

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут"

ІВАНОВ ВОЛОДИМИР МИХАЙЛОВИЧ



УДК 621.35.035:621.365

УДОСКОНАЛЕННЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ІМПУЛЬСНИХ
ТРАНСФОРМАТОРІВ З НАПІВПРОВІДНИКОВИМИ КОМУТАТОРАМИ ДЛЯ
ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНИХ УСТАНОВОК

Спеціальність 05.09.13 – Техніка сильних електричних та магнітних полів

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2015

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Науково-дослідному та проектно-конструкторському інституті "Молнія" Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України, м. Харків

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Бойко Микола Іванович,
Національний технічний університет "Харківський
політехнічний інститут",
професор кафедри інженерної електрофізики

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Бржезицький Володимир Олександрович,
Національний технічний університет України "Київський
політехнічний інститут",
в.о. зав. кафедри техніки та електрофізики високих напруг

кандидат технічних наук, доцент
Богуславський Леонід Зіновійович,
Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України,
завідувач відділом імпульсних електротехнічних систем

Захист відбудеться "14" січня 2016 р. о 14-30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 в Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут"

Автореферат розісланий "09" грудня 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



О.Ю. Юр'єва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток прискорювальної, лазерної техніки, керованого термоядерного синтезу, електророзрядних і пучкових технологій, радіолокації і т.д. стимулює створення імпульсних джерел енергії на напругу від декількох кіловольт до мегавольт, імпульсні струми від ампер до сотень кіло ампер, при цьому тривалість імпульсу може бути частки мілісекунд і наносекунд, частота повторення імпульсу – від одиниць до тисяч герц.

Трансформаторному джерелу живлення властивий високий ККД, реалізований на імпульсному трансформаторі з осередям з достатньо тонких листів і з низькоомними обмотками. Завдяки високому ККД ці джерела живлення можуть застосовуватися не тільки в одноразовому, а й у частотному режимах.

У деяких потужних високовольтних і імпульсних установках робота імпульсного пристрою практично неможлива без імпульсного трансформатора. Підвищення напруги за допомогою імпульсного трансформатора до рівня, необхідного за умовами роботи навантаження, особливо часто використовується в тих випадках, коли напруга джерела, що формує імпульси, обмежено допустимою напругою комутуючих приладів або електричною міцністю елементів генератора, що тривалий час знаходяться під напругою в процесі накопичення енергії.

Застосування імпульсного трансформатора з напівпровідниковими комутаторами в таких установках дозволяють використовувати можливості нових електротехнологічних процесів, що засновані на використанні прямої дії на оброблюваний матеріал сильних електричних та магнітних полів, застосуванні плазми газового імпульсного коронного розряду для плазмохімічних перетворень газового середовища і матеріалів, електроімпульсних методів дії на матеріал.

Удосконалення існуючих і створення нових імпульсних трансформаторів у зв'язці з напівпровідниковими комутаторами дозволить розробити технологічні електроустановки, які разом з отриманням імпульсів з коротким фронтом високої напруги з великими амплітудами мали б високий ресурс були зручні в експлуатації і високу частоту проходження імпульсів, що є актуальним завданням для розширення можливостей електротехнологій та визначило напрям дисертаційного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в Науково-дослідному та проектно-конструкторському інституті "Молнія" Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" у рамках завдань держбюджетних НДР МОН України: "Дослідження процесів при обробці продуктів і систем за допомогою комплексу високовольтних імпульсних дій" (№ ДР 0198U000383); "Розробка і дослідження нових методів високовольтних імпульсних дій при обробці продуктів і генерації озону" (№ ДР 0103U003740); "Розробка методів генерування високоінтенсивних чинників в коронному розряді з розширеною зоною іонізації" (№ ДР 0105U008735); "Розробка методів енергозбережного очищення речовин за допомогою імпульсного ко-

ронного розряду з розширеною зоною іонізації" (№ ДР 0108U010894); "Розробка нових енергозбережних методів поліпшення роботи двигунів внутрішнього згорання на основі імпульсного коронного розряду" (№ ДР 0110U007359) та господарської НДР «Створення і апробація дослідного зразка установки для перевірки можливості використання імпульсного коронного розряду для конверсії сирого коксового газу у газ, що містить в основному синтез-газ ($H_2 + CO$)» (ПАТ "Ясиновський коксохімічний завод", м. Макіївка), в яких здобувач був одним із основних виконавців.

Мета і завдання досліджень. Метою дослідження – удосконалення імпульсних трансформаторів генераторів високовольтних імпульсів електротехнологічних установок при їх мінімальних габаритах для отримання максимальних по амплітуді напруги і струмів для створення сильних імпульсних електричних та магнітних полів при мінімальних часах наростання з використанням напівпровідникових комутаторів.

Для досягнення мети поставлені задачі:

- аналіз існуючих принципів і пристроїв для отримання імпульсів високої напруги в електротехнологіях;

- вибрати напрями і методики дослідження процесів в колах з високовольтними імпульсними трансформаторами і напівпровідниковими комутаторами;

- розробка та експериментальне дослідження імпульсних трансформаторів в потужних низькоіндуктивних генераторах напруги;

- розробка та експериментальне дослідження імпульсних високовольтних трансформаторів в електротехнологічних установках з високою частотою дотримання імпульсів для отримання імпульсного коронного розряду з розширеною зоною іонізації (ІКР) та раціональних режимів роботи в імпульсних трансформаторах з напівпровідниковими комутаторами в генераторах для отримання ІКР.

Об'єктом дослідження є електромагнітні процеси в імпульсних генераторах високої напруги і великих струмів для технологічних електроустановок.

Предметом дослідження є особливості електромагнітних процесів в колах установок з високовольтними імпульсними трансформаторами, що містять напівпровідникові комутатори при зміні частоти дотримання імпульсів напруги і струму, амплітудних і часових параметрів імпульсів напруги і струмів.

Методи дослідження. Для вирішення завдань дисертації і досягнення поставленої мети дослідження електромагнітних процесів в колах з високовольтними імпульсними трансформаторами, що містять напівпровідникові комутатори використані методи теорії електричних кіл. Для дослідження електромагнітних процесів використовувався математичний апарат інтегро-дифференціальних рівнянь, фізичне і математичне моделювання із застосуванням прикладних комп'ютерних програм. Експериментальні дослідження проводилися на повномасштабних зразках джерел з використанням експериментальних високовольтних стендів, оригінальних і традиційних методів вимірів.

Наукова новизна одержаних результатів:

– вперше експериментально визначено час наростання імпульсів напруг – менше 100 нс на формуючому пристрої з ємністю не менше 5×10^{-10} Ф при імпульсній напрузі до 1 МВ від імпульсного трансформатора (коефіцієнт трансформації 10) з мінімальною індуктивністю розсіювання 5×10^{-7} Гн отриманою при виконанні сталевого магнітопроводу трансформатора хрестоподібним замкнутим.

– удосконалено феромагнітний магнітопровід в імпульсному трансформаторі за рахунок виконання його хрестоподібним, рознесеного розташування обмоток і раціонального розподілу потоку магнітної індукції, що дозволило зменшити індуктивність розсіювання приблизно в 3 рази.

– експериментально показано, що не існує принципів обмежень по амплітуді напруги U на виводах високовольтної обмотки імпульсного трансформатора з ємнісним навантаженням C_H , якщо джерелом енергії є індуктивність намагнічування L_μ з амплітудою струму в ній i_a : $U = i_a \times \sqrt{L_\mu / C_H}$ (C_H – ємність навантаження високовольтної обмотки без приведення до низьковольтної (первинної) обмотки; L_μ – індуктивність намагнічування з боку первинної обмотки імпульсного трансформатора).

– вперше запропонована і реалізована рекуперація енергії в генераторах з ємнісним навантаженням на основі імпульсного трансформатора за допомогою напівпровідникових ключів і раціонального підбору моментів часу вмикання та вимикання цих ключів.

– запропоновані і реалізовані режими роботи високовольтних генераторів на основі імпульсного трансформатора з напівпровідниковими ключами як розмикальних комутаторів, що забезпечують відсутність коротких сплесків з неприпустимо високою амплітудою на напівпровідниковому ключі при його розмиканні.

Практичне значення отриманих результатів для техніки сильних електричних і магнітних полів:

– розроблено і створено імпульсні трансформатори з низькою індуктивністю розсіювання для генератора імпульсів напругою до 1 МВ;

– запропонована схема з використанням двох імпульсних трансформаторів з коефіцієнтом трансформації $n = 31/3 = 10,3$ у кожного дозволила створити компактне трансформаторне імпульсне джерело напруги з часом $t_\phi \approx 100$ нс наростання імпульсів на навантаженні ємності ≈ 1 нФ і напругою до 1 МВ;

– розроблено і виготовлено компактний високовольтний імпульсний генератор на основі імпульсного трансформатора з напівпровідниковими комутаторами з частотою дотримання імпульсів до 50 000 імп/с;

– експериментально показана можливість високої електромагнітної сумісності керованих силових напівпровідникових приладів з імпульсним трансформатором при їх розташуванні в компактному загальному корпусі $300 \times 210 \times 150$ мм, робочій імпульсній напрузі до 20 кВ, частотах дотримання імпульсів до

50 000 імпульсів/с, середніх потужностях, споживаних з мережі, до 1,5 кВт і нагріві корпусу трансформатора з оргскла до 50° С;

– надано практичні рекомендації з електромагнітної сумісності керованих напівпровідникових комутаторів електротехнологічних установок в умовах сильних електромагнітних завад.

