХПІ” було створено високочастотні магнітно-імпульсні установки з коаксіальними УТ: МІУ-10ВЧ (енергія 9,6 кДж; власна частота 90 кГц) та МІУ-2С (енергія 2,4 кДж, власна частота 145 кГц). Вимірювання розрядних струмів та технологічні випробування по обтиску заготовок підтвердили розрахунки та довели ефективність цих МІУ.

Таблиця 1

Результати експериментальної перевірки коаксіальних УТ

Тип установки	$L_H$ , нГн		$I_n / I_1$		$f$ , кГц	
	розрахунок	експерим.	розрахунок	експерим.	розрахунок	експерим.
МІУ – 2С	5	1,88	1,80	149	140	
МІУ – 2С	2	1,64	1,59	123	120	
МІУ – 10ВЧ	8	1,89	1,87	82,4	80,0	
МІУ – 10ВЧ	15	1,80	1,75	72	69	
Модель-1 (на ИК-25-12)	5		3,2	3,0	147	140
Модель-2 (з генератором імпульсів)				118	1,24	1,28
імпульсів	40					Задається генератором

Найбільш ефективним є використання коаксіального УТ для МІУ невеликої потужності на одному конденсаторі з коаксіальними виводами (типа ИК-25-12), де УТ монтується на виводах конденсатора в одному блоці з розрядником.

**У третьому розділі** викладено результати досліджень сегментного узгоджувача трансформатора.

Сегментний УТ – це новий тип узгоджувача трансформатора, який запропоновано та розроблено на кафедрі інженерної електрофізики НТУ “ХПІ”. Працює УТ таким чином (рис. 3): при розряді нагромаджувача С у первинній обмотці, що має вигляд багатокутника 1 з масивної плоскої шини, протікає імпульс струму  $I_1(t)$ . Він наводить у сегментах (витках) вторинної обмотки 2, 3, що виконані з такої ж масивної шини, імпульси струму  $I_2(t)$ , які підсумовуються у навантаженні  $L_H$ , де має місце помноження



струму. Отож, коефіцієнт використання енергії зростає.

Для розрахунків УТ використовувалися “Г”- і “Г”- подібна схеми заміщення. Розрахунки розрядних струмів, оптимальних параметрів трансформатора для обох схем практично збігаються, але для аналізу більш зручна “Г”- подібна схема, яку і приведено на рис. 3. У схемі:  $L_{01}$  – індуктивність первинної обмотки;  $L_P$  – індуктивність розсіювання (визначається індуктивністю ізоляційного зазору між шинами первинної обмотки і сегментів);  $L_{02}$  – паразитна індуктивність вторинного кола. Схема зведена до вторинного кола.

Для уточнених розрахунків розрядних струмів у схему було введено перехідні опори масивних шин первинної обмотки та сегментів. Відомо, що перехідний опір масивної шини в операторній формі має вигляд:

$$z(p) = (l/b) \sqrt{\mu_0 p / \gamma}, \quad (9)$$

де  $l, b$  – довжина та ширина шини, відповідно;  
 $\gamma$  – питома провідність матеріалу шини;  
 $p$  – параметр перетворення Лапласа.

*Рис. 3. Конструкційна схема та схема заміщення сегментного УТ.*

Диференціальні рівняння кола були записані в операторній формі. Перехід до оригіналів перехідних струмів здійснювався за допомогою узагальненої теореми розкладу (теореми Ефроса). Остаточний вигляд оригіналу струму:

$$I(t) = \sum_{k=1}^5 \frac{A(p_k)}{p_k B(p_k)} \exp \left[ p_k^2 t \right] - \Phi \left[ p_k \sqrt{t} \right], \quad (10)$$

де  $A(p), B(p)$  – поліноми відносно  $p$ ;  
 $p_k$  – корені поліному п'ятого степеня  $B(p)$ ;  
 $\Phi$  – інтеграл ймовірностей.

Корені  $p_k$  – дійсні або комплексно-спряжені. Для обчислювання інтегралу ймовірностей від комплексного аргументу використовувалося його зображення у вигляді суми нескінченного ряду.

