

ОГЛЯДОВІ СТАТТІ

УДК 681.3: 621.3

К.В. Дубовенко

Миколаївський навчально-науковий інститут
Одеського національного університету ім. І.І. Мечникова,
кафедра ОТІТ

ІНФОРМАЦІЙНА БАЗА АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ КОМПАКТНИХ ІМПУЛЬСНИХ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

© Дубовенко К.В., 2006

Наведено стислий огляд основних напрямів формування інформаційної бази для автоматизованого проектування компактних імпульсних електротехнічних систем, призначених для застосування у розрядно-імпульсному технологічному обладнанні.

A brief survey concerning the main trends of information data base formation for automatized design of compact pulsed power systems intended for application in pulsed power industrial equipment is considered.

Вступ. У зв'язку з розвитком науки і техніки за останні двадцять років у світі з'явилося кілька сотень нових перспективних розрядно-імпульсних технологій (РІТ). Однак з вказаної кількості лише трохи більше десятих технологій успішно пройшли етап реалізації на рівні серійного застосування. До таких РІТ, насамперед, потрібно зарахувати технології електрогідравлічного очищення лиття, відновлення дебіту нафтових та водозабірних свердловин, руйнування гірських порід, бетонних та залізобетонних споруд, мілкодисперсного подрібнення матеріалів, розмірного оброблення матеріалів [2, 4, 44]. Цей результат, зокрема, свідчить про необхідність всебічного вдосконалення імпульсних електротехнічних систем (ІЕТС), що є основними компонентами розрядно-імпульсного обладнання.

Імпульсна електротехнічна система складається з сукупності автономних, різних за функціональним призначенням електротехнічних пристроїв, які утворюють цілісну єдність з погляду реалізації електроенергетичних, електротехнічних та електрофізичних характеристик розрядно-імпульсного процесу та мають властивості зміни цих характеристик з метою його оптимізації. Дія будь-якої ІЕТС заснована на збільшенні потужності за рахунок досить повільного нагромадження енергії у системі від первинного джерела і наступного швидкого її виведення у електричне навантаження. Основними елементами ІЕТС для розрядно-імпульсних технологій (рис. 1) є зарядний пристрій, нагромаджувач енергії, високовольтна комутаційна апаратура та система керування. Навантаженням є плазмовий канал високовольтного пробою у міжелектродному проміжку електродної системи. Електродна система розташовується у робочому середовищі, де енергія, попередньо введена у нагромаджувач, перетворюється в інші види енергії (механічну, теплову, енергію випромінювання у різних діапазонах частот електромагнітних хвиль) і передається об'єкту обробки відповідно до конкретного технологічного процесу.

Найскладнішим є розроблення компактних імпульсних систем. Якісною відмінною особливістю компактних систем є наявність побічних (і зазвичай) негативних ефектів, що виникають під час функціонування одних елементів системи і впливають на роботу інших. Тому аналіз характеристик компактних систем під час їх проектування виявляється ускладненим необхідністю урахування такого впливу у просторі і часі, зокрема, взаємних імпульсних механічних навантажень на елементи системи, забезпечення електромагнітної та теплової сумісності вузлів електро-

обладнання, їх електричної міцності. Крім того, заради мінімізації об'єму та маси компактні системи часто проектують на межі функціональних можливостей елементів, що входять до їх складу. А це, насамперед, впливає на їх ресурс та надійність.