Результати дисертації використані при виконанні держбюджетних і госпдоговірних робіт в 1998–2014 роках в НДПКІ "Молнія" НТУ "ХПИ" та впроваджено у навчальний процес кафедри інженерної електрофізики НТУ «ХП», дипломному проектуванні та науково-дослідних роботах. На основі наукових та практичних результатів дисертаційної роботи удосконалені імпульсні трансформатори разом з напівпровідниковими комутаторами впроваджено в дослідний зразок установки для перевірки можливості використання ІКР для конверсії сирого коксового газу в газ, який містить в основному синтез-газ (H_2+CO), які проводились на ПАТ "Ясинівський коксохімічний завод", про що свідчить отриманий акт впровадження.

Особистий внесок здобувача. Положення та результати, винесені на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них:

– експериментально обґрунтовано то, що в електричному колі з двома високонвольтними імпульсними трансформаторами (на 100 кВ і 1000 кВ), в котрих як первинні так і вторинні обмотки рознесені і розташовані не на одному загальному стрижні, а на чотирьох хрестоподібно розташованих частинах розщепленого магнітопроводу, можливо зменшити результуючу індуктивність розрядного контуру установки з паралельно ввімкненими чотирма обмотками кожного імпульсного трансформатора приблизно в три рази;

– досліджено можливість отримання високої напруги за допомогою одновиткового імпульсного трансформатора;

– експериментально дослідженні два імпульсних трансформатора, з коефіцієнтом трансформації 10,3 у кожного, компактного трансформаторного джерела напруги з часом наростання 250 нс імпульсів на ємнісному навантаженні 1 нФ напругою до 1 МВ;

– експериментально і теоретично обґрунтуванні процеси в колах з імпульсним трансформатором з напівпровідниковими комутаторами при великих частотах дотримання імпульсів напруги на ємнісному навантаженні.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи, доповідалися та обговорювалися і отримали позитивні відгуки на: Міжнародних симпозіумах «Проблеми вдосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика» (SIEMA), (м. Харків, 2004, 2006–2008, 2010–2014 рр.); Міжнародній науковій конференції "Высокоинтенсивные физические факторы в биологии, медицине, сельском хозяйстве и экологии", (Саров, Росія, 2004 р.); Міжнародних наукових школі-семінарі "Фізика імпульсних розрядів у конденсованих середовищах", (м. Миколаїв, 2005, 2009 рр.); Міжнародних конференціях "Співробітництво для вирішення проблеми відходів", (м. Харків, 2006–2011 рр.); Міжнародних конференціях "Ultrawideband And Ultrashort Impulse

Signals", (м. Севастопіль, 2006; 2008; 2010 pp.); Міжнародній конференції "Проблеми сучасної електротехніки–2006", (м. Київ, 2006 р.); Всеросійських семінарах "Озон и другие, экологически чистые окислители. Наука и технологии", (м. Москва, Росія, 2008, 2010 pp.); Міжнародних науково-практичних конференціях "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я", (м. Харків, 2014, 2015 pp.).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 21 наукових публікаціях, з них 15 – у наукових фахових виданнях України, 4 – у закордонних періодичних фахових виданнях, 2 – у матеріалах конференцій.

Структуру і об'єм дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел інформації і додатка. Повний обсяг дисертації складає 166 сторінки, з них: 77 рисунків та 1 таблиця по тексту; 2 рисунки на 2 сторінках; список використаних джерел із 71 джерела на 13 сторінках; 1 додатка на 5 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі до дисертаційної роботи обґрунтована актуальність теми, сформульовані мета, основні завдання, новизна і практична цінність отриманих результатів, визначені об'єкти і методи дослідження, приведені відомості по реалізації і апробації отриманих результатів, розкритий зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

У першому розділі наведено аналітичний огляд схем і параметрів високовольтних джерел напруги електротехнологічних пристроїв з використанням напівпровідникових ключів, а також імпульсних трансформаторів, які використовуються або можуть бути використані в технологічних електроустановках. Високовольтні імпульсні джерела напруг технологічних електроустановок включають в себе, як правило, накопичувач енергії, систему множення (трансформації) напруги, систему комутації та управління. В якості накопичувача енергії в них використовуються ємнісні і індуктивні накопичувачі. Збільшення напруги може досягатися різними способами: наприклад, перемиканням елементів накопичувача з паралельного на послідовне, використанням імпульсного трансформатора, різким обривом зарядного струму індуктивного накопичувача, а також різними способами з'єднання і конструктивного виконання формують ліній. Як комутатори використовуються іскрові розрядники, газорозрядні лампи, тиратрони та напівпровідникові комутатори. Проведено аналіз можливості використання в електротехнологічних установках існуючих електричних схем, вживаних в генераторах імпульсів для наукових досліджень. На підставі проведеного аналізу сформульовані завдання, що вирішуються в дисертації.

Другий розділ присвячений обґрунтуванню вибору напряму досліджень і методів цих досліджень в колах з імпульсними трансформаторами разом з напівпровідниковими комутаторами, розташованими з боку низьковольтної обмотки імпульсного трансформатора.

Імпульсний трансформатор входить складовим елементом в різні типи генераторів електричних імпульсів, виконуючи функції ланки, що погоджує, між цим генератором і опором навантаження. Як генератор імпульсів, так і опір навантаження характеризуються деякими параметрами, які разом з параметрами трансформатора визначають умови передачі імпульсної енергії від генератора до навантаження. Тому при проектуванні імпульсного трансформатора необхідно враховувати не лише параметри власне трансформатора, але і параметри генератора імпульсів і опору навантаження. Ця обставина вимагає розглядати при розрахунку не ізольовану еквівалентну схему трансформатора, а увесь трансформаторне коло.

Відзначено, що особливістю характеру роботи імпульсного трансформатора є короткочасність кожного робочого циклу і пов'язаний з цим характер процесів, що відбуваються в обмотках і магнітопроводі імпульсного трансформатора. Висока швидкість зміни магнітного потоку викликає появу значних вихрових струмів в магнітопроводі і пов'язані з ними втрати енергії. Короткочасний вплив імпульсів вимагає враховувати не тільки індуктивні, а й ємнісні параметри обмоток, що визначають характер формування фронту імпульсу і енергетичні характеристики імпульсного трансформатора. Малі тривалості імпульсів викликають необхідність враховувати поверхневий ефект в проводах обмоток при визначенні електричних втрат.

На основі аналітичного аналізу електромагнітних процесів проаналізовано функціональні можливості підвищення напруги за допомогою імпульсного трансформатора з одним витком, за допомогою яких отримані величини напруги до одиниць мегавольт, що задовольняє запитам сучасних електротехнічних (у тому числі технологічних) установок.

Третій розділ присвячений експериментальному дослідженню удосконалених імпульсних трансформаторів в потужних низькоіндуктивних генераторах напруги.

Формування вихідної напруги з великою крутизною фронту вимагає перенапруження для забезпечення швидкої комутації вихідних високовольтних розрядників. На рис. 1 представлена спрощена схема генератора мегавольтних імпульсів з наносекундним фронтом з двоступінчатим блоком підвищення імпульсної

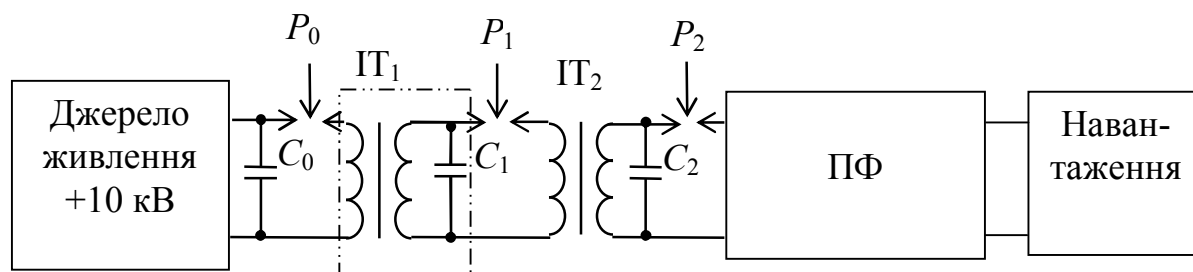


Рисунок 1 – Спрощена схема генератора мегавольтних імпульсів з наносекундним фронтом

напруги на унікальних удосконалених імпульсних трансформаторах IT_1 і IT_2 , між якими розташовуються проміжний накопичувач енергії C_1 . Принцип роботи генератора полягає в такому: перша ступінь, на трансформаторі IT_1 , підвищує напругу від 10 кВ до 100 кВ, а друга, на трансформаторі IT_2 , від рівня 100 кВ до

