

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
“ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ”**

БЕРШАДСЬКИЙ ІЛЛЯ АДОЛЬФОВИЧ

УДК 622.8 : 621.316.9

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ І МЕТОДІВ СТВОРЕННЯ
ІСКРОБЕЗПЕЧНОГО ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ
ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ПРАЦІ ГІРНИКІВ**

Спеціальність 05.26.01 - Охорона праці

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Донецьк - 2014

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: **Ковальов Олександр Петрович**, доктор технічних наук, професор, професор кафедри електропостачання промислових підприємств і міст, ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Донецьк

Офіційні опоненти: **Коптіков Віктор Павлович**, доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України, заступник директора з наукової праці Державного Макіївського науково-дослідного інституту з безпеки робіт у гірничій промисловості (МакНДІ), м. Макіївка;

Дзюбан Віталій Серафимович, доктор технічних наук, професор, перший заступник директора по роботі з електротехнічними підприємствами ЗАТ «Донецьксталь - металургійний завод», м. Донецьк;

Шкрабець Федір Павлович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри поновлюваних джерел енергії, ДВНЗ «Національний гірничий університет», м. Дніпропетровськ

Захист відбудеться «13» лютого 2014 р. о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 11.052.05 при ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» за адресою: 83001, м. Донецьк, вул. Артема, 58, 1-й навчальний корпус, ауд. 1.203.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» за адресою: 83001, м. Донецьк, вул. Артема, 58, 2-й навчальний корпус.

Автореферат розісланий «21» грудня 2013 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 11.052.05
д.т.н., проф.



В.П. Кондрахін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасні підприємства гірничодобувної, нафтогазової, хімічної, фармацевтичної промисловостей характеризуються наявністю постійної, або тієї, що з'являється в результаті аварійних ситуацій вибухонебезпечної виробничої атмосфери, зумовленої виділенням горючих газів, пари і токсичних речовин.

За результатами аналізу, виконаного в МакНДІ, на вугільних шахтах України з 1976 по 2008 р відбулося 124 вибуху метану, в результаті яких загинуло понад 3400 чоловік. При цьому електрострум був джерелом підпалювання в 47,88% випадків, з них 52,54% вибухів сталося при порушенні вибухозахисту вибухобезпечного електрообладнання, а інші вибухи пов'язані з ушкодженнями в кабелях.

Разом з тим за результатами розслідувань аварій на шахтах не виявлено вибухів від електрообладнання з видом вибухозахисту «іскробезпечне електричне коло» (ІБК) у зазначених умовах навіть при виконанні робіт без зняття напруги, тобто забезпечувався рівень вибухозахисту РО.

ІБК набуває все більшого поширення в автоматизованому управлінні технологічними процесами (АСУТП), контрольно-вимірювальній апаратурі, колах керування видобувними шахтними комбайнами, системах провітрювання шахт, схемах живлення енергозберігаючих світильників, колах газового захисту та ін. Як технічна міра з використанням ІБК реалізуються засоби діагностики справного стану та індикації несправностей пускової, захисної апаратури та апаратури управління, які складають причину 33% вибухів від електроструму при недотриманні вимог до робочих режимів електрообладнання, зумовленому людським фактором (відкриті кришки або вводи).

Висока трудомісткість розробки іскробезпечного електрообладнання пов'язана з великою тривалістю експериментальних випробувань, які проводяться за допомогою вибухових камер (ВК) і складають в даний час основу оцінки іскробезпеки електричних кіл в Україні, Росії та інших країнах Європи. Даний метод характеризується низькою стабільністю результатів, значним обсягом підготовчих процедур для уникнення травматизму при роботі з вибухонебезпечними газами, а також необхідністю наявності готових виробів і макетів.

6-а редакція МЕК 60079-11 (ДСТУ ІЕС 60079-11:201 _) наводить випадки неповної відповідності стандартних іскроутворюючих механізмів для проведення випробувань іскробезпеки джерел живлення з штучним скороченням тривалості розряду («випереджальний» захист) або із захистом, що шунтує коло. На практиці були виявлені випадки, коли після випробувань на іскробезпеку джерела живлення в агресивній суміші з коефіцієнтом безпеки $SF_x = 1,5$ не забезпечувалася ймовірність займання $1,16 \cdot 10^{-6}$ в нормальних умовах. Це пояснюється тим, що джерело живлення з динамічним іскрозахистом допускає вимкнений стан в період найбільш небезпечних умов випробувальних іскрінь із застосуванням зазначеного іскроутворюючого механізму.

До теперішнього часу не створена досить повна і несуперечлива теорія процесу електричного запалювання вибухонебезпечних газових сумішей. Відсутні достовірні безкамерні методи оцінки іскробезпеки складних електричних кіл

з динамічно змінюючимися параметрами, які переважають в сучасному електрообладнанні і не можуть бути попередньо оцінені на іскробезпеку за існуючими методами і характеристиками з ДСТ.

