

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Національний технічний університет  
„Харківський політехнічний інститут”

ЄВДОШЕНКО ЛЕОНІД СВИРИДОВИЧ



УДК 621.387

УДОСКОНАЛЕННЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ІСКРОВИХ РОЗРЯДНИКІВ  
ЗІ ЗМІННОЮ ЕЛЕКТРИЧНОЮ МІЦНІСТЮ  
ДЛЯ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНИХ УСТАНОВОК

Спеціальність 05.09.13 – Техніка сильних електричних та магнітних полів

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2013

Дисертацією є рукопис

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

Науковий керівник: доктор технічних наук, с.н.с., доцент

**Бойко Микола Іванович,**

Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»,  
головний науковий співробітник

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент

**Дубовенко Костянтин Вікторович,**

Миколаївський національний аграрний університет,  
завідувач кафедри електротехнологій і енергопостачання

кандидат технічних наук

**Таран Григорій Віталійович,**

Національний науковий центр  
«Харківський фізико-технічний інститут»  
Національної академії наук України,  
старший науковий співробітник

Захист відбудеться «18» квітня 2013 р. о 15-00 годині  
на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 у Національному  
технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» (61002,  
м. Харків, вул. Фрунзе,21).

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Національного  
технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Автореферат розісланий «25» лютого 2013 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



О.Ю. Юр'єва

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Сильні імпульсні електромагнітні поля знаходять усе більше застосування в електротехнологіях. Розширення спектру електротехнологій висуває нові вимоги до параметрів технологічних імпульсів: за швидкістю наростання імпульсів напруги, за амплітудою імпульсів струму, за частотою проходження імпульсів. Елементами технологічної установки, що значною мірою визначають амплітудні і часові параметри технологічних імпульсів і ресурс установки, часто являються комутатори. Їх характеристики істотно відрізняються від характеристик комутаторів (тиратронів, розрядників з лазерним керуванням, вакуумних розрядників), що використовуються в генераторах імпульсних струмів і напруг для наукових досліджень. Публікації останніх років свідчать про успішне використання напівпровідникових комутаторів (SOS - діодів). Проте вартість таких напівпровідникових комутаторів достатньо висока в порівнянні з іскровими розрядниками. Очевидно, альтернативи іскровим розрядникам по граничних параметрах, простоті, вартості і зручності експлуатації, що важливо для технологічних застосувань, нині немає.

Удосконалення існуючих і створення перспективних іскрових розрядників дозволить створити технологічні електроустановки, які разом з отриманням короткофронтних імпульсів високої напруги і імпульсів струму з великими амплітудами мали б високий ресурс, а у ряді випадків і високою частотою 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 у рамках наукових досліджень, які проведено в Науково-дослідному та проектно-конструкторському інституті "Молнія" НТУ "ХПІ". Здобувач як виконавець брав участь у проведенні держбюджетних науково-дослідних робіт МОНмолодьспорту України: "Дослідження процесів при обробці продуктів і систем за допомогою комплексу високовольтних імпульсних дій (КВІД)" (№ 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 енергозбережлого очищення речовин за допомогою імпульсного коронного розряду з розширеною зоною іонізації" (№ ДР 0108U010894); "Розробка нових енергозбережних методів поліпшення роботи двигунів внутрішнього згорання на основі імпульсного коронного розряду" (№ ДР 0110U007359). Дослідження виконувалися також у рамках міжнародного проекту № 1120 в науково-технологічному центрі в Україні "Розробка високоефективної технології обробки рідких харчових продуктів, у тому числі молока, соків, вина, а також води, біопрепаратів і інших рідин з метою збільшення термінів їх зберігання на базі комплексу високовольтних імпульсних дій (КВІД)" (на кошти Євросоюзу).

**Мета і задачі досліджень.** Метою роботи є удосконалення іскрових розрядників на основі аналізу електророзрядних процесів для поліпшення технологічних і експлуатаційних характеристик електротехнологічних установок, у тому числі

підвищення частоти спрацьовування, збільшення амплітуди комутованих струмів і ресурсу, зменшення часу спрацьовування і його розкиду для розрядників.

Для досягнення мети поставлені завдання:

1. Аналіз існуючих конструкцій іскрових розрядників і режимів роботи стосовно можливості використання їх в електротехнологічних установках.

2. Розробка резистивної моделі відновлення електричної міцності розрядного проміжку іскрових розрядників для режиму високої частоти проходження імпульсів. Визначення в явному виді числа паралельних каналів для режиму багатоканальної комутації іскрових розрядників по відомих параметрах розрядного проміжку, діючої напруги і розрядного контуру.

3. Експериментальне визначення верхньої межі застосовності по частоті проходження імпульсів малогабаритного високоресурсного багатопроміжкового розрядника в генераторах імпульсного коронного розряду.

4. Експериментальне дослідження процесу комутації сильнотривого тригатрону на напругу 400 кВ з наносекундним часом включення і схеми керування декількома десятками таких тригатронів для їх паралельного включення в складі генератора імпульсів струму технологічного застосування.

5. Експериментальне дослідження процесу комутації тригатрону на напругу в декілька десятків кіловольт і схеми керування декількома десятками тригатронів для їх паралельної роботи в компактному багатомодульному генераторі імпульсів струму в умовах, коли жоден з основних електродів тригатрону не має гальванічного зв'язку із заземленням.

6. Теоретичне і експериментальне дослідження багатоканального режиму комутації розрядника в колі, що містить індуктивність з феромагнітним осердям.

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

*Предметом дослідження є амплітудні і часові характеристики імпульсів напруги і струмів при комутації іскрових розрядників.*

**Методи дослідження.** При теоретичному дослідженні відновлення електричної міцності і режиму багатоканальної комутації розрядників використані положення теорії електромагнітного поля і основ фізики плазми, методи статистичної обробки результатів. Експериментальні дослідження проводилися на повномасштабних зразках технологічних електроустановок з використанням експериментальних високовольтних стендів і традиційних методів вимірів, методів планування експерименту і статистичної обробки результатів.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

1. Отримала подальший розвиток теорія відновлення електричної міцності розрядного проміжку іскрових розрядників на базі розробленої резистивної моделі, що дало можливість розрахувати активний опір розрядного проміжку після закінчення імпульсу струму і цим завершити резистивну модель роботи іскрового розрядного проміжку.

2. Удосконалено математичну модель режиму багатоканальної комутації, яка дозволяє розрахувати кількість розрядних каналів в іскровому розряднику в явному виді по параметрах розрядного кола і розрядного проміжку.

3. Вперше експериментально показано, що некеровані повітряні атмосферного

тиску багатопроміжкові іскрові розрядники можуть стійко працювати у якості загострювачів фронту імпульсів при частотах проходження імпульсів понад 25000 імпл/с, що досягається вибором раціональної величини робочих проміжків розрядника  $0,25 \div 0,3$  мм.

4. Вперше при паралельній роботі декількох десятків 400 кВ-х тригатронів з розташуванням електроду, що керує, у високовольтному основному електроді позитивної полярності досягнуто стабільний розкид часу спрацьовування близько 1 нс, що забезпечується експериментально визначеною раціональною величиною основного розрядного проміжку  $11 \div 12$  мм і розробленою схемою керування тригатронами.

**Практичне значення отриманих результатів** для техніки сильних електричних і магнітних полів полягає у розробці і створенні:

- повітряного атмосферного тиску високоресурсного ( $10^{10}$  розрядів) 8-проміжкового малогабаритного ( $170 \times 100 \times 50$  мм) на струми до 60 А розрядника зі збільшеною на 30 % частотою проходження імпульсів – до 27000 імпл/с;
- потужного, призначеного для паралельної роботи, 4-канального (до 70 кА на канал) тригатрону на напругу 400 кВ з наносекундним часом включення, збільшеним ресурсом (до  $10^9$  розрядів) внутрішньої ізоляційної поверхні розрядної камери за рахунок обладнання її захисним металевим екраном, з посиленою зовнішньою ізоляцією за рахунок шаруватого плівкового діелектрика і зручного в експлуатації;
- схеми керування 48-ми тригатронами на 400 кВ для їх паралельного включення у складі 12-модульного генератора імпульсних струмів, що дало можливість одержати на навантаженні струм близько 2 МА;
- компактного 32-х модульного генератора імпульсних струмів, схеми керування тригатронами модулів для їх синхронного включення, що дозволило отримати сумарний струм в навантаженні 2 МА при енергії, що запасалася, усіх модулів лише 6 кДж;
- компактного низькоіндуктивного (близько 20 нГн) вузла "ємнісний накопичувач– розрядник", включеного в коло первинної обмотки трансформатора Тесла з феромагнітним осердям, що забезпечило амплітуду струму в колі розрядника 67,6 кА із швидкістю наростання близько  $5 \cdot 10^{10}$  А/с при зарядній напрузі 9,6 кВ і малих габаритах застосованого вузла –  $470 \times 226 \times 226$  мм.

Результати досліджень впроваджені ТОВ НВФ «Адрон» (м. Київ), підприємством «Протон–21» (м. Київ), НДПКІ "Молнія" НТУ "ХПІ", в навчальному процесі НТУ "ХПІ".