1000 кВ. Накопичувач C_1 , який є навантаженням трансформатора IT_1 , приєднується до багатоканального розрядника – тригatronу P_1 . На первинну обмотку трансформатора IT_1 імпульсна напруга поступає після спрацьовування стартового розрядника P_0 . До вторинної обмотки трансформатора IT_2 приєднано

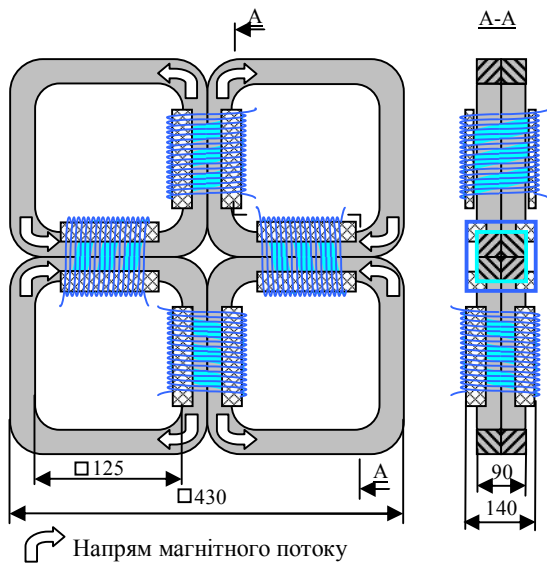


Рисунок 2 – Конструкція стрижня IT_1

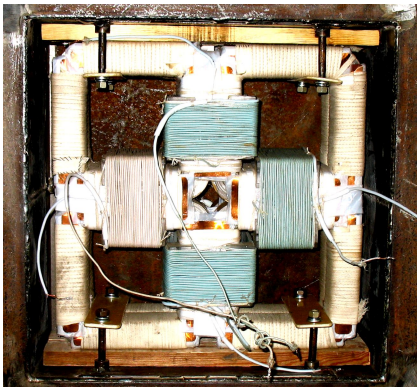


Рисунок 3 – Фотографія IT_1

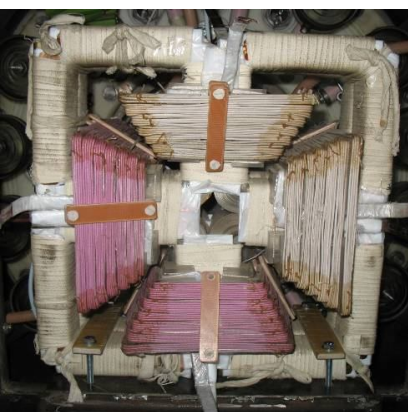


Рисунок 4 – Фотографії IT_2

накопичувач C_2 мегавольтного діапазону, який є накопичувачем для вихідного пристрою формування (ПФ) імпульсів.

Трансформатори IT_1 і IT_2 виконані з можливо нижчою індуктивністю розсіювання і близьким до одиниці коефіцієнтом зв'язку між обмотками імпульсного трансформатора. У первинній обмотці кожного трансформатора розташовано 3 витки, а у вторинній 31. Складений стрижень удосконаленого імпульсного трансформатора виконано з 8 стрижнів малого розміру з внутрішнім вікном 125×125 мм і перерізом 35×40 мм². Стрижень імпульсного трансформатора намотано з тонкої електротехнічної сталеві стрічки завтовшки 80 мкм і шириною 40 мм. З'єднання стрижнів показано на рис. 2.

Гострі кути стрижня закриті з внутрішнього боку градієнтним екраном. Відзначено, що останній виток високовольтного кінця обмотки для зниження напруженості електричного поля виконано дротом більшого діаметру, а виведення поміщено в додаткову ізоляційну фторопластову трубку і максимально віддалено від поверхонь нульового потенціалу. Високовольтне виведення трансформатора IT_2 з'єднується з високовольтним провідником навантаження IT_2 . Рівномірне збільшення напруги по довжині обмотки забезпечує достатню однорідність електричного поля в ізоляційному проміжку між витками і стрижнем магнітопроводу імпульсного трансформатора. Витки вторинної обмотки розміщуються в пазах конічних опор. Для ізоляції використовується трансформаторне масло, що заповнює усі порожнечі і порожнини трансформатора. На рис. 3 і рис. 4 наведено фотографії трансформаторів IT_1 і IT_2 , які закріплені кожен у своєму металевому корпусі і залиті

трансформаторним маслом. Розрахована індуктивність розсіювання трансформатора IT_1 , що зведена до вторинної обмотки, склала $4,75 \times 10^{-5}$ Гн.

Схема попередніх досліджень трансформатора ІТ₁ на низькій напрузі показана на рис. 5. Еквівалентна схема розряду накопичувального конденсатора через імпульсний трансформатор на ємнісне навантаження (без урахування індуктивності намагнічування трансформатора) приведена на рис. 6.

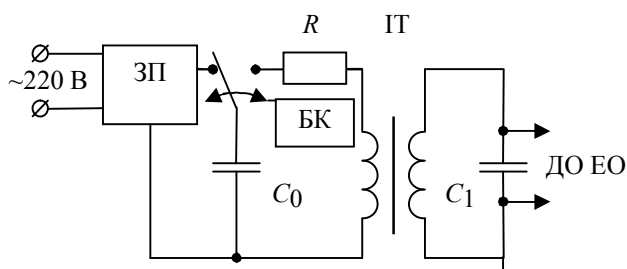


Рисунок 5 – Схема для дослідження ІТ

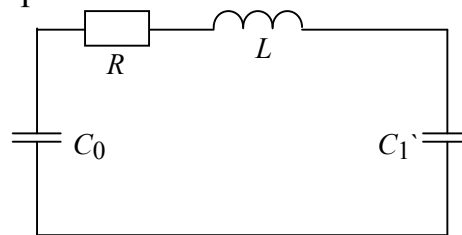


Рисунок 6 – Еквівалентна схема розрядного контура

Встановлено, що при розряді ємності C_0 на коло $R - L - C_1$, де C_1 – зведена ємність навантаження, від величини ємності навантаження залежить величина максимальної напруги, до якої вона заряджається.

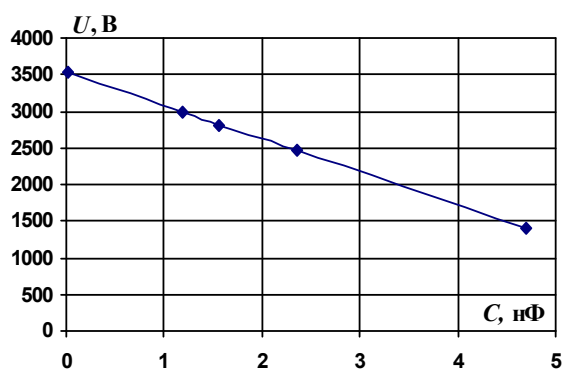


Рисунок 7 – Максимальна напруга на навантаженні

При значенні накопичувальної ємності $C_0 = 0,2$ мкФ та значеннях ємності навантаження C_1 : 0,01 нФ, 1,18 нФ, 1,56 нФ, 2,35 нФ та 4,7 нФ виміряно величини максимальної напруги на навантаженні C_1 і побудовано графік цієї залежності (рис. 7) з якого видно, що при збільшенні значення ємності навантаження величина максимальної напруги на ній зменшується.

Вимірний період коливань T напруги на навантаженні при комутації накопичувача $C_0 = 0,2$ мкФ і ємності навантаження $C_1 = 1,56$ нФ склав 1,23 мкс. При цьому Індуктивність L_3 усього розрядного контура, що розраховувалась по формулі $L_3 = T^2 / (4\pi^2 C)$, де T – вимірний період коливань; C – еквівалентна ємність розрядного контура, склала $4,37 \times 10^{-5}$ Гн. Розрахована індуктивність розсіяння імпульсного трансформатора склала $4,75 \times 10^{-5}$ Гн.

На рис. 8 наведені осцилограми імпульсу напруги на ємності $C_1 = 20,0$ нФ та

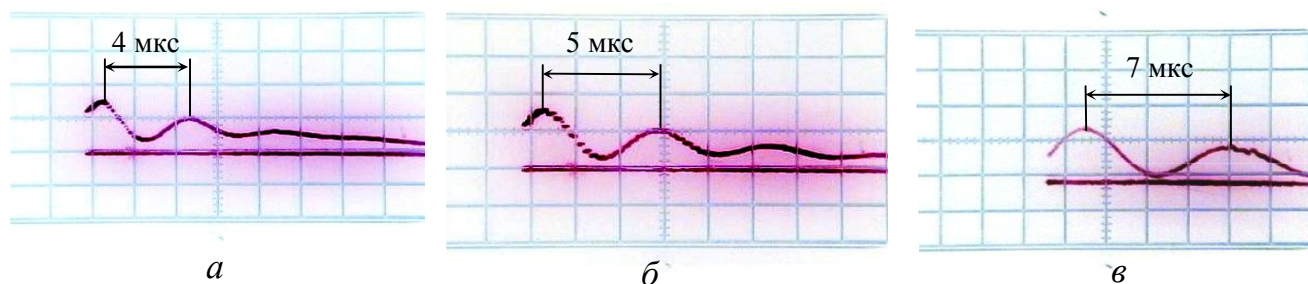


Рисунок 8 – Осцилограми імпульсів напруги на вторинній обмотці (2мкс/кліт)

ємності $C_0 = 2$ мкФ: при підключенні паралельно усіх чотирьох обмоток (рис. 8а) період коливань склав ~ 4 мкс, двох обмоток (рис. 8б) період склав ~ 5 мкс, а однієї

обмотки (рис. 8в) період склав ~ 7 мкс. Розрахований період коливаний імпульсу склав: для чотирьох обмоток – 4,33 мкс, для двох обмоток – 6,12 мкс і для однієї обмотки – 8,66 мкс.