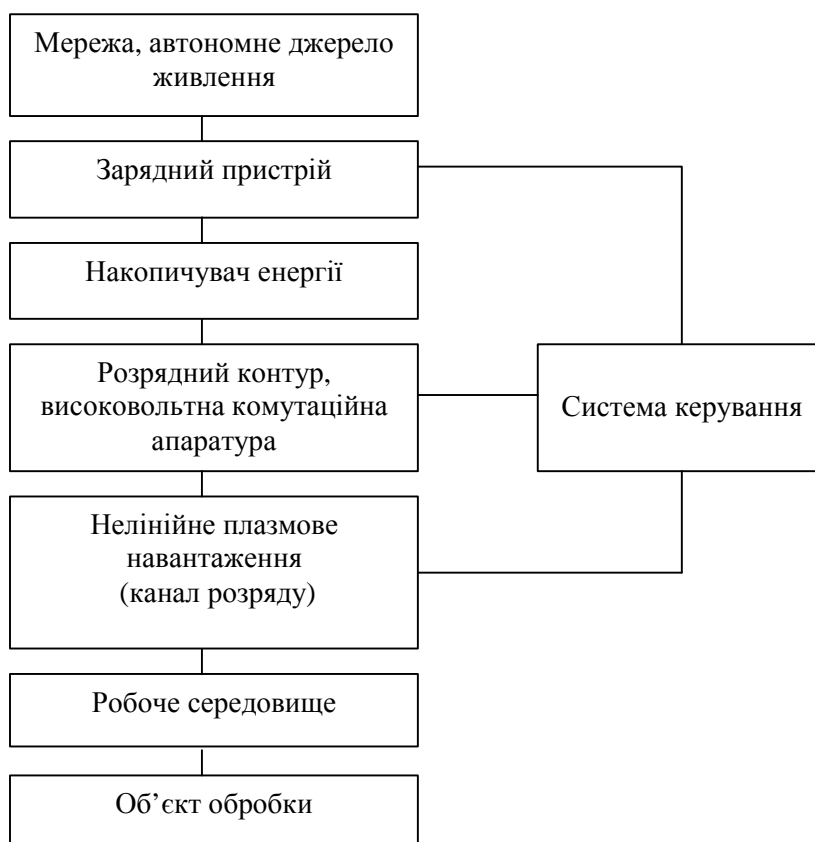


Рис. 1. Структурна схема імпульсної електротехнічної системи, призначеної для реалізації розрядно-імпульсного технологічного процесу

Для промислового застосування РІТ імпульсна електротехнічна система повинна забезпечувати необхідну потужність розряду в імпульсі при наданому рівні енергії у нагромаджувачі. Для більшості РІТ необхідний рівень потужності розряду знаходиться у діапазоні 10^9 – 10^{13} Вт при значеннях енергії, що нагромаджується 10^2 – 10^7 Дж. На теперішній час таких значень можна досягти тільки з використанням високовольтних систем. Ця вимога істотно звужує сферу застосування РІТ випадками, коли застосування інших технічних рішень неможливе або економічно невиправдане. Основними напрямками підвищення конкурентоспроможності та розширення застосування РІТ є:

- вдосконалення функціональних елементів ІЕТС,
- підвищення ефективності їх взаємодії на системному рівні,
- збільшення надійності та ресурсу ІЕТС,
- зниження матеріалоємності та габаритів імпульсних систем,
- зменшення витрат на розроблення та виготовлення розрядно-імпульсного обладнання.

Вирішити цю проблему можливо лише за умови розроблення сучасних систем автоматизованого проектування (САПР) ІЕТС [1], осердям яких є відповідна інформаційна база, що ґрунтується на експериментальних дослідженнях та математичному моделюванні роботи вузлів ІЕТС з урахуванням взаємного впливу процесів у просторі і часі. Методичне забезпечення САПР компактних імпульсних електротехнічних систем у загальному випадку вміщує теорію процесів, методи аналізу, синтезу і оптимізації схем і конструкцій, математичні моделі та алгоритми числового вирішення систем рівнянь, що описують елементи та пристрої компактних ІЕТС з урахуванням їх функціональної взаємодії.