**Особистий внесок здобувача** в результати, що отримані та викладені в дисертації, полягає у наступному:

- у теоретичному дослідженні процесу відновлення електричної міцності розрядного проміжку іскрового розрядника на базі створеної резистивної моделі;
- в експериментальному і теоретичному дослідженні процесу багатоканальної комутації іскрових розрядників на базі одержаного співвідношення для розрахунку числа паралельних каналів;
- в експериментальному обґрунтуванні того, що некеровані повітряні атмосферно-

го тиску багатопроміжкові іскрові розрядники можуть стійко працювати при частотах проходження імпульсів понад 25000 імп/с;

- в експериментальному обґрунтуванні того, що при паралельній роботі декількох десятків 400 кВ-х тригатронів з розташуванням електроду, що керує, у високовольтному основному електроді позитивної полярності досягнуто стабільний розкид часу спрацьовування складає близько 1 нс при експериментально визначеній раціональній відстані між основними електродами тригатрону 11–12 мм;

- у розробленому уточненому критерії паралельної роботи тригатронів субмегавольтного рівня;

- в експериментальному обґрунтуванні того, що у створеному компактному багатомодульному генераторі імпульсів струму на 2 МА отримано стабільний розкид включення, який не перевищує 25 нс, для 32-х повітряних атмосферного тиску тригатронів на напругу 25 кВ в умовах, коли жоден з електродів тригатрону не має гальванічного зв'язку із заземленням.

Усі основні результати дисертаційної роботи здобувачем отримані особисто.

**Апробація результатів дисертації.** Результати досліджень, що входять в дисертаційну роботу, доповідались на: Міжнарод. симпозиумах SIEMA (Харків, 2004, 2006, 2007, 2008, 2010, 2011 рр.), Міжнарод. науковій конференції "Высокоинтенсивные физические факторы в биологии, медицине, сельском хозяйстве и экологии" (м. Саров, Росія, 2004 р.), Міжнарод. науковій школі-семінарі "Физика импульсных разрядов в конденсированных средах" (Миколаїв, 2005, 2009 рр.), Міжнарод. конференціях "Сотрудничество для решения проблемы отходов" (Харків, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011 рр.); Міжнарод. конференції "ULTRAWIDEBAND AND ULTRASHORT IMPULSE SIGNALS" (Sevastopol, 2006, 2008, 2010), Міжнарод. конференції "Проблеми сучасної електротехніки-2006" (Київ, 2006 р.), Всеросійському семінарі "Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии" (Москва, 2008, 2010 рр.).

**Публікації.** Основний зміст дисертаційної роботи викладений в 28 публікаціях, з них 19 – статей у наукових фахових виданнях, 1 – патент України на винахід, 8 – у матеріалах конференцій.

**Структура і об'єм дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, 4 додатків і списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації становить 203 сторінки. Дисертація містить 46 рисунків по тексту, 4 таблиці по тексту, одна таблиця на 1 сторінці, 4 додатки на 22 сторінках, список літератури з 112 найменувань на 13 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** надано сутність наукової задачі, якій присвячені дисертаційні дослідження, 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** представлено аналітичний огляд конструкцій і параметрів іскрових розрядників (IP), які використовуються або можуть бути використані в

технологічних електроустановках. Проведено аналіз можливості використання в електротехнологічних установках існуючих ІР, які застосовуються в генераторах імпульсів для наукових досліджень. Показано, що існуючі ІР неповною мірою відповідають вимогам, що пред'являються до ІР для електротехнологічних установок. На підставі проведеного аналізу сформульовані завдання, що потребують вирішення.

**Другий розділ** присвячений обґрунтуванню вибору напрямку теоретичних і експериментальних досліджень та методів цих досліджень. Для режиму з високою частотою комутації розроблена резистивна модель відновлення електричної міцності (ВЕМ) розрядного проміжку (РП) після його комутації. Допущення, прийняті в моделі: опір післярозрядного проміжку визначається опором  $R(t)$  циліндра плазми, що розпадається, радіусу  $r$  і довжини  $d$  (відстань між електродами ІР). Величина  $R(t)$  розраховується по відомій формулі для об'ємного опору провідника.

З урахуванням величини максимального радіусу розрядного каналу (відповідно до резистивної моделі Брагинського), розширення каналу в процесі відновлення і виразу (рівняння балансу заряджених часток, що є відомим рішенням) для концентрації електронів в каналі розряду отримано формулу для розрахунку опору розрядного каналу, що відновлюється

$$R(t) = \frac{36,8dm_e v_{ea}}{e^2 I_m^{2/3} t_m} \cdot \frac{\rho_D \frac{D_A}{\Lambda^2} + \rho_\alpha \alpha n_e(0) \left[ 1 - \exp\left(-\rho_D \frac{D_A}{\Lambda^2} t\right) \right]}{\rho_D \frac{D_A}{\Lambda^2} n_e(0) \exp\left(-\rho_D \frac{D_A}{\Lambda^2} t\right)}, \quad (1)$$

де  $e$ ,  $m_e$  – заряд і маса електрона відповідно;  $v_{ea}$  – частота пружних зіткнень електронів з атомами (молекулами); коефіцієнти  $\rho_D$  и  $\rho_\alpha$  масштабу одиниці залежать від відношення дифузійної  $\nu_D = D_A/\Lambda^2$  і рекомбінаційної  $\nu_\alpha = \alpha n_e$  частот усунення заряджених часток,  $D_A$  – коефіцієнт амбіполярної дифузії;  $\Lambda$  – дифузійна довжина, прийнята рівною діаметру розрядного каналу;  $n_e(0)$  – значення максимальної концентрації електронів в каналі розряду після припинення струму;  $I_m$  – амплітуда імпульсного струму в каналі, А;  $t_m$  – момент досягнення  $I_m$  після початку розряду, с. Формула (1) справедлива для частот проходження імпульсів  $0 < f_{пр} \leq 100$  імп/с. Для  $f_{сл} > 100$  імп/с опір  $R_f(t)$  РП, що відновлюється, може бути розрахований по емпіричній формулі, одержаній після обробки результатів експериментів з багатопроміжковим розрядником (БПР)

$$R_f(t) = R(t) / (10^{-2} \cdot f_{пр})^{1/3}, \quad (2)$$

де  $R(t)$  – опір, розрахований за формулою (1).

Як показали проведені розрахунки, опір каналу, що відновлюється, може бути розрахований за (1, 2) без урахування відмінності концентрацій електронів на осі і біля оболонки каналу розряду для часів  $t \geq 10$  мкс, тобто для можливості отримання частоти проходження імпульсів в РП до  $10^5$  імп/с.

На основі запропонованої моделі шляхом аналізу відомих експериментальних даних показано, що зростання пробивної напруги РП відбувається швидше, ніж зростання опору РП до первинного значення.

Для відомих експериментальних значень пробивної напруги  $U_{H2}$ ,  $U_{N2}$  і актив-

ного опору проміжку  $R_{eH_2}$ ,  $R_{eN_2}$ , що відновлюється, для водню і азоту відповідно були одержані значення відносної пробивної напруги  $U^*_{H_2}$ ,  $U^*_{N_2}$  і відносного опору опору  $R^*_{H_2}$ ,  $R^*_{N_2}$  для різних моментів часу. Для тих самих моментів часу по (1) розраховані значення опору проміжків, що відновлюються, у водні і азоті  $R_{pH_2}$ ,  $R_{pN_2}$  для умов експерименту. Як видно з рис. 1, криві зростання відносної пробивної напруги і для водню, і для азоту проходять вище кривих зростання відносного опору РП. Причому як зростання відносної про-

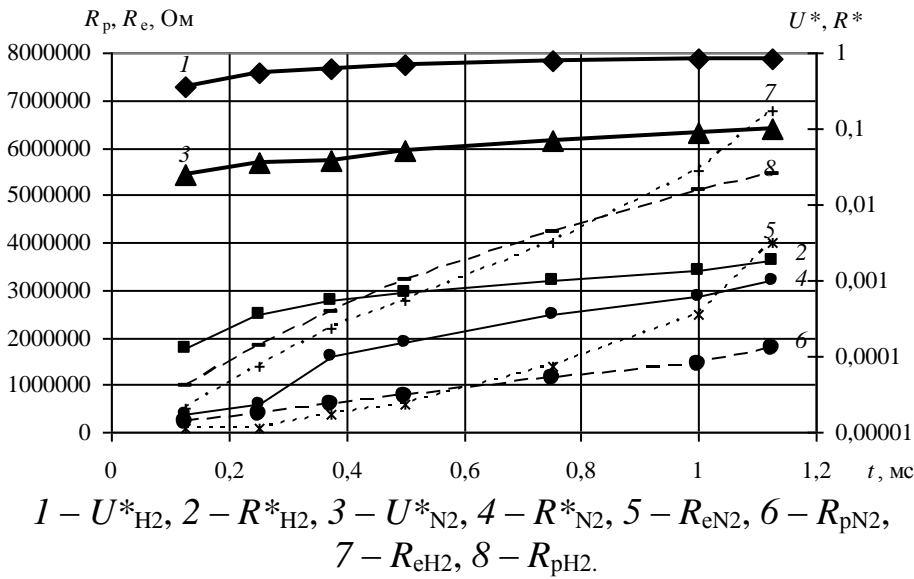


Рисунок 1 – Криві росту відносної пробивної напруги і росту абсолютного і відносного опору РП для водню і азоту за розрахунковими і експериментальними даними

бивної напруги, так і зростання опору каналу для водню відбуваються швидше, ніж для азоту, тобто в газі, де ВЕМ відбувається з більшою швидкістю ( $H_2$ ), і опір розрядного каналу збільшується швидше у порівнянні з газом, де ВЕМ відбувається з меншою швидкістю ( $N_2$ ).