З розрахунків випливає, що для ефективної роботи УТ необхідно:

$$L_1 \geq 20(\mu_0 dh / b) \geq 20L_B, \quad (11)$$

де  $d$  – периметр первинної обмотки УТ;  
 $h$  – товщина ізоляційного зазору між обмотками.  
 Подальший аналіз дає:

$$b = 0,02 \dots 0,08 \bar{d}; \quad h \leq 0,02b. \quad (12)$$

Як і у попередньому розділі, параметрами оптимізації були: кількість вторинних витків-сегментів  $n$  та індуктивність первинної обмотки  $L_1$ . Функція мети – коефіцієнт використання енергії  $\eta$ , обмежувальною умовою є задана висока частота розрядного струму.

$$\frac{\partial \eta(L_{1onm}, n_{onm})}{\partial L_1} = 0, \quad \frac{\partial \eta(L_{1onm}, n_{onm})}{\partial n} = 0. \quad (13)$$

Розв'язання рівнянь (13) дає результати:

$$L_{1onm} \rightarrow \infty, \quad (14)$$

$$n_{onm} = 4 \sqrt{\frac{L_1^2 (L_{01} + L_B)}{(L_1 + L_{01})(L_{02} + L_H)^2}}. \quad (15)$$

Одержано також формули для розрахунку оптимальної та максимально допустимої для ефективної роботи УТ індуктивності навантаження.

Надалі було зроблено аналіз перехідного процесу в контурі ГСІМП з УТ методами теорії електромагнітного поля, щоб підтвердити обґрунтованість використання схем заміщення УТ.

Задача зводиться до розв'язання інтегро-диференціального рівняння:

$$\frac{1}{\sqrt{\gamma^*(Q)}} \int_0^{t^*} \frac{dJ^*(Q, \tau)}{d\tau} \frac{d\tau}{\sqrt{t^* - \tau}} + \int \frac{\partial J^*(M, t_*)}{\partial t^*} R(Q, M) dl^* = J^* \quad (16)$$

де  $J^*$  – безрозмірна лінійна густина поверхневого струму;  
 $t^*$  – безрозмірний час;

$\gamma^*$  – безрозмірна питома провідність матеріалу шин;

$dl^*$  – безрозмірний елемент контуру перерізу шин обмоток.

Ядро рівняння  $R(Q, M)$  – логарифмічного типу. Точка  $Q$  – точка спостереження,  $M$  – точка інтегрування. Рівняння (16) розв'язувалося чисельним методом на ЕОМ. Інтегралі замінялись кінцевими сумами. Розв'язання задачі зводилося до розв'язання системи звичайних диференціальних рівнянь методом Рунге–Кутта. При збігу точки  $M$  з точкою  $Q$  ядро рівняння має слабку особливість логарифмічного типу. Тому для обчислювання діагональних коефіцієнтів матриці, що апроксимує інтегральний оператор, використано штучне зміщення точки  $M$  від точки  $Q$  на малу величину  $\varepsilon$  (при цьому було використано результати робіт професора Михайлова В.М.). Результати розрахунків приведено на рис. 4.

Одержано також розподіл густини струмів в шинах УТ. Розрахунки добре збігаються з результатами вимірювань імпульсних струмів в шинах УТ. Вимірювання здійснювалися за допомогою поясу Роговського власного виготовлення та калібрування.

Результати розрахунків за допомогою схем заміщення для малих зазорів між шинами добре збігаються з результатами, що одержані методами теорії поля. Тому ця методика цілком може бути використана для інженерних розрахунків.

Рис. 4. Імпульси струму в шинах сегментного УТ:

1, 2 – зазор 2 мм;

3, 4 – зазор 10 мм.

Таблиця 2

Результати експериментальної перевірки сегментних УТ

Параметри УТ				$C, \text{ мкФ}$		$L_n + L_{02}, \text{ нГн}$		$I_n / I_1$		$f, \text{ кГц}$	
$aa, \text{ мм}^2$	$b, \text{ мм}$	$h, \text{ мм}$	$n$			розрах.	експ.	розрах.	експ.		
240r240	10	0,5	2	12	20	1,68	1,60	90,8	90,0		
240r240	10	0,5	4	12	15	2,86	2,80	77,4	80,0		
400r400	160	1	2	12	12,7	1,80	1,76	104	105		
400r400	160	8	2	12	12,7	1,57	1,40	90,9	96,0		
1000r 1000	100	0,5	2	600	200	1,50	1,55	7,5	7,6		
750r750	150	2	2	12	40	1,74	1,68	79,6	80,0		

Первинна обмотка усіх сегментних УТ з таблиці 2 мала (у плані) вигляд квадрата із стороною  $a$ . Шина, з якої виконано первинну обмотку та вторинні витки-сегменти, має ширину  $b$ . Ізоляційний зазор між обмотками –  $h$ , кількість сегментів –  $n$ .