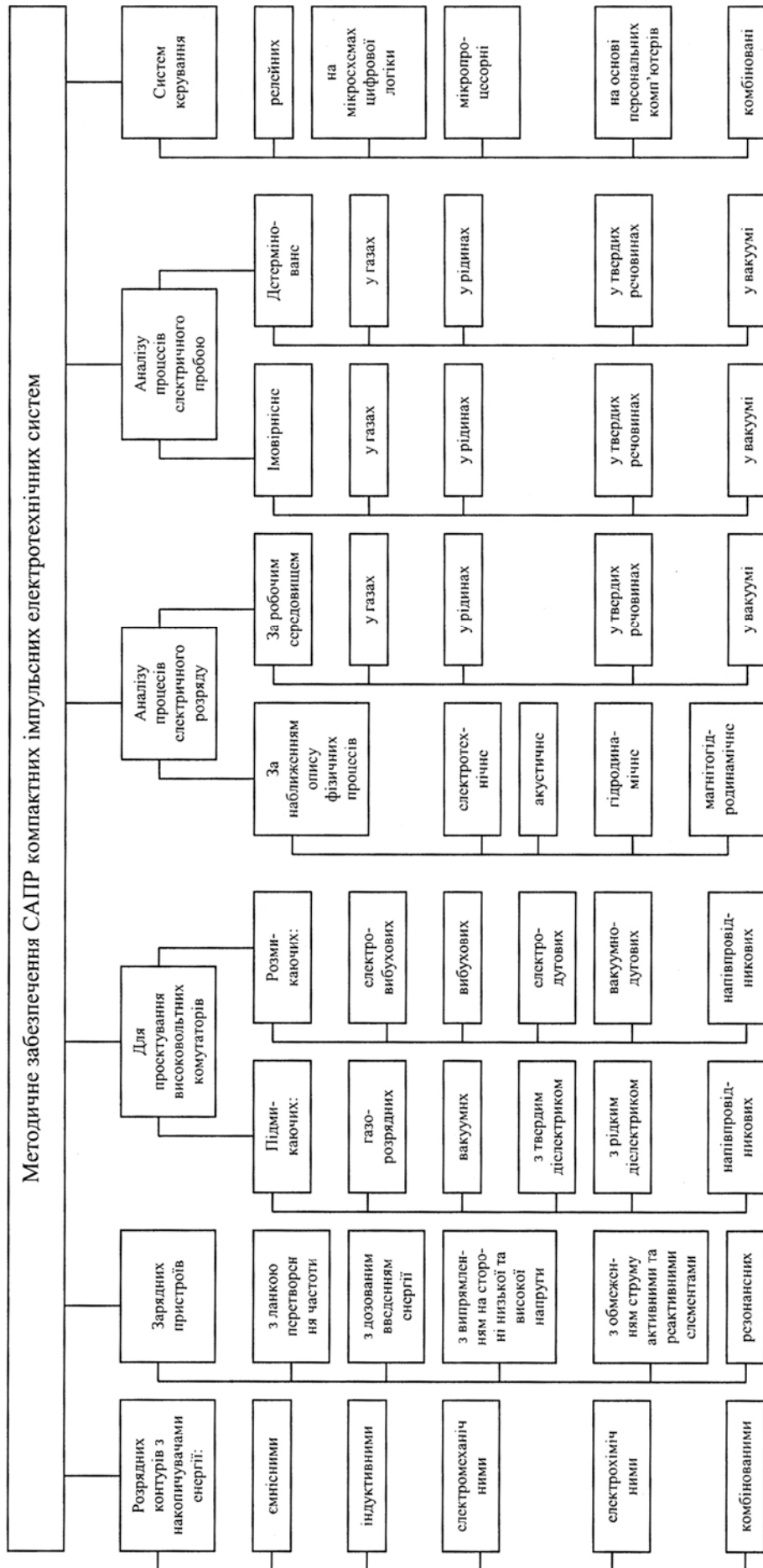


Рис. 2. Основні складові методичної бази САПР компактних імпульсних електротехнічних систем для розрядно-імпульсних технологій

Крім того, інформаційна база проектування є саме тою основою, на якій можлива реалізація сукупності основних невід'ємних рис САПР (комплексного вирішення завдань проектування за рахунок інтенсивного обміну інформацією про характеристики системи та їх реалізацію, можливість імітаційного моделювання складних об'єктів з метою оптимізації варіантних рішень, інтерактивність процесу проектування з безперервним процесом діалогу “людина – ЕОМ”, замкненість процесу проектування, що полягає у використанні результатів моделювання на наступному етапі конструкторського розроблення системи).

Мета роботи полягає в узагальненні напрямів розвитку методичного забезпечення систем автоматизованого проектування компактних імпульсних електротехнічних систем для розрядно-імпульсних технологій і створенні інформаційної бази для їх системотехнічного проектування.