Порівняння експериментальних і розрахункових значень опорів РП (криві 5 – 6 і 7 – 8) показало, що і для  $H_2$ , і для  $N_2$  спочатку розрахункові значення перевищують експериментальні, а потім стають менше них. Незважаючи на це, запропонована резистивна модель дозволяє оцінити рівень ВЕМ по заданих параметрах розряду і частоті проходження імпульсів у припущенні, що погонний опір проміжків, які відновлюються, не відрізняється для близьких за параметрами розрядів.

Для розширення можливостей резистивної моделі комутації із співвідношення (запропонованого Дж. К. Мартіном), що містить кількість паралельних каналів, в роботі отримана формула для оцінки числа паралельних каналів  $N$  в явному виді по відомих параметрах розрядного проміжку

$$N = [p(\sqrt[3]{g/2 - \sqrt{D}} + \sqrt[3]{g/2 + \sqrt{D}}) - g]^{-1}, \quad (3)$$

де  $p = \frac{88d^{1/3}Z^{-1/3}E^{-4/3}(\rho/\rho_0)^{1/2}}{lZ^{-1} + 0,8l(cf)^{-1}}$ ;  $g = -\frac{2\delta U/U'}{fLZ^{-1} + 0,8lc^{-1}}$ ;  $D = (p/3)^3 + (g/2)^2$ ;  $d$  – довжина

розрядного проміжку, см;  $Z$  – опір розрядного контур, Ом;  $E$  – напруженість електричного поля уздовж каналу розряду поблизу нього в одиницях 1 кВ/мм);  $\rho/\rho_0$  – відношення питомої ваги газу до його питомої ваги при нормальних температурі і тиску;  $L$  – індуктивність каналу розряду, нГн;  $l$  – довжина електродів, см;  $c$  – швидкість світла в діелектрику, в якому здійснюється комутація;  $U$  – середня напруга спрацьовування;  $\delta(U)$  – відносний розкид напруги пробою різних каналів,



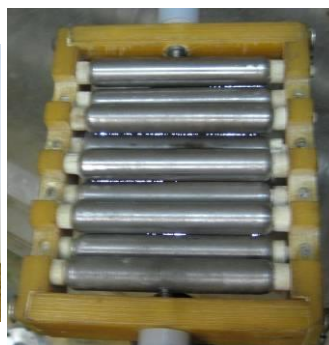
виражений в долях від  $U$ ;  $U'$  – швидкість наростання напруги на запалювальному проміжку;  $f=0,1$  у разі, коли струми каналів змінюються від 1 до 0,45 від максимального,  $f=0,15$  – струми змінюються від 1 до 0,35 від максимального.

**Третій розділ** присвячений експериментальному дослідженню характеристик ІР, що працюють в режимі з високою частотою проходження імпульсів. Розроблено ряд конструкцій потужних рейкових БПР з циліндричними електродами (Е) з розрахунковим ресурсом  $10^9$  імпульсів і більш для комутації імпульсних конденсаторів в установках для обробки харчових рідин, питної і стічних вод. БПР працюють на самопробі (що спрощує і здешевлює технологічні установки). Сталеві електроди БПР виконані з можливістю осьового обертання, а паралельністю Е забезпечується переміщення опорних точок іскрових каналів від імпульсу до імпульсу по усій довжині Е. Цими двома обставинами досягається рівномірність зносу робочої поверхні Е, а отже, збільшення ресурсу ІР. В установці (що має два однакові генератори високовольтних імпульсів, які працюють на загальну розрядну камеру) для обробки стічних вод іскровими розрядами БПР мають особливість – вони розділені на дві частини: одна частина стартового розрядника містить 7 проміжків, інша – 4; для загострюючого розрядника відповідно до 6 і 3 проміжки. Ця особливість дозволяє уникнути небажаного гальванічного зв'язку будь-якого з Е робочої камери з вторинною обмоткою імпульсного трансформатора до пробою РП усіх розрядників, що унеможлиблює розряд генераторів один на одного, а не на навантаження. В установці розв'язана проблема шумозаглушення і захисту напівпровідникових елементів при роботі ІР, завдяки електромагнітному екрануванню високовольтних генераторів і синхронному запуску тиристорів в низьковольтних генераторах установки.

Розрядна камера на відміну від робочих камер для обробки харчових рідин була розрядником з електродною системою "вістря–площина", в якій досягнуті середні напруженості поля при обробці склали близько 200 кВ/см. Отримані характеристики БПР: імпульсна комутувана потужність –  $2 \cdot 10^9$  Вт, максимальна частота проходження імпульсів – 400 імп/с, робоча – 120 імп/с, максимальна амплітуда імпульсів напруги на навантаженні – 120 кВ.



125×52×30 мм,  
 $U_{\text{сп}}=4,9 \div 5,1$  кВ  
 (РП  $\approx 0,15$  мм)



170×100×50 мм,  
 $U_{\text{сп}}=6,6 \div 6,8$  кВ  
 (РП  $\approx 0,15$  мм)

Для малопотужних (до 300 Вт) малогабаритних технологічних установок автором розроблено дві конструкції БПР для загострення фронту мікросекундних імпульсів: з пластинчатими і циліндричними Е (на рис. 2). Досліджувався вплив величини РП (від 0,05 до 0,5 мм) на роботу БПР. Амплітуда розря-

Рисунок 2 – Малогабаритні БПР

дною імпульсу струму складала 7,6 А. Досягнуті максимальні частоти комутації

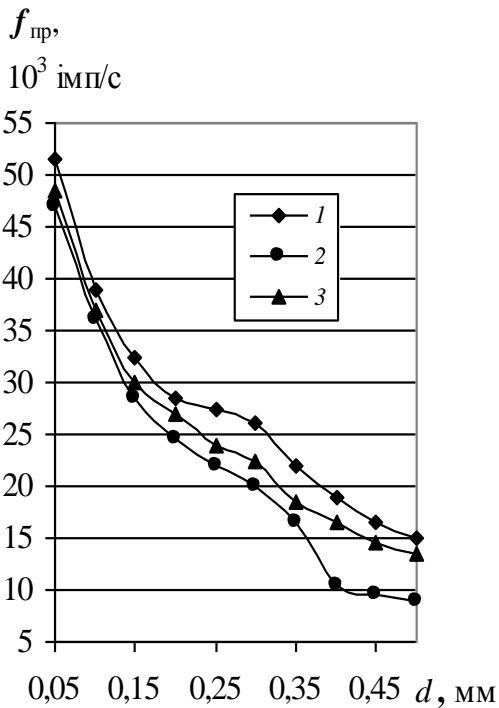
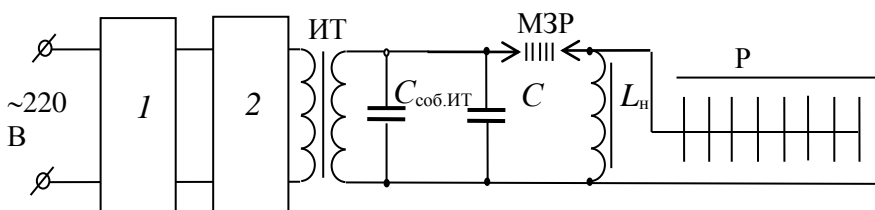


Рисунок 3 – Залежності максимальної частоти проходження імпульсів від величини проміжків в БПР

Використання обдування вентилятором БПР з циліндричними Е дозволило збільшити максимальну частоту комутації на 9 % при проміжках 0,05 мм, на 23 % – при 0,3 мм і на 36 % – при 0,5 мм. Порівняння згаданих БПР показало, що за основними характеристиками: забезпеченню багатоканальності розряду, величині напруги самопробою, зручності експлуатації, ресурсу БПР з циліндричними Е має перевагу перед БПР з пластинчатыми Е.

Малогабаритний БПР з циліндричними Е дозволив сформувати загострені імпульси при генерації імпульсного коронного розряду (ІКР) на поверхню оброблюваної води з максимальною амплітудою 20 кВ, яка залежала від величини повітряного проміжку (5÷15 мм) між Е, що коронують, і поверхнею води. Частота проходження імпульсів складала до 2000 імп/с. Фронт початкових імпульсів вдалося загострити з 6,4 мкс до 230÷250 нс. Виміряні амплітуди імпульсів напруги в електродній системі були, принаймні, в 1,3 рази більше, ніж у випадку без загострення, при однаковій амплітуді низьковольтних імпульсів. Загострення забезпечило збільшення розрядного струму в електродній системі при незмінному енергоспоживанні з мережі в 60 разів (з 0,2 А до 12 А).