**У четвертому розділі** викладено результати досліджень кільцевої схеми ГСІМП з узгодженням.

Ця схема базується на використанні сегментного УТ. Кільцеву схему ГСІМП з узгодженням приведено на рис. 5.

У схемі:  $C_1, \dots, C_4$  – модулі ємнісного нагромаджувача (замкнені у кільце);  $F_1, \dots, F_4$  – розрядники ( $F_1$  – керований розрядник). Ошиновка між модулями виконується з масивних плоских шин 1, що утворюють первинну обмотку сегментного УТ.

*Рис. 5. Кільцева схема ГСІМП з узгодженням.*

Вторинна обмотка складається з сегментів 2, 3, шини яких ізольовано прилягають до шин первинної обмотки. Якщо схему доповнити зарядними опорами модулів, то зарядно-розрядний контур цієї схеми буде аналогічним контуру генератора імпульсів напруги (ГІН) Маркса, що працює у режимі короткого замикання. Після пробою розрядника  $F_1$  пробій розрядників  $F_2, F_3, F_4$  забезпечується автоматично (подібно до роботи комутаторів ГІН). Таким чином, кільцева схема розв'язує дуже важливу для потужних ГСІМП проблему – проблему синхронної роботи комутаторів. У схемі на рис. 5 паразитний елемент ошиновка між модулями починає грати позитивну роль, бо є первинною обмоткою сегментного УТ. Таким чином досягаються ще два результати: підвищення коефіцієнту використання енергії та проблематична для звичайної кільцевої схеми робота на одне загальне навантаження.

Розрахунки розрядних струмів, оптимальних значень елементів кільцевої схеми з узгодженням проводяться за тими ж методиками та формулами, що й для сегментного УТ. Довжина сторони багатокутника первинного кола логічно дорівнює відстані між модулями нагромаджувача. При цьому первинна обмотка УТ має достатньо велику індуктивність (її розміри обмежуються габаритами установки), а індуктивність підключення модулів до “кільця” буде мінімальною.

Кільцева схема з узгодженням стала базою для створення нового покоління потужних ефективних високочастотних магнітно-імпульсних установок. Першою установкою такого типу стала МІУ-40С, для якої було обраховано аварійні режими. Аварійний режим виникає, коли має місце пробій конденсатора нагромаджувача. Можливим є розряд всього нагромаджувача на аварійний конденсатор, що може привести до вибуху останнього.

При аналізі аварійних режимів вважалось, що пробій відбувається миттєво. Аварійний конденсатор замінюється елементом з мінімальними індуктивністю та опором (дані щодо  $L_C, R_C$  отримані від к.т.н. Коліушка Г.М. з НТУ “ХПІ”). Напруга нагромаджувача при аварії приймалася максимальною. Розрахунки струмів через пробитий та “здорові” конденсатори при аварії було проведено чисельним методом для схем заміщення.

Аналогічні розрахунки було зроблено для традиційної схеми з паралельними модулями нагромаджувача. Також розраховувалося значення енергії, що виділялася у пробитому конденсаторі.

Розрахунки було зроблено для штатного режиму та розряду нагромаджувача через коло зарядження.

Результати розрахунків показують, що величина струму через аварійний конденсатор у кільцевій схемі з узгодженням суттєво нижче за критичний струм для обраного конденсатора (ИК-25-12 для МІУ-40С). По друге, цей струм значно нижче (на 20%) за величину струму через аварійний конденсатор у традиційній схемі. Притаманні традиційній схемі потужної МІУ аварійні режими, що пов'язані з несинхронною роботою комутаторів та спонтанним запуском комутатора, у кільцевій МІУ – неможливі.