На рис. 9 приведені осцилограми імпульсів напруги на первинній (рис. 9а) і вторинній (рис. 9б) обмотці трансформатора IT_1 при роботі генератора імпульсів до 1 МВ (див. рис. 1). Після спрацьовування розрядника P_1 імпульсна напруга подавалася на первинну обмотку трансформатора IT_2 , а на вторинній обмотці, що

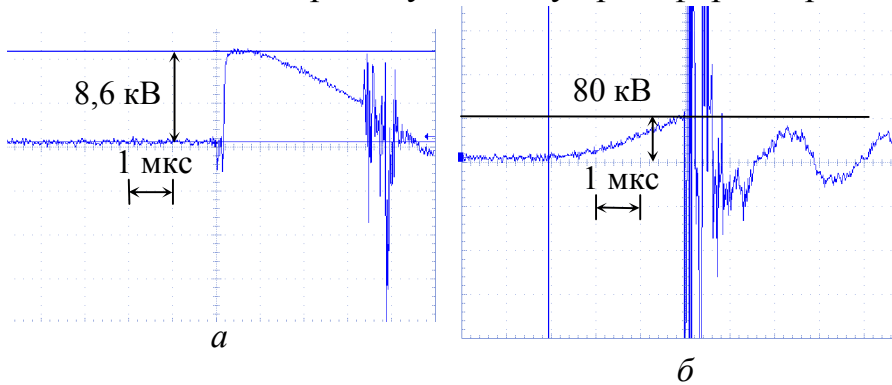
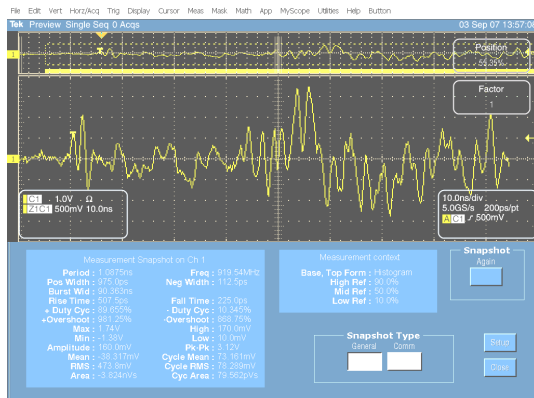


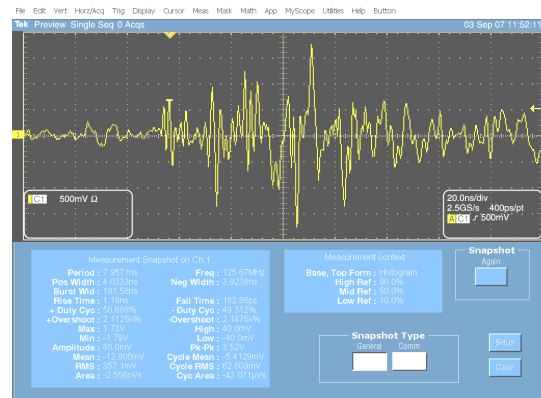
Рисунок 9 – Осцилограми імпульсів напруги на первинній (а) і вторинній (б) обмотках IT_1

навантажена на C_2 , створювалася імпульсна напруга з амплітудою до 800 кВ. При спрацьовуванні розрядника P_2 ця імпульсна напруга із загостреним фронтом подавалася на ПФ і потім на навантаження.

Накопичувач C_2 є накопичувачем для першого ступеня ПФ. Перший ступінь ПФ має ємність $C_3 \approx 1,6$ нФ на номінальну напругу 1 МВ. Встановлено, що характерний час заряду накопичувача C_3 складає $400 \div 500$ нс. Після заряду накопичувача C_3 , що складається з 16-ти гліцеринових ємностей, формується розряд його по 16-ти автономних каналах ПФ. Розряд 16-ти ємностей у складі C_3 здійснюється через 16 тригатронів, що синхронно спрацьовують, або в керованому, або в некерованому режимі.



а



б

Рисунок 10 – Осцилограма напруги з ТЕМ – датчика

Експериментальним шляхом вирішувалася синхронність спрацьовування усіх 16-ти каналів генератора, що закінчуються антенами випромінювача. Встановлено, що досягнута синхронність спрацьовування каналів достатня для того, щоб жоден з каналів не виявився зашунтованим іншими. На рис. 10 наведені осцилограми напруги з ТЕМ-рупорних датчиків напруженості електричного поля імпульсів. Виміри проведені на відстані ≈ 4 м від випромінювача. Величина напруженос-

ті складала приблизно 3 кВ/м при амплітуді напруги на вході ПФ генератора ~300 кВ. При цьому енергія в імпульсі перевищувала 100 Дж, а імпульсна потужність на виході генератора досягала 11 ГВт.

Четвертий розділ присвячено експериментальному дослідженню високовольтного імпульсного трансформатора з напівпровідниковими комутаторами в електротехнологічних установках з великою частотою дотримання імпульсів.

Розроблено і створено унікальний компактний генератор високовольтних імпульсів на основі імпульсного трансформатора з *IGBT* комутатором, що розмикає, схему заміщення якого надано на рис. 11.

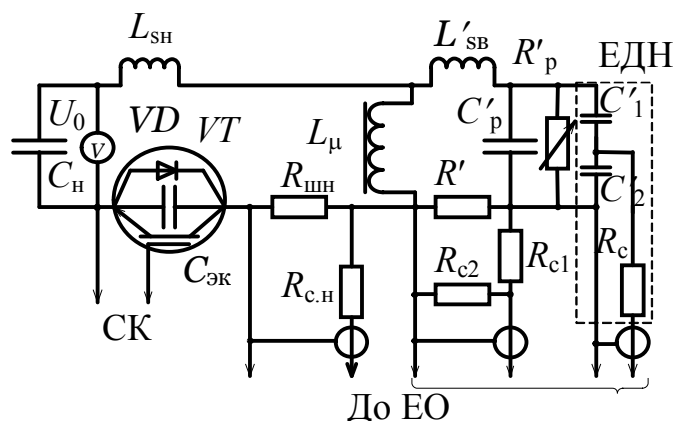


Рисунок 11 – Схема заміщення генератора

У відмінності від роботи генератора, коли максимум напруги на реакторі досягається в результаті замикання *IGBT* ключа (не може перевищити $U_p = 2 \times n_t \times U_0$, де n_t – коефіцієнт трансформації імпульсного трансформатора), реалізований режим, коли максимум напруги на реакторі досягається при розмиканні *IGBT* ключа умовно ділиться на два етапи: спочатку енергія з накопичувача C_H передається в індуктивність намагнічення L_μ імпульсного трансформатора, а потім передається (перемикається) з індуктивності L_μ в навантаження – ємність C'_p реактора. Встановлено, що напруга U_p на реакторі залежить від амплітуди i_k колекторного струму у момент розмикання ключа і дорівнює $U_p = i_k (L_\mu / C'_p)^{1/2}$ і $U_{p,\max} = i_{k,\max} (L_\mu / C'_p)^{1/2}$, де $i_{k,\max}$ – максимальне значення i_k . На схемі заміщення виділяють три основних *LC* контура: 1. $C_H - L_{SH} - L_\mu - C_H$; 2. $L_\mu - L'_{SB} - C'_p - L_\mu$; 3. $L_{SH} - L'_{SB} - C'_p - C_H - L_{SH}$.

Відмічено що, для безаварійної роботи схеми потрібне дотримання умов: в початковий момент кожного циклу роботи ємність реактора C'_p має бути заряджена до напруги первинного накопичувача C_H ; ємність переходу "колектор–емітер" в *IGBT* ключі не заряджена; струми в схемі генератора в початковий момент не протікають.

Осцилограми процесу генерування імпульсів показані на рис. 12, на яких вказані моменти: А – вмикання (замикання) *IGBT* ключа, Б – вимикання (розмикання) *IGBT* ключа, В – зміни полярності напруги на зворотних діодах *IGBT* ключа на ту, що замикає. З осцилограм на рис. 12в струм в реакторі в момент А дорівнює 0, що підтверджує факт вирівнювання напруги на C_H і C'_p . Після подачі імпульсу, що керує, у момент часу А *IGBT* ключ відкривається. Струм протікає крізь первинну обмотку імпульсного трансформатора, зведену індуктивність розсіювання L'_{SB} вторинної обмотки імпульсного трансформатора і зведену ємність реактора C'_p з нелінійним зведеним активним опором R'_p .