Експериментальне визначення верхньої граничної частоти використання БПР



1 – зарядний пристрій; 2 – генератор низьковольтних імпульсів  
Рисунок 4 – Схема генератора мікросекундних імпульсів з наносекундним фронтом

при генеруванні ІКР проводилося для двох варіантів схеми генераторів мікросекундних імпульсів. У схемі на рис. 4 вдалося загострити фронт

при генеруванні ІКР проводилося для двох варіантів схеми генераторів мікросекундних імпульсів. У схемі на рис. 4 вдалося загострити фронт

імпульсів з 2 мкс до 10 нс. Осцилограми імпульсів напруги на реакторі з ІКР для цього генератора приведені на рис. 5. При однаковому заряді, що переноситься за

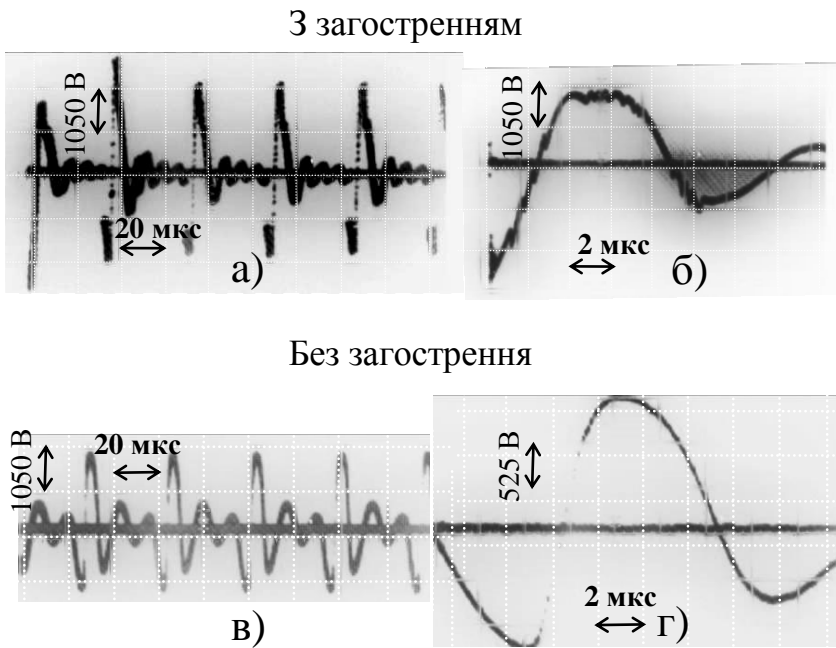


Рисунок 5 – Осцилограми мікросекундних імпульсів напруги на електродній системі з ІКР

гою резистивної моделі ВЕМ оцінка рівня ВЕМ БПР при  $f_{\text{пр}}=27000$  імп/с показала відмінність експериментальних і розрахункових значень приблизно 5 %.

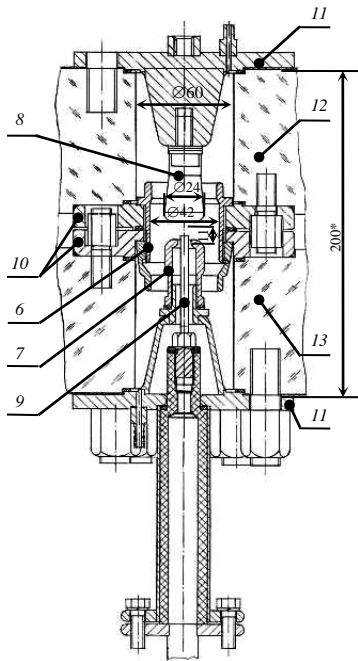
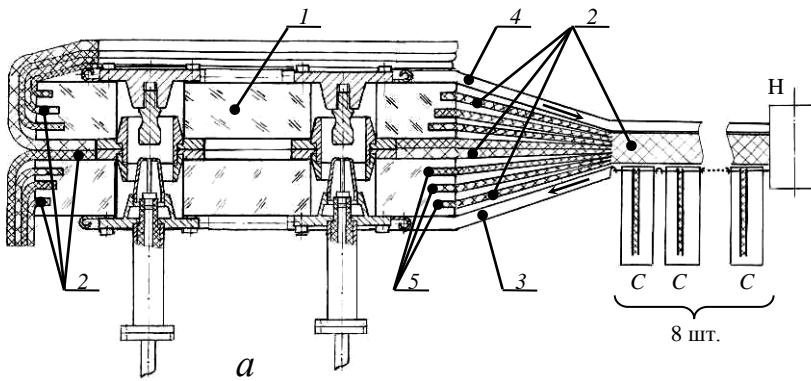
БПР з циліндричними Е був використаний у випромінюючому генераторі високовольтних широкосмугових імпульсів з частотою проходження  $10^4$  імп/с. Найбільш відповідальним елементом генератора є високовольтний комутатор, який при робочій напрузі до 20 кВ повинен забезпечувати час комутації  $t_{\text{к.БПР}} \approx 1$  нс. Завдяки збільшеним комутованій напрузі і розрядному струму потужність, що поступає у випромінювач, складала близько 200 Вт, що на 3 порядки перевищувало потужність (долі вата) у відомому випромінюючому пристрої на основі поодинокого мікропроміжку  $0,1 \div 0,4$  мм.

**Четвертий розділ** присвячений дослідженню створених ІР для потужних генераторів імпульсів струму (ГІС). 4-канальні тригатрони (Т)  $P_m$  (у кожному по 4 тригатронних вузли) призначені для комутації енергії в модулях (виконаних за схемою Фітча) генератора. Генератор містив 6 паралельно включених двохмодульних секцій і мав центрально-симетричну конструкцію, в центрі якої розташовувалося навантаження – розрядні канали у вакуумі.

Конструкція Т приведена на рис.6: а – у складі модуля генератора, де 1 – Т  $P_m$ ; 2 – головна ізоляція генератора Фітча з поліетиленової плівки; 3 – прямий токопровід; 4 – зворотний токопровід; 5 – пази в оргскляній бічній поверхні корпусу Т; С – накопичувальні конденсатори на 55 кВ ємністю 1,2 мкФ (8 шт.); Н – навантаження;  $\rightarrow$  – напрям протікання розрядного струму;  $\vdots$  – вісь симетрії генератора; б – тригатронний вузол: 6 – циліндричний складений сталевий захисний екран; 7 – основний Е (ОЕ) з електродом, що керує (КЕ); 8 – супротивний ОЕ; 9 – КЕ; 10 –

імпульс (0,05 Кл) досягнута частота 27000 імп/с на 29 % вища, ніж що досягається (19000 імп/с) у відомих експериментах по комутації 2-мм-вих проміжків. При цьому робоча напруга проміжків 0,3 мм дорівнювала  $0,5 U_{\text{пр}}$  ( $U_{\text{пр}}$  – первинна пробивна напруга), а проміжків 2 мм дорівнювала  $0,25 U_{\text{пр}}$ . Розрахунковий ресурс БПР з циліндричними Е при комутуваних струмах 60 А складає  $1,06 \cdot 10^{10}$  розрядів. Проведена за допомо-

складене градієнтне кільце; 11 – сталеві фланці ОЕ; 12, 13 – верхня і нижня половини корпусу Т відповідно. Особливостями конструкції Т є:



б

Рисунок 6 – Конструкція тригатрону

– відсутність необхідності в ізолюючій рідині, середовищі стислого газу або вакуумі, оскільки електрична міцність розвиненої пазами 5 (рис. 6а) бічної поверхні корпусу Т посилена за рахунок поліетиленової ізоляції 2, що вкладена в ці пази;

– наявність захисного трубчастого сталевго екрану, що оберігає внутрішню поверхню ізоляційного корпусу Т від забруднення її продуктами ерозії Е під впливом плазми каналу розряду, від дії потужного випромінювання і гідродинамічних процесів при розвитку сильнотривого іскрового каналу.

Після визначення параметрів поліетиленової шаруватої ізоляції робоча напруженість в ній вибрана рівною 20 кВ/мм, а напруженість електричного поля перекриття по поверхні ізоляції 2,6 кВ/мм. Градієнтне кільце 10 (гальванічно) накоротко сполучено із захисним циліндричним екраном 6. Це дозволило наблизити робочу напругу до напруги самопробою. Як робоче середовище в тригатронах використовувався елегаз ( $\text{SF}_6$ ) під тиском до 1 МПа.

Експерименти проводилися для досягнення мінімально можливих розкидів  $\Delta t_3$  часу затримки спрацьовування  $t_3$  тригатронів. Спільно з виміром імпульсів напруги в процесі комутації  $P_m$  проводилася

фіксація фактів спрацьовування окремих Т у складі  $P_m$  за допомогою світлових датчиків, розміщених на бічних поверхнях прозорих оргскляних корпусів  $P_m$ . По світлових спалахах реєструвалася паралельна робота тригатронів, час пробігу електромагнітної хвилі між якими складав 0,7 нс, що було доказом того, що  $\Delta t_3 < 1$  нс. А це можливо лише при  $t_3$ , що не занадто перевищують 1 нс. На рис. 7 представлені осцилограми процесу спрацьовування Т в близькому до оптимального для паралельної роботи режимі (КЕ у високовольтному ОЕ): 1 – сигнал, що запускає схему генератора Фітча; 2 – імпульс напруги між ОЕ тригатрону; 3 – сигнал, що відображує спочатку (протягом приблизно 9 мкс) світлові спалахи при спрацьовуванні розрядників  $P_{ст}$  каскадів генератора Фітча, а потім при спрацьовуванні Т (збільшення інтенсивності свічення відповідає збільшенню амплітуди сигналу негативної полярності); 4 – імпульс, що керує (КІ), позитивної полярності на КЕ. Мітки з цифрами (1–4) – номерами осцилограм –

проставлені в осцилографі на рівні нульових ліній відповідних осцилограм (оскільки час наростання перехідної характеристики використовуваних резистивних дільників напруги складав близько 5 нс, оскільки час комутації тригатрону  $t_k \approx 1$  нс викликає в них паразитні коливання, що спостерігаються на осцилограмах).