Для досягнення мети створення інформаційної бази повинно забезпечувати повноту інформації про імпульсні електротехнічні системи, що проектуються, а тому спиратися на сучасні математичні методи, математичні моделі ІЕТС та їх елементів, широкий обсяг експериментальних даних та результатів числових розрахунків характеристик систем. З урахуванням узагальненої структури імпульсних електротехнічних систем (рис. 1) інформаційна база САПР ІЕТС містить математичні моделі основних елементів, що входять до їх складу (рис. 2), та результати їх моделювання, стислий огляд яких наведено нижче.

Моделювання характеристик електричних розрядів у просторі і часі. У публікаціях [5, 13–16, 32] для моделювання електричних розрядів у компактних системах застосовано ефективний скінченно-різницеви метод повністю консервативних неявних схем для рівнянь магнітної гідродинаміки, розроблений у роботах [29, 33]. Цей підхід дає змогу узгоджено урахувати характерну для компактних систем взаємодію електромагнітних, теплових та гідродинамічних процесів, що відбуваються у просторі і часі після формування плазмового каналу і генерації потужних ударних хвиль та хвиль тиску під час імпульсного виділення у ньому енергії нагромаджувача.

Відомо, що широкий спектр режимів імпульсного впливу на об'єкт обробки може бути реалізованим за рахунок вибору робочих середовищ, через які вплив передається від каналу розряду, та їх початкових параметрів. Початкові параметри середовищ визначаються умовами технологічного процесу. Електричні, теплові та гідродинамічні характеристики середовищ урахуються введенням у математичну модель відповідних рівнянь стану та залежностей електричної провідності, теплопровідності від температури та тиску або густини речовини у широкому спектрі зміни цих параметрів. Для цього створено базу даних для різних речовин та їх сумішей, до якої увійшли, наприклад, результати робіт [18–22, 26].

Результати числового аналізу характеристик електричних розрядів у газах і газових сумішах наведені у роботах [5, 15, 32]. Отримані результати порівнювали з експериментальними даними. Використання моделей дало змогу погоджувати параметри імпульсних джерел енергії з характеристиками плазмового навантаження, кількісно визначати ефективність імпульсного перетворення енергії, урахувати взаємний вплив нестационарних електромагнітних, гідродинамічних та теплових полів на компоненти систем.

У публікаціях [3, 20, 25] вивчали характеристики електричних розрядів у воді. Характеристики отримано для нормальних початкових температур і тисків незбуреної рідини. У роботах [8, 38] числово моделювали характеристики розрядів у попередньо нагрітій рідині при температурах, нижчих за критичну. Показано, що за визначених умов навколо каналу розряду формується двофазна зона парарідина. Вивчено вплив початкової температури, тиску і параметрів розрядного контуру імпульсного джерела енергії на динаміку двофазної зони. Порівняно результати моделювання з експериментальними даними, що дозволяють використання підходу під час автоматизованого проектування.

Динаміка електричних розрядів у замкнених об'ємах. Для проектування компактних імпульсних систем аналіз динаміки електричних розрядів у замкнених об'ємах важливий з такого приводу. У таких розрядах необхідно враховувати взаємодію між плазмою та ударною хвилею. Така взаємодія починається, коли ударна хвиля, що генерується під час розширення плазмового каналу у робочому середовищі розрядної камери, відбивається від стінок камери, повертається до каналу та стискує його. Зменшення радіуса каналу призводить до збільшення його опору та певної зміни режиму введення енергії імпульсного джерела у нього. Це ускладнює процеси у розрядній камері. Кількісно таку взаємодію у розрядних контурах ІЕТС різної енергоємності вивчали у роботах [5,16,40]. У цих роботах також розглянуто вплив початкових умов на динаміку розрядів у замкненому об'ємі. Отримані характеристики розподілу у просторі і часі тиску, температури, швидкості, теплового потоку для різних середовищ використовуються у практиці проектування пристроїв розрядно-імпульсної техніки.