Лінійне наростання колекторного струму має місце внаслідок того, що пері-

од синусоїди ($T_1=2\pi(L_\mu C_H)^{1/2}$) складає 4,25 мс. У момент $t_{ок}$ струм при значенні $i_{к.макс}$ обривається, і енергія $W=L_\mu i_{к.макс}^2/2$ передається з L_μ в навантаження. Час $t_{фр}$ струму i_k і струму в реакторі визначаються часом виключення *IGBT* ключа. Час наростання напруги до максимуму за абсолютною величиною на реакторі і на *IGBT* ключі (по осцилограмах на рис. 12в (4,5 мкс) є чверть періоду $T_2=2\pi(L_\mu C'_p)^{1/2}$, тобто $T_2/4=(\pi/2)\times(L_\mu C'_p)^{1/2}$ – в другому з вказаних *LC* контурів. Внаслідок розмикання *IGBT* ключа амплітуда напруги, що з'являється, на *IGBT* $U_{эк.макс}$ і на реакторі $U_{р.макс}$ визначається, без урахування втрат, за допомогою закону збереження енергії $L_\mu i_{к.макс}^2(t_{ок})/2=C_p U_{р.макс}^2/2$. Звідси витікає, що $U_{р.макс}=i_{к.макс}(t_{ок})\times(L_\mu/C_p)^{1/2}$, тобто амплітуда напруги $U_{р.макс}$ на реакторі пропорційна максимальній величині колекторного струму через *IGBT* ключ у момент його обриву. Це означає, що немає принципових обмежень згори для $U_{р.макс}$ при такому способі подачі енергії в ємність реактора C_p . Амплітуда напруги на первинній обмотці імпульсного трансформатора при розмиканні *IGBT* ключа обмежується максимально допустимою напругою між колектором і емітером *IGBT* ключа.

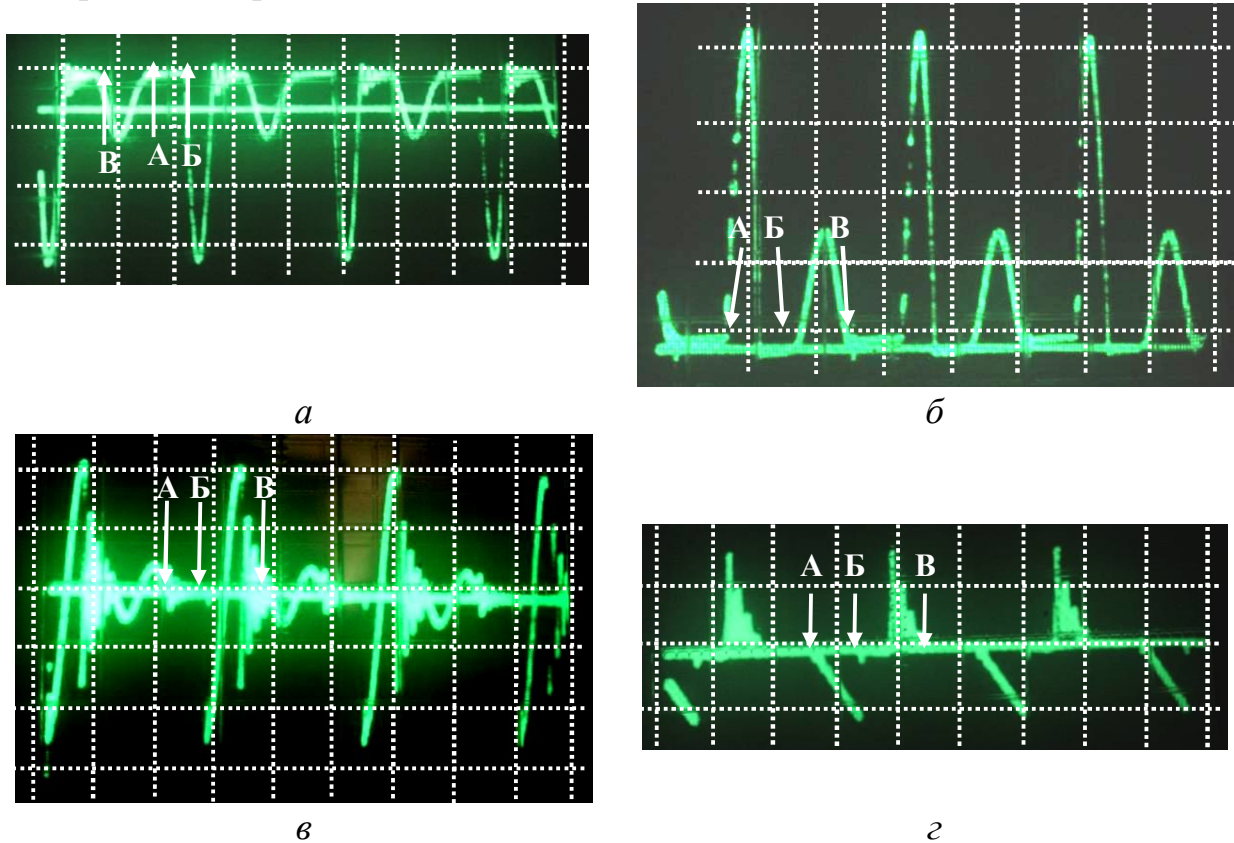


Рисунок 12 – Осцилограми напруги і струму на реакторі: а – 2,6 кВ/кліт., 20 мкс/кліт.; в – 20 мкс/кліт., 4 мА/кліт. і на переході "колектор–емітер" *IGBT* ключа: б – 10 В/кліт., 20 мкс/кліт.; г – 20 мкс/кліт., 1,9 А/кліт.

Експериментально виявлено що, після обриву струму в *IGBT* ключі має місце пауза струму в ній протягом $T_2/2 = \pi(L_\mu C'_p)^{1/2} \approx 9$ мкс. Протягом цього напівперіоду по синусоїді від нуля до максимуму наростає, а потім знову спадає до нуля напруга на ємності $C_{эк}$ *IGBT* ключа. У момент закінчення паузи струму через *IGBT* ключ напруга на ній переходить через нуль, та змінює знак. У цей

момент протікає струм через індуктивність розсіяння L_{sg} високовольтної обмотки імпульсного трансформатора і в генераторі з'являються коливання з найменшим періодом – в третьому з вказаних основних LC контурів $T_3=2\pi((L_{sh}+L'_{sb})C'_p)^{1/2}\approx 2.5$ мкс. Струм, що протікає, повертає з L_μ енергію, не виділену в реакторі, назад в первинний накопичувач C_H . Коливання з найменшим періодом T_3 швидко затухають із-за малої добротності розрядного контура $L_{sh} - L'_{sb} - C'_p - C_H - L_{sh}$. До моменту замикання зворотних діодів коливання з найменшим періодом T_3 майже повністю затухають. У момент замикання зворотних діодів ніякі струми в розрядних колах генератора не протікають, місткості C_H і C'_p заряджені до однієї і тієї ж напруги U_0 і включені зустрічно, а $IGBT$ ключ закритий (розімкнут). Тому шляху для розряду зарядженої місткості C_H немає (оскільки $C_{эк}\ll C'_p$), а для місткості $C'_p - \epsilon$ (через індуктивність намагнічення L_μ). Ємність C'_p розряджається на L_μ , а потім перезаряджається, міняючи знак напруги на своїх обкладаннях (див. рис 4.3а). Далі напруга на C'_p досягає початкового значення U_0 і завершує повний період, рівний $T_2\approx 18$ мкс. Процесу зміни напруги на C'_p протягом періоду T_2 відповідає процес зміни струму в контурі $C'_p - L_\mu - L'_{sg} - C'_p$ по синусоїді з періодом T_2 . Після цього процес в

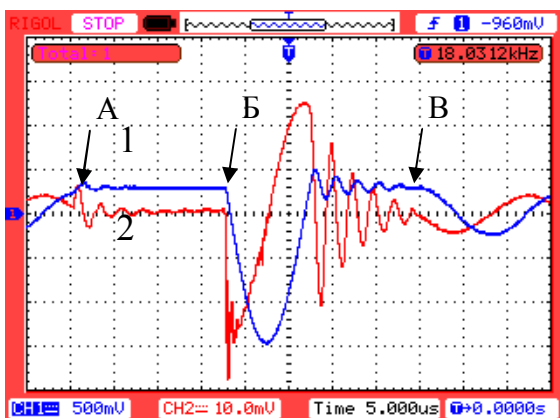


Рисунок 13 – Осцилограми напруги (крива 1) і струму (крива 2). 5 мкс/кліт., крива 1 – 500 мВ/кліт, крива 2 – 10 мВ/кліт.

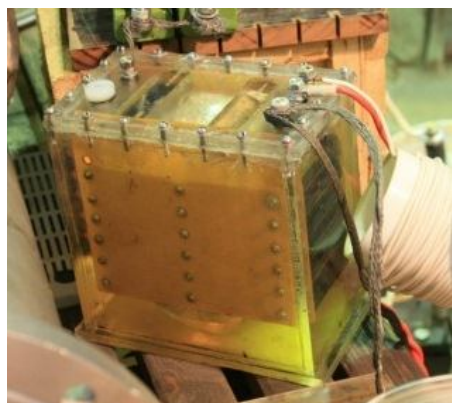


Рисунок 14 – Компактний імпульсний трансформатор на 20 кВ.