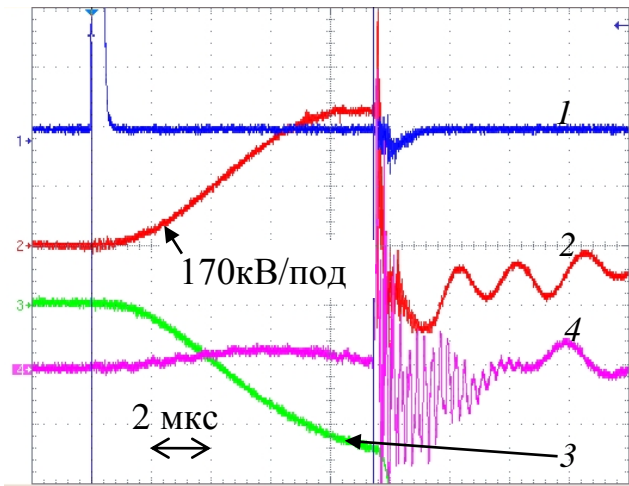


Рисунок 7 – Осцилограми, що характеризують спрацьовування тригатрону

розроблено і випробувано два варіанти схеми керування : 1 – КЕ розміщений в заземленому ОЕ; 2 – КЕ у високовольтному ОЕ позитивної полярності. Кращі результати отримані для другого варіанту схеми. В цьому випадку з приходом позитивного імпульсу, що управляє (КІ – приблизно 70 кВ, тривалість фронту  $\leq 40$  нс, швидкість наростання напруги  $(2 \div 8) \cdot 10^{12}$  В/с), його напруга арифметично складається з напругою, наявною на

КЕ і рівною близько 400 кВ. Наявність позитивного імпульсного потенціалу близько 470 кВ на кінці КЕ забезпечувала сприятливіші умови для швидкого створення каналу, що провів, між ОЕ тригатрону, ніж в схемі першого варіанту, коли негативний потенціал на кінці КЕ складав близько 70 кВ. У разі, коли КЕ розміщено у високовольтному ОЕ, вдалося досягти стабільного розкиду  $\Delta t_3 < 1$  нс (приблизно в 95 спрацьовуваннях із 100). Коли КЕ розміщено в низьковольтному ОЕ, тільки в 20 % випадків включення Т забезпечувався малий розкид  $\Delta t_3 < 1$  нс, а в інших випадках спостерігалось  $1 \text{ нс} < \Delta t_3 < 70 \text{ нс}$ . Імпульси зі світлових датчиків свідчили про те, що свічення стає помітним після приходу КІ на КЕ, але ще до пробою (комутації) Т. Це дозволяє припустити, що перед пробоем в Т має місце ІКР, що створює область первинної іонізації. Останню можна розглядати як зону іонізації ІКР, що переходить в дифузний об'ємний пробій між КЕ і супротивним ОЕ, а потім в іскровий розряд або відразу в іскровий розряд. При цьому дуже важливим стає розмір зони сильного спотворення поля (зони первинної іонізації) навпроти КЕ тригатрону. Якщо супротивний електроду, що керує, ОЕ потрапляє в цю зону, то після приходу КІ маємо  $\Delta t_3 < 1$  нс,  $t_k < 1$  нс,  $\Delta t_k \approx 0,1$  нс. Якщо не потрапляє, то  $\Delta t_3$  для паралельно включених Т при кожному спрацьовуванні, а для окремого Т від імпульсу до імпульсу може збільшитися на порядок і більш. Це пояснюється тим, що в цьому випадку буде потрібен додатковий час на проростання стримерів і збільшення електропровідності каналів розряду між КЕ і супротивним йому ОЕ. Якщо швидкість поширення стримерів при напрузі, яка близька до пробивної, дорівнює 10 мм/нс, то при відстанях 12 мм між ОЕ час формування і розвитку стримера приблизно і складає час близько 1 нс, що був отриманий у наших експериментах. При оптимальній амплітуді КІ 70 кВ, робочій напрузі між ОЕ тригатрону  $U_p = 300 \div 400$  кВ і при відстанях  $d$  між цими електродами, що перевищують  $d = 11 \div 12$  мм, час комутації  $t_k$  і його розкид  $\Delta t_k$  різко зростали. Слід зазначити,

КЕ і рівною близько 400 кВ. Наявність позитивного імпульсного потенціалу близько 470 кВ на кінці КЕ забезпечувала сприятливіші умови для швидкого створення каналу, що провів, між ОЕ тригатрону, ніж в схемі першого варіанту, коли негативний потенціал на кінці КЕ складав близько 70 кВ. У разі, коли КЕ розміщено у високовольтному ОЕ, вдалося досягти стабільного розкиду  $\Delta t_3 < 1$  нс (приблизно в 95 спрацьовуваннях із 100). Коли КЕ розміщено в низьковольтному ОЕ, тільки в 20 % випадків включення Т забезпечувався малий розкид  $\Delta t_3 < 1$  нс, а в інших випадках спостерігалось  $1 \text{ нс} < \Delta t_3 < 70 \text{ нс}$ . Імпульси зі світлових датчиків свідчили про те, що свічення стає помітним після приходу КІ на КЕ, але ще до пробою (комутації) Т. Це дозволяє припустити, що перед пробоем в Т має місце ІКР, що створює область первинної іонізації. Останню можна розглядати як зону іонізації ІКР, що переходить в дифузний об'ємний пробій між КЕ і супротивним ОЕ, а потім в іскровий розряд або відразу в іскровий розряд. При цьому дуже важливим стає розмір зони сильного спотворення поля (зони первинної іонізації) навпроти КЕ тригатрону. Якщо супротивний електроду, що керує, ОЕ потрапляє в цю зону, то після приходу КІ маємо  $\Delta t_3 < 1$  нс,  $t_k < 1$  нс,  $\Delta t_k \approx 0,1$  нс. Якщо не потрапляє, то  $\Delta t_3$  для паралельно включених Т при кожному спрацьовуванні, а для окремого Т від імпульсу до імпульсу може збільшитися на порядок і більш. Це пояснюється тим, що в цьому випадку буде потрібен додатковий час на проростання стримерів і збільшення електропровідності каналів розряду між КЕ і супротивним йому ОЕ. Якщо швидкість поширення стримерів при напрузі, яка близька до пробивної, дорівнює 10 мм/нс, то при відстанях 12 мм між ОЕ час формування і розвитку стримера приблизно і складає час близько 1 нс, що був отриманий у наших експериментах. При оптимальній амплітуді КІ 70 кВ, робочій напрузі між ОЕ тригатрону  $U_p = 300 \div 400$  кВ і при відстанях  $d$  між цими електродами, що перевищують  $d = 11 \div 12$  мм, час комутації  $t_k$  і його розкид  $\Delta t_k$  різко зростали. Слід зазначити,

що це не виходить явно з емпіричних формул Д. К. Мартіна, які не передбачають різку зміну часу комутації  $t_k$  при незначній зміні величини РП.

У разі 4-х канального спрацьовування Т  $P_m$  амплітуда струму досягала 165 кА при індуктивному навантаженні модуля 600 нГн. Виміряна індуктивність Т в одноканальному режимі склала 125 нГн, при 4-х канальному режимі – 30÷35 нГн.

На відміну від відомих пристроїв з паралельним запуском декількох Т субмегавольтного рівня в створеному генераторі за схемою Фітча з сумарною амплітудою струму близько 2 МА вдалося здійснити паралельну роботу 48 Т на 400 кВ.

Для створення плазмових каналів (навантаження вищерозглянутого генератора за схемою Фітча) розроблено 32-х модульний ГІС на 2 МА. Для зменшення індуктивності розрядного контуру модуль ГІС конструктивно виконаний єдиним блоком "конденсатор – тригatron – навантаження" з габаритами 270 × 80 × 280 мм. Відмітною особливістю модуля ГІС є те, що його навантаженням є вакуумний РП. Тому жоден з електродів Т не пов'язаний гальванічно із заземленим токопроводом, що зазвичай має місце в схемах з використанням Т. Для надійного спрацьовування описуваних Т з малою величиною розкиду часу запізнювання пробою в 2 рази збільшена амплітуда негативного КІ (–50 кВ) в порівнянні з амплітудою робочої напруги Т (+25 кВ). В процесі підготовки модулів для паралельної роботи необхідно забезпечити для усіх Т мінімальний розкид  $\Delta t_3$ . На першому етапі налаштування отримано необхідні часові характеристики для одного Т у складі модуля на еквіваленті навантаження. Потім цей Т використовувався як "еталонний" для скорочення часу налаштування інших Т. Після налаштування довжина РП дорівнювала 13,5 мм, величина виступу КЕ над поверхнею ОЕ змінювалася в межах 1,3÷1,5 мм для усіх налагоджених Т. Час затримки спрацьовування  $t_3$  складав 5÷12 нс при розкиді  $\Delta t_3$  в декілька наносекунд. При випробуваннях ГІС час спрацьовування (інтервал часу між моментом приходу КІ і моментом появи струму в навантаженні) будь-якої групи з 4 - х модулів ГІС при синхронному включенні 32 модулів не перевищував 25 нс.