Надалі, виходячи з узагальнюючих показників ефективності ГСІМП, показано, що кільцева МІУ з узгодженням є найбільш ефективною з високочастотних установок, що випускаються.

На кафедрі інженерної електрофізики НТУ “ХПІ” за кільцевою схемою з узгодженням

створено високочастотну установку МІУ-40С (енергія 38,4 кДж, власна частота 90 кГц, кількість модулів нагромаджувача 4, кількість вторинних витків-сегментів 2), на якій з успіхом проведено обтиск заготовок з легованих сталей та титанових сплавів.

## ВИСНОВКИ

1. У дисертації наведене теоретичне узагальнення і нове вирішення наукової задачі, що виявляється в удосконаленні розрядного контуру ГСІМП шляхом використання нових типів узгоджувачих трансформаторів та розробка на цій основі ефективних технологічних магнітно-імпульсних установок різної енергоємності з підвищеною частотою розрядного струму (70j120 кГц).
2. У роботі зроблено аналіз конструкцій узгоджувачих трансформаторів потужних імпульсних електрофізичних установок. Показано, що існуючі конст-рукції УТ не дозволяють оптимізувати компонування елементів розрядного контуру для створення установки з підвищеною частотою розрядного струму та побудувати генератор великої енергоємності з надійною системою спрацьовування комутаторів.
3. Розроблено новий тип узгоджувачого пристрою – коаксіальний узгоджувачий трансформатор (захищений авторським свідоцтвом), на основі якого створено конструкцію високочастотного ГСІМП з підвищеною енергетичною характеристикою навантаження. Коефіцієнт використання енергії для цих генераторів зростає у 2...3 рази порівняно з генераторами без УТ (при робочій частоті розрядного струму 70...120 кГц).
4. Запропоновано схему заміщення та методику розрахунку основних параметрів коаксіального УТ. Розраховано перехідний процес у розрядному контурі генератора з коаксіальним УТ. Показано, що кабельна ошиновка коаксіального УТ є частиною його обмоток.
5. Ефективність коаксіального УТ та правильність розрахунків підтверджено експериментально. Коаксіальний УТ рекомендовано для високочастотних ГСІМП з енергією до 10 кДж. Найбільш ефективною є схема з нагромаджувачем, що складається з одного конденсатора з коаксіальними виводами (ИК 25-12, ИК 50-3).
6. Розроблено оригінальний УТ сегментного типу (захищений авторськими свідоцтвами). Запропоновано схему заміщення та розраховано оптимальні параметри сегментного УТ. В схему заміщення для розрахунку перехідного процесу вводилися операторні перехідні опори (що були запозичені з теорії електромагнітного поля), що дозволило підвищити точність розрахунків.
7. Методами теорії електромагнітного поля розраховано струми та густину струму в шинах обмоток сегментного УТ при перехідному процесі в контурі генератора. Складено інтегро-диференціальне рівняння для системи, що розглядається, у наближенні різкого скін-ефекту та приведено алгоритм його чисельної реалізації.
8. Результати експериментальної перевірки добре збігаються з результатами розрахунків польовим методом і методом теорії кіл, що підтверджує правильність вибору схеми заміщення та ефективність сегментного УТ.
9. На основі сегментного УТ створено конструкцію ГСІМП кільцевого типу з узгодженням. Схема розрядного контуру такого генератора забезпечує розв'язання проблеми синхронного спрацьовування розрядників, що виникає при створенні потужних генераторів з ємнісними нагромаджувачами. Крім того, ошиновку між модулями нагромаджувача виконано таким чином, що вона є первинною обмоткою сегментного УТ (тобто паразитний елемент виконує позитивну роль). Це дозволило забезпечити роботу

нагромаджувача на одну нагрузку та підвищити коефіцієнт використання енергії. Для створеного ГСІМП максимальна енергія нагромаджувача дорівнює 38,4 кДж, а коефіцієнт використання енергії майже у 3 рази вищий від цього коефіцієнту для генератора без узгодження (при робочій частоті 70 кГц).