цьому режимі роботи компактного генератора повторюється. Таким чином отримано унікальну можливість отримання імпульсів напруги на навантажені імпульсного трансформатора.

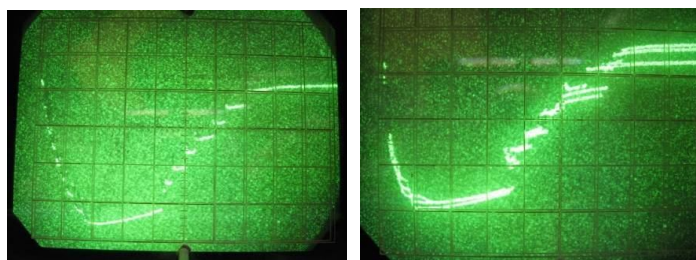
Встановлено, що для збільшення частоти дотримання імпульсів генератора імпульс управління поданий у момент замикання зворотних діодів дозволяє збільшити частоту дотримання імпульсів в реакторі відповідно до ≈ 28000 імп/с порівняно із ≈ 18000 імп/с для режиму з додатковим періодом.

Осцилограми напруги і струму в реакторі представлені на рис. 13. Коефіцієнт ділення ємнісного дільника напруги $k_d=5260$, тому на рис. 13 амплітуда напруги на реакторі по кривій 1 дорівнює $U_{p,max}=7890$ В. Опір струмового шунта $R_{ш}=2.5$ Ом, тому на рис. 13 амплітуда струму в реакторі по кривій 2 (без урахування викиду на фронті) рівна $I_p=0.01$ А.

Розроблений імпульсний трансформатор (рис. 14) компактного генератора виконаний на феритовому магнітопроводі з діелектричним проміжком, що складається з двох час-

тин. Первинна обмотка імпульсного трансформатора має $w_1=12$ витків, а вторинна обмотка $w_2=300$ витків, коефіцієнт трансформації $n_T=w_2/w_1=25$. Імпульсний трансформатор розташований в корпусі заповненому трансформаторним маслом. Діелектричний проміжок в магнітопроводі дозволяє зменшити індуктивність намагнічення L_μ в імпульсному трансформаторі, зменшивши тим самим період T_2 і час наростання до максимуму імпульсів напруги на реакторі.

Встановлено, що у генераторах високовольтних імпульсів при роботі високовольтного імпульсного трансформатора на ємностно-омічне навантаження у вигляді реактора з коронним розрядом або реактора з коронним розрядом з використанням загострення фронту імпульсів на осцилограмах на навантаженні мають місце характерні скачки, що представлені на рис. 15, які пояснюються наявністю коливальних контурів з різними періодами коливань. Характерною особливістю осцилограм при використанні загострення є подовжене за часом "плато" на вершині (максимумі) імпульсу напруги (в даному випадку негативній полярності, яка в загальному випадку може бути і позитивною).



а

б

Рисунок 15 – Імпульси напруги на ємнісно-омічному навантаженні імпульсного трансформатора: а – без загострення фронту імпульсів; б – з загостренням фронту імпульсів: 1 В/кліт., 5 мкс/кліт., $k_d=5260$

Експериментально встановлено, що форма результуючого імпульсу напруги на реакторі залежить від співвідношення періодів коливальних контурів, вказаних вище, як в режимі роботи транзисторного комутатора на розмикання, так і в режимі його роботи на замикання. При певному співвідношенні періодів замість стрибків на фронті і спаді імпульсів на реакторі можуть мати місце накладені коливання або інші відхилення від гладкої монотонної кривої.

З порівняння роботи імпульсного трансформатора в режимах використання напівпровідникового ключа, що замикає і розмикає, отримані наступні результати. Час наростання напруги до максимуму на вторинній обмотці імпульсного трансформатора менше при роботі *IGBT* ключа, що замикає. Час наростання струму до максимуму на вторинній обмотці імпульсного трансформатора менше при роботі *IGBT* ключа, що розмикає. Частота дотримання імпульсів на виході генератора більше при роботі *IGBT* ключа, що замикає.

Дослідний зразок установки на основі імпульсного трансформатора з напівпровідниковим комутатором для здійснення в заводських умовах електротехнології отримання синтез-газу з використанням коронного і бар'єрного розрядів використовує описаний принцип отримання високовольтних імпульсів. Осцилограма імпульсів напруги на реакторі з коронними розрядами (період повторення імпульсів – приблизно 400 мкс) і на реакторі з бар'єром (період повторення імпульсів – приблизно 60 мкс) представлені на рис. 16. Відмінною рисою установки є наявність двох генераторів імпульсів, що працюють кожен на своє навантаження – ре-

актор з імпульсним коронним або бар'єрним розрядом.

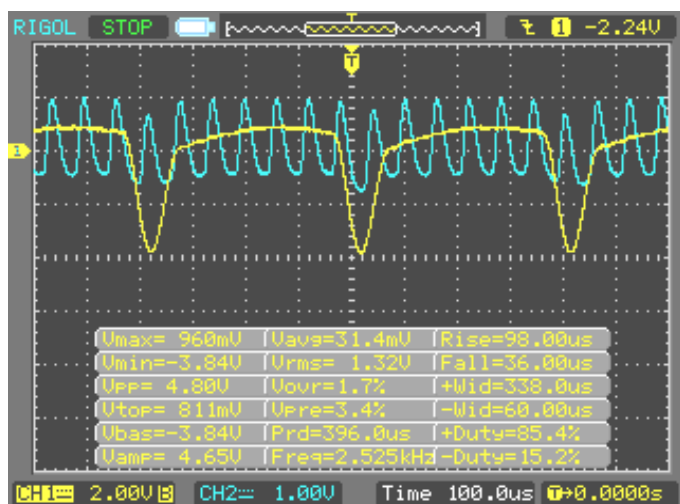


Рисунок 16 – Осцилограма імпульсів напруги на навантаженні

по колах живлення, екранування систем керування, раціональний монтаж силових контурів, у тому числі монтаж імпульсного трансформатора, і кіл керування швидкодіючих транзисторів дозволяють створювати надійно працюючі генератори ІКР.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичне завдання удосконалення високовольтних імпульсних трансформаторів з використанням напівпровідникових комутаторів для електрофізичних установок, що дозволило модернізувати існуючі і створити нові електротехнологічні установки для створення сильних імпульсних електричних та магнітних полів.

1. Безпосереднє застосування існуючих принципів і схем джерел високої напруги і напівпровідникових комутаторів і їх режимів роботи для живлення нових високовольтних електрофізичних установок можливо тільки після удосконалення таких пристроїв з урахуванням вимог до конкретної електротехнології.

2. У колах з імпульсними трансформаторами в зв'язці з напівпровідниковими комутаторами, розташованими з боку низьковольтної обмотки імпульсного трансформатора, здійснено вибір напрямів і методів дослідження процесів, що протікають в цих колах виходячи з особливостей високовольтних імпульсних трансформаторів для електротехнологічних установок. Обґрунтовані методи експериментальних досліджень і комп'ютерного моделювання процесів в імпульсних трансформаторах.

3. Удосконалено високовольтні імпульсні трансформатори: частини як вторинної, так і первинної обмотки рознесено і розташовано не на одному загальному стрижні, а на чотирьох хрестоподібно розташованих частинах розщепленого стрижня магнітопроводу. Встановлено, що для розроблених, створених і випробуваних удосконалених високовольтних імпульсних трансформаторів (на 100 кВ і 1000 кВ) для імпульсного мегавольтного генератора вдалося зменшити результу-

Для генератора імпульсів напруги для коронного розряду імпульсний трансформатор має коефіцієнтом трансформації $k_{TK} = 130$, а для бар'єрного розряду $k_{Tb} = 50$. Виміри імпульсної напруги на реакторах проводилися за допомогою розроблених і виготовлених ємнісних дільників напруги. Апробація проведена на ПАТ "Ясиновський коксохімічний завод" (м. Макіївка, Україна).

Як показали експериментальні дослідження застосування перешкодоподавляючих мережевих фільтрів

ючу індуктивність розсіювання цих трансформаторів. При цьому індуктивність в розрядному контурі установки з паралельно з'єднаними чотирма обмотками кожного з двох імпульсних трансформаторів зменшилася в три рази. Запропонована схема з використання двох удосконалених імпульсних трансформаторів, з коефіцієнтом трансформації 10,3 у кожного, дозволила створити компактне трансформаторне імпульсне джерело напруги з часом ≈ 250 нс наростання імпульсів на навантаженні (ємності 1 нФ) і напругою до 1 МВ.

4. Створено надійно працюючий компактний генератор на робочу напругу 30 кВ на основі імпульсного трансформатора, характерною рисою якої є те, що силовий генератор початкових імпульсів, високовольтний імпульсний трансформатор, електронна схема управління і високовольтне навантаження – реактор з імпульсним коронним розрядом – розташовані в одному корпусі в безпосередній близькості один від одного. У компактному генераторі на основі високовольтного імпульсного трансформатора досягнута частота дотримання імпульсів до 50000 імп./с.