Електричні розряди в імпульсних електротехнічних системах з нагромаджувачами енергії різних типів. На теперішній час найпоширенішого застосування в імпульсних технологіях набули імпульсні джерела енергії з ємнісними нагромаджувачами. Розрахунки характеристик розрядів у таких системах наведені у роботах [15, 20, 32]. Такі джерела імпульсної енергії є достатньо надійними і здебільшого задовольняють вимоги технологічних процесів, генеруючи імпульси з рівнями енергії до кількох сотень кілоджоулів у мілі- та мікросекундному діапазонах. Однак їх недоліком є невисока питома енергія ємнісних нагромаджувачів ($10^3 \dots 10^4$ Дж·м⁻³). Крім того, ціла низка перспективних розрядно-імпульсних технологій пов'язана із збільшенням енергії, що нагромаджується, потужності розряду та зі скороченням тривалості імпульсів. У цих випадках необхідне застосування інших принципів нагромадження енергії та режимів введення енергії у міжелектродний проміжок. У зв'язку з цим у роботах [15, 16] проаналізовано характеристики електричного розряду в імпульсних джерелах з індуктивними нагромаджувачами енергії, зокрема з конструкцією імпульсного джерела зі змінною індуктивністю та частковою рекуперацією енергії, витраченої у комутаторі, у розрядний контур [7, 39]. Системи індуктивних нагромаджувачів з живленням від ударних уніполярних генераторів та двоступеневою комутацією струму моделювали у роботах [13, 14, 40] як компактні джерела, що мають на один–два порядки більшу питому енергоємність (10^5 – 10^6 Дж·м⁻³) та забезпечують введення енергії у плазму на мегаджоульному рівні.

Моделювання зарядних пристроїв імпульсних електротехнічних систем. Методи моделювання зарядних пристроїв різних типів (з випрямленням на стороні високої та низької напруги, з дозованим введенням енергії, з обмеженням струму активними та реактивними елементами, резонансних) знайшли широке застосування у проектуванні ІЕТС [27, 31, 35]. Із впровадженням у промисловість напівпровідникових приладів великої потужності (біполярних транзисторів з ізольованим затвором (IGBT) та польових транзисторів типу MOSFET) робочі частоти зарядних пристроїв, створених на основі інверторів резонансного типу, зросли до десятків та сотень тисяч герц. Це дозволяє істотно зменшити габарити та масу зарядних пристроїв, що особливо важливо для компактних систем. Однак при цьому кількість зарядних циклів при великих ємностях та напругах нагромаджувачів досягають значень 10^5 – 10^7 . У таких випадках застосування "наскрізних" методів розрахунку перехідних процесів упродовж усього інтервалу заряджання часто виявляється неприпустимим через великі витрати часу на варіантні обчислення та нагромадження під час помилок тривалих розрахунків. Нагромадження помилок зумовлено похибками скінченно-різницевої апроксимації диференціальних рівнянь математичних моделей зарядних пристроїв та наближеним уявленням чисел у пам'яті електронно-обчислювальних машин. У роботах [10, 17] наведено спеціалізований метод числового моделювання зарядних пристроїв з перетворенням частоти, для яких тривалість надперехідних процесів, спричинених підмиканням схеми зарядного пристрою на нагромаджувач з ненульовою напругою, є величиною, якою можна знехтувати

порівняно з тривалістю заряджання. Порівняння результатів моделювання з експериментальними дослідженнями зарядних пристроїв та результати використання зазначеного підходу під час розроблення зарядних пристроїв компактних розрядно-імпульсних установок для технологій відновлення продуктивності нафтових та водозабірних свердловин свідчать про ефективність такого підходу.

У роботах [11, 12, 42] розглянуто важливий випадок проектування компактних ІЕТС, коли для підвищення питомих характеристик їх розрядні контури та зарядні пристрої виконано на різних каркасах, а електрично вони є підімкненими за допомогою кабелю. За умови великої відстані між зарядним пристроєм та розрядним контуром (у кілька кілометрів), що характерно для свердловинних установок, заряджання нагромаджувача відбувається через довгу лінію, значення якої виконує кабель. Розподілені параметри довгої лінії істотно впливають на заряджання нагромаджувача і, насамперед, на значення напруги та енергії, що запасасться у ньому. Моделювання процесів заряджання ємнісних нагромаджувачів через довгу лінію дозволило розробити обґрунтовану методику вибору параметрів зарядних пристроїв залежно від її довжини.