Амплітуда струму в мідній перемичці (еквіваленті навантаження) досягала 60 кА. Сумарна енергія, що запасється, в модулях ГІС складала лише 6 кДж, амплітуда сумарного струму в реальному навантаженні ГІС – 2 МА.

Генератор імпульсів напруги з амплітудою близько 1 МВ і фронтом в доли – одиниці наносекунд створено за схемою двоступінчатого підвищення напруги з використанням в кожному ступені трансформатора Тесла. Така схема дозволяє обійтися невеликою кількістю ІР, а також дозволяє зменшити габарити елементів генератора. Попереднім етапом в процесі розробки описуваного генератора було створення однокаскадного генератора з амплітудою вихідних імпульсів 300 кВ. Стартовим ступенем забезпечувалася подача імпульсу напруги на первинну обмотку трансформатора Тесла першого ступеня підвищення напруги. Для зменшення індуктивності розрядного контуру першого ступеня, часу комутації ІР і зменшення зносу його Е використано багатоканальний режим комутації.

Комутатор ступеня є повітряним ІР з різким спотворенням поля. ОЕ виконані у вигляді сталевих кілець із зовнішнім діаметром 100 мм і внутрішнім – 80 мм з торцями, що округляють в робочій зоні. КЕ виконаний у вигляді плоского кільця з

внутрішнім діаметром 90 мм, зовнішнім – 130 мм і завтовшки 0,3 мм з нержавіючої сталі. На внутрішній кромці КЕ у восьми місцях, рівновіддалених один від одного по колу кромки, виконані трикутні зубці заввишки 2 мм для фіксації точок ініціації пробою. КЕ розміщений точно у середині РП завдовжки 5 мм. Корпус розрядника виготовлений з оргскла і складається з двох однакових половин. Для підвищення ресурсу ІР внутрішня поверхня корпусу розвинена за рахунок циліндричного пазу таким чином, що продукти ерозії Е потрапляють тільки на невелику частину внутрішньої ізоляційної поверхні і не можуть потрапити всередину цього пазу. Довжина розрядника у напрямі протікання струму складає 55 мм, а його розміри в плані – 226×226 мм.

При оцінці по формулі (3) кількості розрядних каналів в ІР отримано  $N=5,52$ , тобто може бути сформовано до 5 паралельних каналів. Розбирання розрядника після 5÷8 спрацьовувань показало, що кількість слідів розрядів на ОЕ в 3,5÷5 разів перевищувала кількість керованих спрацьовувань. Крім того, були виявлені сліди розрядів на усій довжині робочої кромки КЕ, що свідчить про практично однакову вірогідність утворення розрядних каналів по усій робочій довжині ОЕ. Визначена по осцилограмі вихідного імпульсу напруги ступеня індуктивність розрядного контуру, в який входить імпульсний трансформатор з 3-х витковою первинною обмоткою, дорівнювала 190 нГн (причому індуктивність розсіяння обмотки ІТ складає 170 нГн), завдяки багатоканальності розряду. Максимальна розрахункова амплітуда розрядного струму через розрядник в експериментах склала 67,6 кА при максимальній швидкості наростання  $5 \cdot 10^{10}$  А/с. Результати експериментів по реалізації в повітрі багатоканального режиму в ІР із спотворенням поля, тригatronному розряднику з лезовим КЕ і в тригatronах узгоджуються з результатами розрахунків, проведених по співвідношенням (3).

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичне завдання удосконалення іскрових розрядників електротехнологічних установок для розширення технологічних і поліпшення експлуатаційних характеристик цих установок, у тому числі підвищення частоти посилок імпульсів, збільшення амплітуди комутованих струмів і ресурсу, що дозволило модернізувати існуючі і створити нові електротехнологічні установки, що створюють сильні імпульсні електричні і магнітні поля.

1. Обґрунтована доцільність створення нових конструкцій іскрових розрядників із збільшеною частотою спрацьовування, підвищеним ресурсом, збільшеною амплітудою комутованих струмів, при роботі яких забезпечується захист персоналу і напівпровідникових приладів від електромагнітних завад і шуму, зручних в експлуатації і недорогих.

2. Розроблено резистивну модель відновлення електричної міцності (ВЕМ) розрядного проміжку (РП), яка призначена для розрахунку величини активного опору РП, що відновлюється. У межах моделі для практичних випадків опір РП, що відновлюється, може бути визначений без урахування розподілу заряджених часток по перерізу розрядного каналу. Показано, що зростання відносної пробивної напруги відбувається швидше, ніж зростання відносного опору РП.

Отримано співвідношення, зручні для розрахунку числа паралельних розря-

дних каналів в розряднику по відомих параметрах розрядного проміжку, діючої напруги і розрядного контуру. Співвідношення можуть бути корисні при проектуванні розрядників для оцінки можливості реалізації багатоканального режиму комутації в них і для оцінки параметрів вихідних імпульсів.

3. Встановлено, що малогабаритний ( $170 \times 100 \times 50$  мм) на напругу до 20 кВ високоресурсний ( $10^{10}$  розрядів) рейковий багатопроміжковий розрядник (БПР) з циліндричними електродами (Е) при раціональній величині проміжків  $0,25 \div 0,3$  мм може тривало працювати на самопробі в повітрі при атмосферному тиску, забезпечуючи амплітуду імпульсів струму до 60 А. Експериментально встановлена верхня межа по частотній застосовності БПР дорівнює 27000 імп/с. БПР використовується у ряді електротехнологічних установок для загострення фронту імпульсів напруги до  $10 \div 20$  нс при формуванні імпульсного коронного розряду (ІКР) і до декількох наносекунд при генеруванні ширококутових випромінюваних імпульсів. Виміряні амплітуди імпульсів напруги в електродній системі ІКР були, принаймні, в 1,3 рази більше, ніж у випадку без загострення.

В технологічній установці вирішено завдання синхронної роботи на загальне навантаження двох однакових високовольтних генераторів потужністю до 10 кВт завдяки електромагнітному екрануванню високовольтних частин генераторів і синхронному запуску низьковольтних частин генераторів.

4. Створено 4-канальний тригатрон (Т) з комутованим струмом до 280 кА на напругу 400 кВ з наносекундним часом включення, збільшеним ресурсом внутрішньої ізоляції розрядної камери і з посиленою корпусною ізоляцією. В установці, що містить 12 модулів за схемою 4-ступінчастого генератора Фітча з мінімальною погонною індуктивністю (40 нГн на каскад) розрядного контуру, експериментально обґрунтована можливість отримання в навантаженні 50 нГн струму близько 2 МА за допомогою 12-ти паралельно включених 4-канальних Т. При паралельній роботі 48 Т досягнуто стабільний розкид часу спрацьовування менше 1 нс при розташуванні Е, що керує, у високовольтному основному електроді (ОЕ) позитивної полярності, що забезпечується експериментально визначеною раціональною величиною основного РП  $11 \div 12$  мм і розробленою схемою управління Т. Розроблено уточнений критерій паралельної роботи Т субмегавольтного рівня.

5. У створеному компактному багатомодульному (габарити модуля –  $270 \times 80 \times 280$  мм) генераторі імпульсів струму на 2 МА експериментально отримано стабільний розкид включення, що не перевищує 25 нс, для 32-го повітряних атмосферного тиску Т на напругу 25 кВ в умовах, коли жоден з ОЕ тригатрону не має гальванічного зв'язку із заземленням.

6. У компактному ( $470 \times 226 \times 226$  мм) вузлі "ємнісний накопичувач ємністю 25 мкФ – ІР" з повітряним атмосферного тиску ІР із спотворенням поля внаслідок багатоканальності розряду досягнута індуктивність вузла склала менше 20 нГн. Завдяки цьому вузол, включений в коло первинної 3-виткової обмотки трансформатора Тесла, при зарядній напрузі накопичувача 9,6 кВ забезпечував отримання фронту вихідного імпульсу напруги близько 80 нс, амплітуди струму 67,6 кА при максимальній швидкості наростання  $5 \cdot 10^{10}$  А/с.

7. Результати дисертації використані при виконанні держбюджетних і господарських робіт в 1998–2012 рр., міжнародного проекту НТЦУ № 1120 в НДПКІ



"Молнія" НТУ "ХПІ", ТОВ НВФ «Адрон» (м. Київ), підприємством «Протон-21» (м. Київ), в навчальному процесі НТУ "ХПІ" при підготовці фахівців за фахом "Техніка і електрофізика високої напруги".