Досліджено, що при роботі *IGBT* ключа, що розмикає, амплітуда напруги на реакторі U_p може істотно перевищувати подвоєну зарядну напругу первинної накопичувальної ємності, помножену на коефіцієнт трансформації ($U_p \gg 2k_T U_0$), а саме: $U_p = i_{k,\max}(L_\mu/C_p)^{1/2}$, де $i_{k,\max}$ – амплітуда колекторного струму; L_μ – індуктивність намагнічення трансформатора; C_p – ємність навантаження, а при роботі *IGBT* ключа, що замикає, U_p не може перевищувати величини $U_p = 2k_T U_0$, де U_0 – амплітуда зарядної напруги первинної накопичувальної ємності; k_T – коефіцієнт трансформації.

Експериментально досліджено роботу високовольтного імпульсного трансформатора в компактному генераторі високовольтних імпульсів з *IGBT* комутатором та встановлено, що час наростання напруги на реакторі до максимуму менше при роботі *IGBT* комутатора, що замикає, а час наростання струму на реакторі до максимуму менше при роботі *IGBT* ключа, що розмикає.

Встановлено, що використання напівпровідникових ключів, що розмикають з малим часом комутації (десятки–сотні нс) дозволило отримати в навантаженні імпульсного трансформатора генератора – реакторі ІКР імпульси напруги з високою швидкістю наростання та підвищити напруженість електричного поля з 1 кВ/мм до 2 кВ/мм.

5. Результати дисертації використані при виконанні: держбюджетних і госпдоговірних робіт в 1998–2014 рр.; міжнародного проекту НТЦУ № 1120 в НДПКІ "Молнія" НТУ "ХПИ"; при створенні генераторів високовольтних імпульсів на основі імпульсних трансформаторів, впроваджені при розробці і апробації дослідного зразка установки для перевірки можливості використання імпульсного коронного розряду для конверсії сирого коксового газу в газ, що містить в основному синтез-газ ($H_2 + CO$), на ПАТ "Ясиновський коксохімічний завод", а також в навчальному процесі НТУ "ХПИ" при підготовці бакалаврів і магістрів за напрямом «Електротехніка та електротехнології».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Иванов В.М. Высоковольтный генератор импульсов со средней мощностью до 50 кВт для обработки пищевых продуктов / Н.И. Бойко, А.Н. Тур, Л.С. Евдошенко, А.И. Зароченцев, В.М. Иванов // Приборы и техника эксперимента. – 1998. – №2. – С. 120–126. *Здобувач взяв участь у розробці методики випробувань, їх проведенні та аналізі результатів і формулюванні висновків.*

2. Иванов В.М. Импульсный коронный разряд с расширенной зоной ионизации: физические основы получения и перспективные области применения / Н.И. Бойко, А.В. Борцов, Л.С. Евдошенко, А.И. Зароченцев, В.М. Иванов // Электротехника і електромеханіка. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2004. – №3. – С.98–104. – *Здобувач взяв участь у розробці та виготовленні імпульсних трансформаторів і низьковольтних напівпровідникових генераторів, проведенні експериментів, аналізі результатів і формулюванні висновків.*

3. Иванов В.М. Высоковольтные установки и технологии на основе комплекса высоковольтных импульсных воздействий / Н.И. Бойко, Л.С. Евдошенко, А.И. Зароченцев, В.М. Иванов // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2004. – № 35. – С. 54–63. *Здобувач взяв участь у розробці низьковольтних напівпровідникових генераторів, конструкції робочих камер, розробці методики проведення випробувань і дослідженні їх характеристик.*

4. Иванов В.М. Низкоиндуктивная секция генератора мощных высоковольтных импульсов по схеме Фитча / Н.И. Бойко, А.В. Борцов, Л.С. Евдошенко [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2005. – №4. – С. 57–65. *Здобувач експериментально на базі досліджень двухмодульної секції генератора обґрунтував можливість отримання в навантаженні струму близько 2 МА, розробив схему запуску тригатронів за допомогою імпульсного трансформатору та індуктивності.*

5. Иванов В.М. Высоковольтные импульсные трансформаторы в технологических установках / Бойко Н.И., Борцов А.В., Евдошенко Л.С., Зароченцев А.И., Иванов В.М. // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2006 – №36. – С. 8–13. *Здобувач розробив і виготовив високовольтні імпульсні трансформатори і взяв участь у проведенні випробувань, аналізі результатів та формулюванні висновків.*

6. Иванов В.М. Использование импульсного коронного разряда с расширенной зоной ионизации для конверсии токсичных газообразных отходов / Н.И.Бойко, А.В. Борцов, Л.С. Евдошенко, А.И. Зароченцев, В.М. Иванов // Электротехника і електромеханіка. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2007,– №4.– С. 64–65. *Здобувач розробив імпульсний трансформатор і низьковольтний генератор на напівпровідникових комутаторах, взяв участь у проведенні випробувань, аналізі результатів і формулюванні висновків.*

7. Иванов В.М. Компактный многомодульный генератор импульсов тока на 2 МА / Н.И. Бойко, Л.С. Евдошенко, А.И. Зароченцев, В.М. Иванов // Электротехника і електромеханіка. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. – № 5. – С. 60–64. – *Здобувач брав участь у випробуваннях генератора, розробці та реалізації методики настройки повітряних тригатронів для їх синхронного запуску за допомогою імпульсного трансформатору, аналізі результатів і формулюванні висновків.*

8. Иванов В.М. Высоковольтные импульсные трансформаторы с низкой

индуктивностью рассеяния / В.М. Иванов // *Электротехника і електромеханіка*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2010. – № 5. – С. 17–20.

9. Иванов В.М. Установка с использованием импульсного коронного разряда для увеличения эффективности работы двигателей и улучшения очистки дизельных выхлопов / Н.И. Бойко, А.В. Борцов, Л.С. Евдошенко, В.М. Иванов // *Технічна електродинаміка*. – 2010. – Тем. вип. Ч. 3. – С. 143–148. *Здобувач брав участь у дослідженні характеристик високовольтних імпульсних трансформаторів і генераторів на напівпровідникових комутаторах для генерації імпульсного коронного розряду при високих частотах проходження імпульсів і розробці методики проведення випробувань, аналізі результатів і формулюванні висновків.*

10. Иванов В.М. Генераторы высоковольтных импульсов с частотой следования до 50000 импульсов в секунду / Н.И. Бойко, А.В. Борцов, Л.С. Евдошенко, В.М. Иванов. // *Приборы и техника эксперимента*. – 2011. – №4. – С. 92–101. *Здобувач брав участь у дослідженні характеристик високовольтних імпульсних трансформаторів і генераторів на напівпровідникових комутаторах для генерації імпульсного коронного розряду при високих частотах проходження імпульсів і розробці методики проведення випробувань, аналізі результатів і формулюванні висновків.*

11. Иванов В.М. Использование электрических разрядов в плазмокаталитических технологиях / Н.И. Бойко, Л.С. Евдошенко, В.М. Иванов, С.Ф. Коняга // *Вісник НТУ «ХПІ»*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2011. – № 49. – С. 35–39. *Здобувач створив високовольтні імпульсні трансформатори і низьковольтні генератори на напівпровідникових комутаторах, взяв участь у проведенні експериментів, аналізі результатів і формулюванні висновків.*

12. Иванов В.М. Коммутация энергии тиристорами и транзисторами из низковольтной цепи в высоковольтную в трансформаторных генераторах высоковольтных импульсов / Н.И. Бойко, Л.С. Евдошенко, В.М. Иванов // *Вісник НТУ «ХПІ»*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2011. – №57 – С.25–27. *Здобувач розробив високовольтні імпульсні трансформатори та низьковольтні генератори на напівпровідникових комутаторах, взяв участь у проведенні експериментів, аналізі результатів і формулюванні висновків.*

13. Иванов В.М. Высоковольтный комплекс с двумя высокочастотными генераторами импульсов, регулирующими режимы коронного и барьерного разрядов при обработке газообразных углеводородов / Н.И. Бойко, Л.С. Евдошенко, В.М. Иванов, С.Ф. Коняга, А.И. Зароченцев // *Технічна електродинаміка*. – 2012. – № 2. – С. 105–106. *Здобувач розробив імпульсний трансформатор на сталевому і феритовому стрижени, взяв участь у створенні генераторів на напівпровідникових комутаторах, проведенні експериментів та аналізі результатів.*

14. Иванов В. М. Трансформатор с индуктивным накоплением энергии / В. М. Иванов // *Вісник НТУ «ХПІ»*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 21. – С. 55–60.

15. Иванов В.М. Компактный ёмкостный делитель напряжения на 70 кВ с экранированным промежуточным электродом / Н.И. Бойко, Л.С. Евдошенко, В.М. Иванов, О.А. Христенко // *Электротехника і електромеханіка*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – № 6. – С.41–46. *Здобувач взяв участь у розробці, виготовленні*

конструкції дільника напруги, дослідженні перехідних характеристик, аналізі отриманих результатів.