Числовий аналіз надійності ізоляції високовольтних пристроїв імпульсних електротехнічних систем. Під час розроблення компактних високовольтних імпульсних систем потрібно враховувати збільшені значення напруженості електричного поля та посилену нерівномірність її розподілу в елементах конструкцій. При цьому проблема забезпечення ізоляції високовольтних пристроїв імпульсних систем набуває більшої ваги. У цьому разі виникає необхідність в обґрунтованих методиках розрахунків характеристик електричної ізоляції та пробою [24, 28, 37]. Імовірність пробою ізоляції є важливою характеристикою високовольтних пристроїв, тому що саме вона дає змогу кількісно визначити надійність їх роботи. За її залежністю від напруги визначається електрична міцність ізоляції, значення напруги пробою та розкиди пробивних напруг [36]. У роботах [9, 41] розглянуто узагальнений числовий підхід, що дозволяє кількісно визначити імовірність пробою з урахуванням комплексу факторів, які впливають на пробій, а саме: нерівномірність розподілу електричного поля в об'ємі ізоляції, шорсткість робочої поверхні електродів та матеріал, з якого вони виготовлені, склад і тиск робочого газу, швидкість зміни напруги. Методику використано для визначення характеристик пробою високовольтних комутаторів та надійності ізоляції пристроїв високовольтних систем. У роботі [43] урахувано також вплив автоелектронної емісії на пробій газової ізоляції при високих напругах. Напрацьовані теоретичні результати також використовували для мінімізації втрат енергії на пробій електричного розряду у воді з підвищеною питомою електропровідністю в спеціально розробленій електродній системі [45].

Моделювання характеристик вакуумної ізоляції наведено у роботах [6, 34] з урахуванням нерівномірного розподілу характеристик електричного поля та шорсткості високопотенційних поверхней високовольтних пристроїв. Методику [6, 43] застосовано під час проектування субмега-вольтних генераторів імпульсних напруг, технічні принципи розробки яких наведено у публікації [23].

Моделювання систем управління компактних ІЕТС. Найближчі перспективи вдосконалення систем управління ІЕТС пов'язані, насамперед, з поступовим заміщенням релейних систем та систем на основі функціональних вузлів аналогової електроніки та цифрової логіки системами цифрового управління з поширеним застосуванням мікропроцесорної техніки та персональних ЕОМ [30, 46]. При цьому безперечні перспективи має застосування програмного забезпечення автоматизованого проектування електронних засобів (MicroCAP, OrCAD, Simulink та ін.) для моделювання роботи вузлів систем управління та програмних IDE-продуктів (Integrated Development Environment), призначених для моделювання, симуляції та тестування мікропроцесорних систем [46].

Висновок. Розглянуті моделі та отримані результати прийнято в основу інформаційної бази автоматизованого проектування компактних ІЕТС, яка постійно розширюється і вдосконалюється.