10. Проведено аналіз аварійних режимів, що можуть виникнути у кільцевій схемі з узгодженням. Показано, що ряд аварійних режимів та збоїв у роботі, притаманних традиційним схемам ГСІМП, неможливі для кільцевої схеми. Показано, що при пробі конденсатора одного з модулів величина аварійного струму не перевищує критичну для даного типу конденсатора (за найбільш жорсткими початковими умовами та для різних режимів роботи генератора) та на 20% менша за величину аварійного струму у традиційній схемі ГСІМП з паралельними модулями.

11. Кільцева схема з узгодженням відрізняється підвищеною надійністю роботи, високим коефіцієнтом якості та рекомендується для створення високочастотних ГСІМП з великою енергією, що запасається (більше 30 кДж).

12. Результати дисертаційної роботи використано при створенні високочастотних МІУ різної потужності на кафедрі інженерної електрофізики НТУ “ХПР”: МІУ–2С (2,4 кДж, 145 кГц), МІУ–10ВЧ (9,6 кДж, 90 кГц), МІУ–40С (38,4 кДж, 90 кГц), що впроваджено на підприємствах п/я А-7615, п/я М-5836, “Автоцветлит” (Мелітополь), “Сокіл” (Київ). Згадані МІУ експонувались на виставках та нагороджені дипломами та медалями. Крім того, результати роботи використано у навчальному процесі на кафедрі інженерної електрофізики НТУ “ХПР”.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Леденев В.В., Хименко Л.Т. Согласующий импульсный коаксиальный трансформатор // Приборы и техника эксперимента. – 1985. – №6. – С.123-125.
2. Леденев В.В., Хименко Л.Т. Сегментный согласующий трансформатор // Электротехника. – 1987. – №5. – С.6-9.
3. Леденев В.В. Магнитно-импульсная установка кольцевого типа с согласованием // Сборник научных трудов ХГПУ. Вып. 6: В четырех частях. Ч. 4. – Харьков: Харьк. гос. политехн. ун-т, 1998. – С.279-382.
4. Леденев В.В., Слепченко Е.А. Пояс Роговского для измерения сильных импульсных токов // Сборник научных трудов ХГПУ. Вып. 7: В четырех частях. Ч. 1, Харьков: Харьк. гос. политехн. ун-т, 1999. – С.421-424.
5. Леденев В.В. Влияние ошиновки на эффективность коаксиального согласующего трансформатора // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – 2000. – Вып. 107. – С.59-62.
6. Согласующее устройство для магнитно-импульсной установки: А.с. 794857 СССР, МКИ В21D 26/14 / В.В. Леденев, Л.Т. Хименко (СССР). – №2821446/25-27; Заявлено 20.09.79; Зарегистрировано 18.09.80. – 4с.
7. Согласующее устройство к магнитно-импульсной установке: А.с. 822434 СССР, МКИ В21D 26/14 / В.В. Леденев, Л.Т. Хименко, А.Т. Межуев (СССР). – №2780952/25-27; Заявлено 18.06.79; Зарегистрировано 12.12.80. – 7с.
8. Индуктор для магнитно-импульсной обработки цилиндрических заготовок: А.с. 832840 СССР, МКИ В21D 26/14 / В.В. Леденев, Л.Т. Хименко, А.Т. Межуев (СССР). – №2830310/25-27; Заявлено 19.06.78; Зарегистрировано 21.03.81. – 6с.
9. Импульсный трансформатор: А.с. 847831 СССР, МКИ Н01F 19/14, В21D 26/14 /

В.В. Леденев, Л.Т. Хищенко (СССР). – №2914410/25-27; Заявлено 19.04.80; Зареєстровано 19.04.80. – 5с.

10. Разрядник для магнітно-імпульсної установки: А.с. 1023713 СССР, МКИ В21D 26/14 / Л.Т. Хищенко, Л.Д. Горкин, В.В. Леденев, А.Т. Межуев (СССР). – №3237216/25-27; Заявлено 20.01.81; Зареєстровано 15.02.83. – 5с.

11. Соголасуюче пристроє до магнітно-імпульсної установки: А.с. 1023714 СССР, МКИ В21D 26/14 / Л.Т. Хищенко, Л.Д. Горкин, В.В. Леденев, А.Т. Межуев (СССР). – №3237390/25-27; Заявлено 20.01.81; Зареєстровано 15.02.83. – 5с.