### СПИСОК ОПУБЛИКОВАНИХ РОБІТ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Евдошенко Л.С. 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. – М., 1998. – №2. – С. 120–126. – *Здобувач брав участь в розробці методики випробувань і їх проведенні.*

2. Евдошенко Л.С. Высоковольтные искровые разрядники для технологических установок / Н.И. Бойко, Л.С. Евдошенко, А.И. Зароченцев, В.М. Иванов, А.Н. Тур // Приборы и техника эксперимента. – М., 2001. – № 2. – С. 79–88. – *Здобувач брав участь в розробці конструкції розрядників, розробці методики випробувань, їх проведенні і дослідженні характеристик розрядників.*

3. Евдошенко Л.С. Защита от электромагнитных полей в технологических импульсных высоковольтных установках / Н.И. Бойко, Л.С. Евдошенко, А.Н. Тур, В.М. Иванов, А.И. Зароченцев // Приборы и техника эксперимента. – М., 2002. – № 4. – С. 135–139. – *Здобувач запропонував і обґрунтував застосування екрану-кожуха для охолодження розрядників.*

4. Евдошенко Л.С. Рабочие камеры для обработки продуктов комплексным воздействием сильных импульсных электрических полей / Н.И. Бойко, Л.С. Евдошенко, А.Н. Тур, В.М. Иванов, А.И. Зароченцев // Приборы и техника эксперимента. – М., 2002. – № 6. – С. 102–112. – *Здобувач запропонував і обґрунтував використання виводів робочої камери в якості електродів розрядника.*

5. Евдошенко Л.С. Длительная электрическая прочность полиэтиленовой слоистой изоляции при воздействии импульсов наносекундной длительности / Н.И. Бойко, Л.С. Евдошенко, О.В. Покладов, В.В. Рудаков, А.Н. Тур // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2003. – № 1, т. 1. – С. 142–147. – *Здобувач розробив розрядник і запропонував методику для проведення випробувань шаруватої ізоляції.*

6. Евдошенко Л.С. Импульсный коронный разряд с расширенной зоной ионизации: физические основы получения и перспективные области применения / Н.И. Бойко, А.В. Борцов, Л.С. Евдошенко, В.М. Иванов, А.И. Иванькина, А.Н. Тур // Електротехніка і Електромеханіка. – Харків: НТУ «ХПІ» – 2004. – № 3. С. 98–104. – *Здобувач взяв участь в аналізі результатів і формулюванні висновків.*

7. Евдошенко Л.С. 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 брав участь в розробці конструкції розрядників, методики випробувань розрядників і дослідженні їх характеристик.*

8. Евдошенко Л.С. Низкоиндуктивная секция генератора мощных высоковольтных импульсов по схеме Фитча / Н.И. Бойко, А.В. Борцов, Л.С. Евдошенко, А.И. Зароченцев, В.М. Иванов, В.В. Рудаков, А.Н. Тур, В.Г. Артюх // Приборы и

техника експеримента. – М., 2005. – № 4. С. 57–65. – *Здобувач експериментально на базі досліджень двохмодульної секції генератора обґрунтував можливість отримання в навантаженні струму близько 2 МА за допомогою паралельно включених тригатронів.*

9. Евдошенко Л.С. Четырехканальный высоковольтный искровой разрядник / Н.И. Бойко, Л.С. Евдошенко, А.И. Зароченцев, В.М. Иванов // *Електротехніка і Електромеханіка.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2006. – № 3. – С. 80–81. – *Здобувач розробив методіку виконання плівкової зовнішньої ізоляції 4-х канального тригатрону, взяв участь у випробуваннях тригатрону.*

10. Евдошенко Л.С. Метод обеззараживающей обработки текучих продуктов в потоке при помощи сильных импульсных электрических полей и искровых разрядов / Н.И. Бойко, А.В. Борцов, Л.С. Евдошенко, А.И. Зароченцев, В.М. Иванов // *Технічна електродинаміка.* – 2006. – Тем. вип., ч. 4. – С. 83–86. – *Здобувач взяв участь у розробці розрядників, проведенні випробувань і визначенні характеристик розрядників.*

11. Евдошенко Л.С. Частотные искровые разрядники / Н.И. Бойко, Л.С. Евдошенко, А.И. Зароченцев, В.М. Иванов // *Вісник НТУ «ХПІ».* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2006 – № 35. – С. 5–19. – *Здобувач провів аналітичний огляд іскрових розрядників для технологічних електроустановок, розробив вимоги до них і конструкцію багатопроміжкового розрядника з пластинчатими електродами.*

12. Евдошенко Л.С. Стартовая ступень генератора высоковольтных импульсов / Л.С. Евдошенко // *Вісник НТУ «ХПІ».* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2007 – №. 34 – С. 57–66.

13. Евдошенко Л.С. Тригатроны на 400 кВ для мощных низкоиндуктивных генераторов импульсов / Н.И. Бойко, Л.С. Евдошенко, А.И. Зароченцев, В.М. Иванов, В.Г. Артюх // *Приборы и техника эксперимента.* – М., 2008. – № 1. – С. 78–86. – *Здобувач експериментально визначив раціональну міжелектродну відстань в тригатроні, взяв участь в розробці і дослідженні схем управління тригатронами, експериментальному визначенні часу спрацьовування тригатронів.*

14. Евдошенко Л.С. Компактный многомодульный генератор импульсов тока на 2 МА / Н.И. Бойко, Л.С. Евдошенко, А.И. Зароченцев, В.М. Иванов // *Електротехніка і електромеханіка.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. – № 5. – С. 60–64. – *Здобувач брав участь в розробці і реалізації методіки налаштування повітряних тригатронів для їх синхронного запуску, у випробуваннях генератора.*

15. Евдошенко Л.С. Тригатроны на рабочее напряжение до 1 МВ с наносекундным временем срабатывания / Н.И. Бойко, Л.С. Евдошенко, А.И. Зароченцев, В.М. Иванов // *Технічна електродинаміка.* – 2009. – № 1. – С. 38–43. – *Здобувач теоретично і експериментально показав, що час затримки спрацьовування тригатрону і розкид цього часу складають близько 1 нс, розробив основні вимоги щодо наносекундного спрацьовування тригатронів.*

16. Евдошенко Л.С. Развитие представлений о механизмах срабатывания тригатронов и их рациональной конструкции / Н.И. Бойко, Л.С. Евдошенко, А.И. Зароченцев, В.М. Иванов // *Електротехніка і електромеханіка.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2009. – № 5. – С. 49–55. – *Здобувач провів порівняльний аналіз механізмів*

*спрацьовування тригатронів, уточнив основні вимоги щодо наносекундного спрацьовування тригатронів.*

17. Евдошенко Л.С. Расчет многоканального режима коммутации искровых разрядников и сравнение его результатов с экспериментом / Л.С. Евдошенко // *Електротехніка і електромеханіка*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2010. – № 3. – С. 46–49.

18. Евдошенко Л.С. Резистивная модель восстановления электрической прочности разрядного промежутка / Л.С. Евдошенко // *Вісник НТУ «ХПІ»*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2010. – №. 34. – С. 29 – 40.

19. Евдошенко Л.С. 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*. – М., 2011. – № 4. С. 92–101. – *Здобувач експериментально показав застосовність багатопроміжкового розрядника для генерації імпульсного коронного розряду при частотах проходження понад 25000 ім/с.*

20. Пат. 63001 Україна, МПК<sup>7</sup> A23L3/32, C02F1/48, A23C3/07. Спосіб і пристрій для обробки рідин і рідких продуктів / Бойко М.І., Евдошенко Л.С., Зароченцев О.І., Иванов В.М., Тур А.М. – № 2000106013; заявл. 24.10.00; опубл. 15.01.04. бюл. № 1. – *Здобувач розробив рекомендації по розміщенню кювети для обробки рідин.*

21. Высокоинтенсивные физические факторы в биологии, медицине, сельском хозяйстве и экологии: труды междунар. конф. / под ред. В.Д. Селемира, Г.М. Спирина, В.И. Карелина. – Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2005. – 480 с. – ил. – С. 441–449. – *Здобувач взяв участь у визначенні характеристик розрядників.*

22. Сотрудничество для решения проблемы отходов: материалы 3-й Международ. конф. (Харьков, 7–8 февр. 2006 г., Украина). – X., 2006. – 272 с. – С. 219–221. – *Здобувач брав участь у випробуваннях розрядників і установок в цілому.*

23. Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals : Materials of Third International Conference, (Sept. 18–22, 2006, Sevastopol, Ukraine) / Proc. IEEE Electronics Power Science and General. – 2006. – P. 194–196. – *Здобувач розробив низькоіндуктивний розрядник другого каскаду, провів його випробування і визначив характеристики.*

24. Озон и другие экологически чистые окислители: Наука и технологии: материалы 30-го Всеросс. семинара (Москва, 18–19 июня 2008) / Химический факультет МГУ. – М.:МАКС Пресс, 2008. – 324 с.: ил. – С. 153–157. – *Здобувач взяв участь у проведенні досліджень по загостренню фронту імпульсів напруги в реакторі і його впливу на генерацію озону.*

25. 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 взяв участь у розробці, випробуваннях і визначенні характеристик розрядників усіх каскадів генератора.*

26. Сотрудничество для решения проблемы отходов: матер. VI Междунар. конф. (8–9 апреля 2009 г., г.Харьков, Украина). – X., 2009. – 290 с. – С. 220–221. – *Здобувач взяв участь в розробці робочих камер, загострюючого розрядника і про-*

*веденні експериментальних досліджень.*

27. Физика импульсных разрядов в конденсированных средах: материалы междунар. науч. конф. (17–21 августа 2009 г.). – Николаев: КП «Миколаївська обласна друкарня», 2009. – 214 с., ил. – С. 104–106. – *Здобувач розробив і запропонував багатопроміжковий розрядник для загострення фронту імпульсів і збільшення напруженості поля в розрядних камерах.*

28. Ultrawideband and Ultrashot Impulse Signals : Materials of 5-th International Conference, (Sept. 6–10, 2010, Sevastopol, Ukraine) / Proc. IEEE Electronics Power Science and General. – 2010. – P. 221–222. – *Здобувач розробив багатопроміжковий розрядник, взяв участь в проведенні випробувань генератора і визначенні його характеристик.*

## АНОТАЦІЇ

**Евдошенко Л.С. Удосконалення високовольтних іскрових розрядників зі змінною електричною міцністю для електротехнологічних установок. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.09.13 "Техніка сильних електричних і магнітних полів". – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2012.