1. Автоматизация проектирования радиоэлектронных средств / Под ред. О.В. Алексеева. – М.: Высшая школа, 2000. – 479 с. 2. Вовк И.Т., Вовченко А.И., Мирошниченко Л.Н. Тенденции развития высоковольтного оборудования для электрогидроимпульсных технологий // Техн. електродинаміка. – 2002. – № 2. – С. 63–67. 3. Вовченко А.И. Кривицкий Е.В., Бондарец Л.М. Электрические характеристики подводного искрового разряда // Физические основы электрогидравлической обработки материалов. – К.: Наук. думка, 1978. – С. 14–25. 4. Гулый Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий. – К.: Наук. думка, 1990. – 208 с. 5. Дубовенко К.В. Взаимодействие ударных волн с плазмой канала сильноточного разряда в камере высокого давления // Журн. техн. физики. – 1992. – Т. 62. – № 6. – С. 83–93. 6. Дубовенко К.В. Влияние экранирования на электрическую прочность компактного субмегавольтного генератора импульсных напряжений с вакуумной изоляцией // Техн. електродинаміка. – 2000. – № 4. – С. 8–13. 7. А. с. СССР 1774473. МКИ Н03 К3/53. Генератор импульсных токов / К.В. Дубовенко. Оубл. в БИ. – 1991. – № 21. 8. Дубовенко К.В. Исследование влияния параметров разрядного контура на образование двухфазной зоны жидкость-пар при электрическом разряде в подогретой жидкости // Динамика сплошной среды. – 1995. – Вып. 110. – С. 106–110. 9. Дубовенко К.В. Моделювання імовірності пробоя газової ізоляції високовольтних пристроїв систем імпульсної електроенергетики // Техн. електродинаміка. – 2006. – № 2. – С. 78–85. 10. Дубовенко К.В., Курашко Ю.И., Климанский Н.Н. Высоковольтный резонансный источник питания для разрядно-импульсных погружных скважинных установок // Техн. електродинаміка. – 2004. – № 6. – С. 52–55. 11. Дубовенко К.В., Курашко Ю.И. Особенности зарядки емкостного накопителя через длинную линию // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2000. – С. 77–86. 12. Дубовенко К.В., Курашко Ю.И., Швец И.С., Онищенко Л.И. Разрядно-импульсное оборудование для увеличения дебита нефтяных и водозаборных скважин // Вестн. нац. техн. ун-та “ХПИ”. – 2002. – Т. 1. – № 7. – С. 97–103. 13. Дубовенко К.В. Переходный процесс в плазменной нагрузке, включенной в разрядный контур с ударным униполярным генератором // Системы управления и генераторы импульсных токов электрогидравлических установок. – К.: Наук. думка, 1993. – С. 36–42. 14. Дубовенко К.В. Преобразование энергии ударного униполярного генератора в контуре с индуктивным накопителем и плазменной нагрузкой // Техническая электродинамика. – 1991. – № 5. – С. 25–30. 15. Дубовенко К.В. Расчет характеристик сильноточного разряда в контуре с индуктивно-емкостным накопителем энергии // Техническая электродинамика. – 1988. – № 6. – С. 51–56. 16. Дубовенко К.В. Сильноточный разряд в цилиндрической камере при питании от контура с индуктивно-емкостным накопителем энергии // Электронная обработка материалов. – 1990. – № 2. – С. 62–65. 17. Дубовенко К.В. Численный метод расчета переходных процессов в полупроводниковых преобразователях со звеном повышенной частоты // Матеріали міжвуз. наук.-практ. конф. “Науковий потенціал вищої школи”. – Миколаїв, 2005. – С. 213–219. 18. Ермаков В.В., Калиткин Н.Н. Таблицы проводимости и электронной теплопроводности плазмы 11 веществ. – М.: ВИНТИ, 1978. – 133 с. – Деп. рукопись № 2813-78деп. 19. Замышляев Б.В., Ступицкий Е.Л., Гузь А.Г. Состав и термодинамические функции плазмы. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 144 с. 20. Иванов А.В., Швец И.С., Иванов В.В. Подводные электрические разряды. – К.: Наук. думка, 1982. – 192 с. 21. Калиткин Н.Н., Кузьмина Л.В. Квантово-статистическое уравнение состояния смесей элементов. – М.: ВИНТИ, 1976. – 249 с. – Деп. рукопись № 1128-76деп. 22. Калиткин Н.Н., Кузьмина Л.В., Шарипджанов И.И. Построение уравнения состояний химических соединений. – М., 1976. – 64 с. – (Препр. / Ин-та прикладной математики АН СССР; № 43). 23. Ковальчук Б.М., Кремнев В.В. Генераторы Аркадьева-Маркса для сильноточных ускорителей // Физика и техника мощных импульсных систем. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – С. 165–179. 24. Королев Ю.Д., Месяц Г.А. Автоэмиссионные и взрывные процессы в газовом разряде. – Новосибирск: Наука, 1982. – 255 с. 25. Кривицкий Е.В. Динамика электровзрыва в жидкости. – К.: Наук. думка, 1986. – 205 с. 26. Кузнецов Н.М. Двухфазная смесь вода-пар. Уравнение состояния, скорость звука, изэнтропы // Докл. АН СССР. – 1987. – Т. 257. – № 4. – С. 858–860.

27. Кутковецкий В.Я. Формализация расчета процессов в вентильных цепях узловым методом переключающих функций // *Электричество*. – 1989. – № 5. – С. 72–74.