12. Разрядное пристроє для магнітно-імпульсної обробки металів: А.с. 1043897 СССР, МКИ В21D 26/14 / А.Е. Выволокин, Е.И. Горелик, В.В. Леденев, Л.Т. Хищенко (СССР). – №3298009/25-27; Заявлено 11.06.81; Зареєстровано 23.05.83. – 5с.

13. Управляемый высоковольтный разрядник: А.с. 1640764 СССР, МКИ Н01Т 1/20, 2/20 / В.Д. Беспалов, В.В. Леденев, Л.А. Кацызная (СССР). – №4427886/07; Заявлено 23.05.88; Опубл. 07.07.91, Бюл. №13. – 5с.

14. Переходной процесс в магнітно-імпульсной установке с сооголасующим пристроєм / Леденев В.В., Хищенко Л.Т.; Харьк. политехн. ин-т. – Харьков, 1984. – 13с. Рус. – Деп. в Информэлектро №403эт–84 Деп. // Реферат в Библиогр. указателе ВИНТИ. Депонированные научные работы, №5. – 1985.

15. Переходной процесс в контуре с сооголасующим сегментным трансформатором / Леденев В.В., Орел А.И. Харьк. политехн. ин-т. – Харьков, 1987. – 17с. Рус. – Деп. в УкрНИИТИ 12.01.87, №319. – Ук.87.

16. Леденев В.В. Определение оптимальных параметров коаксиального сооголасующего трансформатора для магнітно-імпульсной установки // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье: Тр. Международ. науч.-техн. конф., Харьков 12-14 мая 1997 г. В пяти частях. Ч.1. – Харьков, Мишкольц, Магдебург.: Харьк. гос. политехн. ун-т, Мишкольц. ун-т, Магдебург ун-т, 1997. – С.382-386.

## АНОТАЦІЇ

*Леденьов В.В.* Удосконалення розрядного контуру генераторів сильних імпульсних магнітних полів з узгоджувачами трансформаторами. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.09.13 – техніка сильних електричних та магнітних полів. Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2001.

Дисертація присвячена удосконаленню розрядного кола генераторів сильних імпульсних магнітних полів з узгоджувачами трансформаторами для створення ефективних високочастотних генераторів різної потужності, насамперед для енергозберігаючих електрофізичних технологій.

У роботі проведено теоретичний аналіз перехідних процесів у розрядному колі генератора з узгоджувачами пристроями нових типів – коаксиальним та сегментним узгоджувачами трансформаторами. Аналіз проведено методами теорії електричних кіл з використанням запропонованих схем заміщення трансформаторів та методами теорії електромагнітного поля. Запропоновано методика розрахунку параметрів коаксиального та сегментного трансформаторів. Розроблено схему потужного кільцевого генератора з узгодженням, завдяки якій вирішується проблема синхронної роботи модулів ємнісного нагромаджувача енергії та проблема узгодження навантаження. Проаналізовано аварійні

режими, що можуть трапитись у розрядному колі кільцевого генератора, доведено ефективність і надійність його роботи. Проведений аналіз підтверджено експериментально. Створено високочастотні магнітно-імпульсні установки різної потужності з коаксіальним та сегментним узгоджувачами трансформаторами.

*Ключові слова:* генератор сильних імпульсних магнітних полів, розрядне коло, узгоджувачий трансформатор, схема заміщення, перехідний процес.

*Леденев В.В.* Усовершенствование разрядного контура генераторов сильных импульсных магнитных полей с согласующими трансформаторами. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.13 – техника сильных электрических и магнитных полей.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков, 2001.

Диссертация посвящена усовершенствованию разрядного контура генераторов сильных импульсных магнитных полей с согласующими трансформаторами для создания эффективных высокочастотных генераторов различной мощности, прежде всего для энергосберегающих электрофизических технологий.

В работе рассмотрены новые типы согласующих устройств – коаксиальный и сегментный импульсные трансформаторы, при создании которых реализована идея использования элементов разрядного контура генератора в качестве первичной обмотки трансформатора. Данные трансформаторы позволяют выполнить разрядный контур генератора с минимальной индуктивностью.