У роботі вирішено науково-практичне завдання удосконалення іскрових розрядників (ІР) електротехнологічних установок для поліпшення технологічних і експлуатаційних характеристик цих установок, у тому числі підвищення частоти спрацьовування, збільшення амплітуди комутованих струмів і ресурсу. Для режиму з високою частотою проходження імпульсів розроблена резистивна модель відновлення електричної міцності розрядного проміжку. Одержана формула для розрахунку кількості каналів в явному виді для режиму багатоканальної комутації. Експериментально доведено, що за допомогою багатопроміжкових (з проміжками  $0,25 \div 0,3$  мм) повітряних атмосферного тиску іскрових розрядників загострення фронту імпульсів можливе з частотою проходження імпульсів понад 25000 імпл/с при амплітудах розрядних струмів 60 А. У тераваттній технологічній установці досягнута амплітуда сумарного струму в навантаженні 2 МА. Досягнуте стабільне паралельне спрацьовування 48 тригатронів на 400 кВ з наносекундною точністю при розміщенні електроду, що управляє, у високовольтному основному електроді позитивної полярності, якщо відстань між основними електродами тригатрону дорівнює  $11 \div 12$  мм. У розробленому малогабаритному багатомодульному генераторі імпульсів струму на 2 МА (при енергії, що запасується, 6 кДж) досягнуто розкид часу, що не перевищує 25 нс, паралельного спрацьовування 32-ти повітряних атмосферного тиску тригатронів в умовах, коли жоден з електродів тригатрону не мав гальванічного зв'язку із заземленням. У створеному компактному ( $470 \times 226 \times 226$  мм) вузлі "ємнісний накопичувач ємністю 25 мкФ – ІР" з повітряним атмосферного тиску розрядником завдяки багатоканальному режиму комутації в колі первинної 3-виткової обмотки трансформатора Тесла отримано амплітуду струму 67,6 кА при максимальній швидкості наростання  $5 \cdot 10^{10}$  А/с.

*Ключові слова:* сильне електричне поле, електричний розряд, електротехноло-

гія, відновлення електричної міцності, багатопроміжковий розрядник, тригатрон, багатоканальний режим розряду.

**Евдошенко Л.С. Усовершенствование высоковольтных искровых разрядников с изменяемой электрической прочностью 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, 2012.

В работе решена научно-практическая задача усовершенствования искровых разрядников электротехнологических установок для улучшения технологических и эксплуатационных характеристик этих установок, в том числе повышения частоты срабатывания, увеличения амплитуды коммутируемых токов и ресурса, уменьшения времени срабатывания и его разброса для разрядников. Разработана резистивная модель восстановления электрической прочности разрядного промежутка искровых разрядников, дающая возможность для режима с высокой частотой следования импульсов рассчитать активное сопротивление разрядного промежутка после окончания импульса тока и оценить пробивное напряжение промежутка по параметрам разряда. Развита расчетная модель режима многоканальной коммутации, которая позволяет рассчитать количество разрядных каналов в искровом разряднике в явном виде по параметрам разрядной цепи, воздействующего напряжения и разрядного промежутка. Впервые экспериментально доказано, что с помощью многозазорных (с зазорами  $0,25 \div 0,3$  мм) воздушных атмосферного давления искровых разрядников (МЗР) обострение фронта импульсов возможно с частотой посылок импульсов, превышающей 25000 имп/с при амплитудах разрядных токов 60 А. Расчетный ресурс МЗР около  $10^{10}$  импульсов. В тераваттной технологической установке достигнута амплитуда суммарного тока около 2 МА в нагрузке 50 нГн. Установка выполнена на базе 12-ти низкоиндуктивных модулей по схеме генератора Фитча, каждый из которых содержит единственный разрядный коммутатор — 4-канальный тригатрон на 400 кВ. Разработана и опробована схема управления тригатронами. Достигнуто стабильное параллельное срабатывание 48 тригатронов с наносекундной точностью при размещении управляющего электрода в высоковольтном основном электроде положительной полярности. Экспериментально показано, что разброс времени срабатывания тригатрона составляет около 1 нс, а разброс времени коммутации менее 1 нс в том случае, когда расстояние между основными электродами тригатрона равняется  $11 \div 12$  мм. Наружная изоляция корпуса тригатрона усилена за счет многослойной пленочной основной изоляции модуля, вложенной в пазы корпуса, что повышает эксплуатационные характеристики установки и снижает ее стоимость. Увеличен ресурс внутренней изоляции разрядной камеры тригатрона за счет снабжения ее защитным металлическим экраном, соединенным с градиентным кольцом. Выработан уточненный критерий параллельного срабатывания с наносекундной точностью тригатронов мегавольтного уровня. В разработанном малогабаритном многомо-

дульном генераторе импульсов тока на 2 МА (при запасаемой энергии 6 кДж) достигнут разброс времени параллельного срабатывания 32-ти воздушных атмосферного давления тригатронов, не превышающий 25 нс, в условиях, когда ни один из электродов тригatrona не имел гальванической связи с заземлением. В созданном компактном (470×226×226 мм) узле «емкостный накопитель емкостью 25 мкФ – воздушный атмосферного давления разрядник с искажением поля» полученная индуктивность составила менее 20 нГн благодаря многоканальному режиму коммутации разрядника. Это позволило при включении узла в цепь первичной 3-витковой обмотки трансформатора Тесла получить амплитуду тока в ней 67,6 кА при максимальной скорости нарастания  $5 \cdot 10^{10}$  А/с, длительность фронта импульса напряжения на нагрузке составила при этом около 80 нс.

*Ключевые слова:* сильное электрическое поле, электрический разряд, электро-технология, восстановление электрической прочности, многоазорный разрядник, тригatron, многоканальный режим разряда.

### **Evdoshenko L.S. Improvement of High-Voltage Spark Dischargers with Variable Electrical Strength 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, 2012.

The scientific and technological task of improvement of spark dischargers of electrotechnological plants for improvement of technological and operational performance data of these plants, including increasing operation frequency, increasing commutated current amplitude and resource has been solved in this work. Resistive model of electric strength recovery of discharging gap of spark dischargers has been developed. Calculating model of process of multi-channel commutation mode was developed. It was proved experimentally that the sharpening of pulse front with the help of multi-gap (with gaps of 0,25–0,3 mm) air atmospheric pressure spark gaps is possible for pulse repetition frequency more than 25000 p/s with discharge current amplitudes 60 А. The total current amplitude of 2 МА was achieved in the terawatt technological plant. The plant was made on basis of 12 low-inductance modules in Fitch generator circuit. Each module includes one discharging commutator – 4-channel trigatron for 400 kV voltage. In the developed compact multi-module generator of current pulses of 2 МА (stored energy 6 kJ), the time jitter of parallel operation of 32 air atmospheric pressure trigatrons was achieved to be lower 25 ns in conditions when no one of the trigatron electrodes has galvanic coupling with the ground. In the small-sized (470×226×226 mm) unit “capacitive storage with capacitance 25 μF – air atmospheric pressure discharger”, which was made, the inductance was lower 20 nH owing to multi-channel mode of discharger commutation. This enabled, when the unit was connected in the circuit of primary 3-turn winding of Tesla transformer, to obtain current amplitude 67,6 кА in it under maximal rise rate of  $5 \cdot 10^{10}$  А/с.

*Key words:* high electric field, spark discharger, electrotechnology, electric strength recovery, multi-gap discharger, trigatron, multi-channel discharge mode.



ЄВДОШЕНКО Леонід Свиридович

**УДОСКОНАЛЕННЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ІСКРОВИХ РОЗРЯДНИКІВ  
ЗІ ЗМІННОЮ ЕЛЕКТРИЧНОЮ МІЦНІСТЮ  
ДЛЯ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНИХ УСТАНОВОК**

005.09.13 – Техніка сильних електричних та магнітних полів

Автореферат  
дисертації на здобуття вченого ступеня  
кандидата технічних наук

Формат 60×90/16      Гарнітура Times  
Обсяг 0,9 авт. арк.      Наклад 100 прим.      Зам. №

Надруковано у копії-центрі «Моделіст»  
(ФО-П Миронов М.В., Свідоцтво В О4 № 022953 від 31.03.1994 р.)

61002, м. Харків, вул. Червонопрапорна, 3

Тел. 7-170-354

[www.modelist.in.ua](http://www.modelist.in.ua)