16. Иванов В.М. Особенности работы высоковольтных импульсных трансформаторов на емкостно-омическую нагрузку / Н.И. Бойко, Л.С. Евдошенко, В.М. Иванов // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – № 27 (1000). – С.32–38. *Здобувач взяв участь у створенні високовольтних імпульсних трансформаторів і низьковольтних генераторів на напівпровідникових комутаторах, проведенні експериментів та аналізі отриманих результатів.*

17. Иванов В.М. Компактный генератор высоковольтных импульсов с замыкающим транзисторным коммутатором и высокой частотой следования импульсов. / Н.И. Бойко, Л.С. Евдошенко, В.М. Иванов// Приборы и техника эксперимента. – 2014. – №4. – С.73–82. *Здобувач взяв участь у створенні високовольтних імпульсних трансформаторів і низьковольтних генераторів на напівпровідникових комутаторах, проведенні експериментів та аналізі отриманих результатів.*

18. Иванов В.М. Электротехнология получения синтез-газа с использованием объёмных высоковольтных импульсных разрядов: коронного и барьерного / Н.И. Бойко, Л.С. Евдошенко, В.М. Иванов, С.Ф. Коняга // Электротехника і електромеханіка. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – №4. – С.45–50. *Здобувач взяв участь у вдосконаленні високовольтних імпульсних трансформаторів і високовольтних генераторів на напівпровідникових комутаторах, проведенні експериментів та аналізі отриманих результатів.*

19. Иванов В.М. Высоковольтная технология для обработки и очистки жидкости и газа / В. М. Иванов // Вісник Житомирського національного агроєкологічного університету. – 2014. – №2(45), Т.4, Ч.2. – С.373–383.

20. Ultrawideband and Ultrashot Impulse Signals : Materials of 4-th International Conference, (Sept. 15–19, 2008, Sevastopol, Ukraine) / Proc. IEEE Electronics Power Science and General. – 2008. – P. 97–99. *Здобувач розробив хрестоподібні імпульсні трансформатори, провів їх випробування, взяв участь у проведенні експериментів та аналізі результатів.*

21. Иванов В.М. Высоковольтные импульсные трансформаторы для электрофизических установок // Тези доповідей XX Міжнародної науково-практичної конференції "Інформаційні технології: наука, техніка, освіта, здоров'я" – Харків, НТУ «ХПІ». – 2012. – Ч.IV. – С.69.

АНОТАЦІЇ

Іванов В. М. Удосконалення високовольтних імпульсних трансформаторів з напівпровідниковими комутаторами для електротехнологічних установок. – На правах рукопису

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.09.13 "Техніка сильних електричних та магнітних полів". – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2015.

У роботі вирішена науково-практичне задача удосконалення високовольтних імпульсних трансформаторів з використанням напівпровідникових комутаторів для електрофізичних установок, що дозволило модернізувати існуючі та ство-

рити нові електротехнологічні установки, які створюють сильні імпульсні електричні та магнітні поля. Встановлено, що удосконалення високовольтних імпульсних трансформаторів яке складається в тому, що частини як вторинної так і первинної обмотки рознесені і розташовані не на одному загальному стрижні, а на чотирьох хрестоподібно розташованих частинах розщепленого стрижня магнітопроводу, дозволило зменшити результуючу індуктивність розсіювання цих трансформаторів. Використання їх у двоступеневій схемі генератора імпульсів напруги дозволило створити компактне імпульсне джерело напруги з часом наростання імпульсів 250 нс на ємнісному навантаженні ~ 1 нФ і напругою до 1 МВ. Досліджено безаварійні раціональні режими роботи в імпульсних трансформаторах з напівпровідниковими комутаторами в генераторах для отримання ІКР з великою частотою проходження імпульсів. Вперше в заводських умовах успішно апробована установка на основі імпульсних трансформаторів з напівпровідниковими ключами в контурі генератора імпульсів напруги для парового риформінгу метану в складі коксівного газу в синтез-газ за допомогою високовольтних імпульсних об'ємних розрядів: коронного і бар'єрного із нікелевим каталізатором у реакторі.

Ключові слова: сильне електричне поле, високовольтний імпульсний трансформатор, напівпровідниковий комутатор, електротехнології, імпульс високої напруги, імпульсний коронний розряд.

Иванов В.М. Усовершенствование высоковольтных импульсных трансформаторов с полупроводниковыми коммутаторами для электротехнологических установок. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.13 «Техника сильных электрических и магнитных полей». – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2015.

В диссертационной работе решена научно-техническая задача усовершенствования высоковольтных импульсных трансформаторов с использованием полупроводниковых коммутаторов для электрофизических установок, что позволило модернизировать существующие и создать новые электротехнологические установки, создающие сильные импульсные электрические и магнитные поля. Разработанная двухступенчатая схема мегавольтного генератора импульсов напряжения с использованием двух импульсных трансформаторов позволила создать компактный трансформаторный импульсный источник напряжения с временем нарастания импульсов ≈ 250 нс на емкостной нагрузке ≈ 1 нФ и напряжением до 1 МВ. Установлено, что для созданных высоковольтных импульсных трансформаторов на напряжение 100 кВ и 1 МВ для импульсного мегавольтного генератора путем усовершенствования высоковольтных импульсных трансформаторов состоящего в том, что части как вторичной так и первичной обмотки разнесены и расположены не на одном общем стержне, а на четырех крестообразно расположенных частях расщепленного стержня магнітопровода, удалось уменьшить результирующую индуктивность рассеивания этих трансформаторов. Исследованы безаварийные рациональные режимы работы в импульсных трансформаторах с

полупроводниковыми коммутаторами в генераторах для получения ИКР. Установлено, что при работе полупроводникового ключа в качестве размыкающего коммутатора амплитуда напряжения на реакторе U_p может существенно превышать удвоенное зарядное напряжение первичной накопительной ёмкости, умноженное на коэффициент трансформации ($U_p \gg 2n_T U_0$), а при работе ключа в качестве замыкающего коммутатора U_p не может превышать величины $U_p = 2 n_T U_0$, где U_0 – амплитуда зарядного напряжения первичной накопительной ёмкости, n_T – коэффициент трансформации. Экспериментальные исследования работы высоковольтного импульсного трансформатора в компактном генераторе высоковольтных импульсов с полупроводниковым ключом показало, что время нарастания напряжения на реакторе до максимума меньше при работе ключа в качестве замыкающего коммутатора, а время нарастания тока на реакторе до максимума меньше при работе ключа в качестве размыкающего коммутатора. Впервые создана и в заводских условиях успешно опробована установка на основе двух импульсных трансформаторов с полупроводниковыми ключами в низковольтной цепи генератора импульсов высокого напряжения для парового риформинга метана в составе коксового газа в синтез-газ при помощи высоковольтных импульсных объёмных разрядов: коронного и барьерного с засыпкой никелевым катализатором.

Ключевые слова: сильное электрическое поле, высоковольтный импульсный трансформатор, полупроводниковый коммутатор, электротехнология, импульс высокого напряжения, импульсный коронный разряд.

Ivanov V. M. Improvement of High Voltage Pulse Transformers with Semiconductor Switches for Electrotechnological Plants. – Manuscript.

Dissertation for competition a technical science candidate degree. Speciality 05.09.13. "High electric and magnetic field engineering". National Technical University "Kharkov Polytechnical Institute", Kharkov, 2015.

In this work the scientific and practical problem of improvement of high-voltage pulsed transformers with using semiconductor switches for electrophysical plants has been solved which enabled to modernize existing and to create new electrotechnological plants that generate strong pulsed electric and magnetic fields. It was found that improvement of high-voltage transformers, which consist in that the parts of the secondary and primary windings are separated and placed not at one common core but at four crosswise situated parts of split core of magnetic circuit, enabled to reduce a resulting leakage inductance of the transformers. Using them in two-stage circuit of voltage pulse generator enabled to create a compact pulsed voltage source with pulse rise time 250 ns at a capacitive load about 1 nF and voltage of 1 MV. Accident-free rational operation modes of pulsed transformers with semiconductor switches in generators for creating PCD with high pulse repetition frequency have been investigated. For the first time in the factory conditions a plant on the basis of pulsed transformers with semiconductor switches in the circuit of the generator of voltage pulses for steam reforming of methane as part of coke-oven gas into synthesis gas with help of high-voltage pulsed volumetric discharges: corona and barrier discharge with nickel catalyst in the reactor, has been successfully test-operated.



Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 0.9. Тир. 100 прим. Зам. 452-15.
Підписано до друку 01.10.15. Папір офсетний.

Надруковано з макету замовника у ФОП Бровін О.В.
61022, м. Харків, вул. Трінклера, 2, корп.1, к.19. Т. (057) 758-01-08, (066) 822-71-30
Свідоцтво про внесення суб'єкта до Державного реєстру
видавців та виготовників видавничої продукції серія ДК 3587 від 23.09.09 р.

СТИЛЬ ®
ИЗДАТ 
ТИПОГРАФИЯ
www.stil-izdat.com