Для коаксиального согласующего трансформатора предложены схемы замещения, с помощью которых рассчитаны разрядные токи в контуре генератора. Показано, что проводники кабельной ошиновки являются частями первичной и вторичной обмоток трансформатора. Получено выражение для коэффициента трансформации тока с учетом влияния кабельной ошиновки. Расчеты оптимальных параметров согласующего устройства проведены методом сканирования (в качестве функции цели выбирался коэффициент использования энергии накопителя). Рассчитана величина оптимальной и максимально допустимой нагрузки. Проведенные расчеты подтверждены экспериментально. Для измерений импульсных токов использовался пояс Роговского собственного изготовления и калибровки. Даны рекомендации по применению коаксиального согласующего трансформатора.

Для сегментного согласующего трансформатора также предложены схемы замещения, в которые вводились заимствованные из теории электромагнитного поля переходные сопротивления шин трансформатора. Анализ переходного процесса в цепи генератора с сегментным трансформатором был проведен как с помощью схем замещения (методами теории цепей), так и методами теории электромагнитного поля. Результаты обоих расчетов близки друг другу и подтверждены экспериментами. Рассчитаны оптимальные индуктивность первичной обмотки, число вторичных витков-сегментов, индуктивность нагрузки и максимально допустимая индуктивность нагрузки. Получены соотношения для выбора геометрии шин трансформатора.

На основе сегментного согласующего трансформатора разработана схема мощного генератора кольцевого типа с согласованием. Модули емкостного накопителя, разделенные разрядниками (один из которых управляемый), соединены в замкнутое кольцо. Ошиновка между модулями выполнена из массивной плоской шины и служит первичной обмоткой сегментного согласующего трансформатора. Вторичной контур



образуют соединенные параллельно сегменты, шины которых изолированно прилегают к шинам первичной обмотки. Первичный контур генератора аналогичен замкнутому на конце генератору импульсов напряжения Маркса. Для такой схемы автоматически решается вопрос синхронного срабатывания разрядников. В работе проанализированы аварийные режимы в схеме, возникающие при пробое одного из конденсаторов. Показано, что ряд видов аварийных режимов для кольцевой схемы отсутствует. Величина аварийных токов (для базовой установки МИУ-40С) при различных вариантах разряда и самых жестких начальных условиях не превосходит допустимую для данного типа конденсатора и на 20% меньше, чем в традиционной схеме генератора с разрядом накопителя на нагрузку через параллельные разрядники. Даны рекомендации по выбору элементов схемы. Показано, что кольцевая схема с согласованием имеет наиболее высокий коэффициент качества из высокочастотных МИУ.

В НТУ "ХПИ" созданы магнитно-импульсные установки с коаксиальными трансформаторами: МИУ-2С (2,4 кДж, 145 кГц), МИУ-10ВЧ (9,6 кДж, 90 кГц) и кольцевого типа с согласованием: МИУ-40С (38,4 кДж, 90 кГц), внедренные на различных предприятиях Украины и СНГ.

*Ключевые слова:* генератор сильных импульсных магнитных полей, разрядный контур, согласующий трансформатор, схема замещения, переходный процесс.

Ledenyov V.V. Improvement of discharge circuit of pulse strong magnetic fields generator with matching transformers. – Manuscript.

The thesis is for technical sciences candidate's degree, speciality 05.09.13 - technics of strong electrical and magnetic fields. - National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, 2001.

The thesis is devoted to the improvement of the discharge circuit of pulse strong magnetic fields generators with matching transformers for creation of the effective high frequency generator of different power, first of all, for the electrophysical technology.

Theoretical analysis of the transient process in the generator discharge circuit with new types of matching transformers - the coaxial and segment ones has been fulfilled. Analysis has been fulfilled by methods of the electrical circuits theory (by using of equivalent schemes) and electromagnetic fields theory. The techniques of the coaxial and segment transformers calculations have been offered. The scheme of the powerful ring generator with matching has been elaborated. Synchronous discharge of capacitor storage modules and matching of a load are achieved by this design. The possible accident regimes in the ring scheme have been analysed. Efficiency and reliability of the ring generator have been proved. A high degree of agreement between calculations and experiments has been obtained. High frequency pulse magnetic installations of different energy with the coaxial and segment matching transformers have been fabricated.

*Key words:* pulse strong magnetic fields generator, discharge circuit, matching transformer, equivalent scheme, transient process.