28. Лозанский Э.Д., Фирсов О.Б. Теория искры. – М.: Атомиздат, 1975. – 271 с.

29. Маламуд В.Г., Попов Ю.П., Шапиро В.М. Применение полностью консервативных разностных схем к расчету задач гидродинамики и магнитной гидродинамики. – 1970. – 33 с. (Препр. / Ин-та прикладной математики АН СССР).

30. Микроконтроллерное управление функциональными устройствами импульсных источников энергии / К.В. Дубовенко, П.А.Галивец, А.Н.Герасимова, А.А. Дубровская, В.В. Ткач // *Физика импульсных разрядов в конденсированных средах: Материалы XII Междунар. школы-семинара*. – Николаев: КП НОТ, 2005. – С. 119–121.

31. Пентегов И.В. Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии. – К.: Наук.думка, 1982. – 421 с.

32. Романов Г.С., Сметанников А.С. Численное моделирование слоистого импульсного разряда с учетом переноса энергии излучением // *Журн. техн. физики*. – 1982. – Т. 52, № 9. – С. 1756–1762.

33. Самарский А.А., Попов Ю. П. Разностные методы решения задач газовой динамики. – М.: Наука, 1980. – 351 с.

34. Сливков И.Н. Процессы при высоком напряжении в вакууме. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.

35. Турти М.В., Мірошниченко Л.В. Автоматизація проектування вторинних джерел електроживлення електроімпульсних технологій // *Зб. наук. праць Всеукраїнської наук.-техн. конф. “Проблеми автоматики та електрообладнання транспортних засобів” (ПАЕТЗ-2005)*. Ч. 2. – Миколаїв: ІАЕ НУК, 2005. – С. 187–194.

36. Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения / М. Бейер, В. Бек, В. Цаенгль. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 555 с.

37. Ушаков В.Я. Импульсный электрический пробой жидкостей. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 1975. – 256 с.

38. Шамко В.В. Нестационарные течения при электрическом разряде в подогретой жидкости // *Теория, эксперимент, практика электроразрядных технологий*. – 1995. – Вып. 2. – С. 82–86.

39. Dubovenko K.V. Improvement of Power Conditioning for a Pulsed Plasma Source Applying the Storage Inductor of Variable Inductance // *Pulsed Power Plasma Science 2001. Digest of Technical Papers*. – Las Vegas, Nevada, USA. – 2001. – P. 1477–1480.

40. Dubovenko K.V., Chemerys V.T. Performance Simulation of Pulsed Power Supply System for Electrothermal Launcher // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 1999. – Vol.35. – № 1. – P. 328–333.

41. Dubovenko K.V., Kurashko Yu.I. The Design, Fabrication and Testing of a Closing Switch for Compact Electrical Discharge Industrial Equipment // *11th IEEE Intl Pulsed Power Conf. Digest of Technical Papers / Editors G. Cooperstein and I. Vitkovitsky*. – Baltimore, Maryland, USA. – P. 868–874.

42. Dubovenko K.V., Kurashko Yu.I., Shvets I.S., et al. Equipment Developed at IPRE for Well Stimulation in the Process of Oil and Water Production // *Item*. – P. 1070–1073.

43. Dubovenko K.V. Numerical Analysis of Compact Marx Generator Gaseous Insulation Reliability / *Proc. 1st Intl Congress on Radiation Physics, High Current Electronics and Modification of Materials*. Editors G. Mesyats, B. Kovalchuk and G. Remnev. – Tomsk, 2000. – P. 320–323.

44. Vovchenko A., Shvets I., Dubovenko K. et al. Developments of Pulsed Power Industrial Applications at the Institute of Pulse Research and Engineering // *Pulsed Power Plasma Science 2001. Digest of Technical Papers. IEEE Catalog Number 01CH37251*. – Las Vegas, Nevada, USA. – 2001. – P. 1066–1069.

45. Vovk I.T., Dubovenko K.V. A New Electrode Unit for Operation in Liquids with High Specific Conductivity // *11th IEEE Intl Pulsed Power Conf. Digest of Technical Papers / Editors G. Cooperstein and I. Vitkovitsky*. – Baltimore, Maryland, USA. – P. 559–565.

46. <http://www.microchip.com>.