Також, крім завдання «сертифікації», необхідність розрахункової оцінки ІБК виникає на стадії проектування та опрацювання оптимальних рішень концепцій іскробезпеки, що дозволяє зробити їх загальнодоступними для розробників іскробезпечного електрообладнання. Згідно з даними МакНДІ кількість приладів, які не пройшли випробувань по галузі за рік може бути знижено у 4 рази (з 63 до 19), а витрати на доопрацювання виробів в 3 рази (з 16 тис. грн. до 5,4 тис. грн.).

Розрахунковий безкамерний метод дозволяє здійснювати попередню оцінку ІБК і вибирати їх оптимальні параметри завдяки тому, що в порівнянні з камерними випробуваннями визначається кількісна величина запасу з потужності.

Тому встановлення нових аналітичних залежностей процесу займання вибухонебезпечної газоповітряної суміші в динамічних режимах електричних кіл зі скороченою тривалістю розряду, які зустрічають значні труднощі при випробуваннях у вибухових камерах, а також обґрунтування принципів побудови іскробезпечних систем з новими, більш чутливими пороговими елементами, систем імпульсної дії і систем з підвищеною частотою синусоїдального струму і виявлення параметрів їх ефективного використання в порівнянні з аналогічними системами постійного струму є дуже актуальними науковими проблемами, а їх рішення сприяє підвищенню надійності розробки, а також безпеки електрообладнання з ІБК і скорочує обсяг держконтрольних випробувань також пов'язаних з небезпекою для людини.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. До дисертаційної роботи увійшли результати досліджень, які виконані під науковим керівництвом і за безпосередньою участю автора, згідно з тематичними планами науково-дослідних робіт Донецького національного технічного університету на 2005-2013 роки. До них належать держбюджетні теми Н 30-05 «Підвищення ефективності електроспоживання, живучості систем електропостачання промислових підприємств і безпеки технологічних об'єктів при їх експлуатації» (керівник розділу, відповідальний виконавець НДР) та Н-21-10 «Прогнозування іскробезпечних параметрів електричних кіл вибухозахищеного обладнання, імовірності виникнення вибухів, пожеж у квартирах і розробка заходів щодо їх запобігання» (керівник розділів, відповідальний виконавець НДР, державний реєстраційний № 0101U007239).

Тематика і рівень розробок відповідає документу «Програма підвищення безпеки праці на вугледобувних та шахтобудівних підприємствах», затверджену постановою Кабінету Міністрів України від 29.03.2006 р. № 374. Здобувач брав участь як відповідальний виконавець і розробник тексту нормативного документа «Методика розрахункової оцінки іскробезпеки слабкострумівих кіл постійного струму, схем і блоків іскрозахисту рудникового електрообладнання», підготовленого згідно з заявкою Державного Макіївського науково-дослідного інституту з безпеки робіт у гірничій промисловості (МакНДІ) (договір про науково-технічне співробітництво з ДонНТУ № 9146-І) і ЗАТ «Донецька інжинірингова група».

Мета роботи: розвиток теорії процесу формування теплового займання метано-повітряної суміші стосовно слабкострумівих іскробезпечних кіл елект-

рообладнання, розробка методів їх випробувань та обґрунтування технічних рішень щодо вдосконалення вибухозахисту, що дозволяє на етапі проектування з необхідною точністю, найменшими витратами і в найкоротші терміни встановити вимоги з безпеки до зазначеного обладнання.

У відповідності до мети роботи були поставлені такі **основні задачі досліджень**:

- отримати залежності електричних і теплових властивостей дугового розряду від параметрів кола і перехідного процесу в ньому, враховуючи інерційні властивості плазми з адаптацією за струмом;

- розвинути теорію теплового вибуху стосовно слабкострумівих електричних іскробезпечних кіл з метою розробки нового принципу безкамерної оцінки іскробезпеки за розрахунком температурного фронту полум'я;

- визначити мінімальні запалюючі параметри електричного розряду, які дозволили б отримати вихідні дані для розробки методів оцінки небезпеки електричного іскріння при комутації слабкострумівих кіл рудникового електрообладнання; розробити наукові положення, що дозволяють визначати мінімальну енергію займання з можливістю обліку широкого діапазону змін геометричної форми і матеріалу контактів іскроутворюючого механізму;

- встановити закономірності виділення енергії в розряд і зробити висновок про безпечний стан електричної системи джерел живлення з швидкодіючим іскрозахистом при найбільш небезпечних умовах комутації;

- встановити принципи, а також отримати вихідні дані і апроксимуючі залежності для безкамерної оцінки ємнісно-індуктивних електричних кіл на основі їх схем заміщення;

- дослідити принципи побудови ІБ систем імпульсної дії і підвищеної частоти синусоїдального струму і виявити область їх ефективної роботи в порівнянні з аналогічними системами постійного струму з шунтуванням.

Об'єкт дослідження: процеси виділення електричним колом складної конфігурації енергії в розряд з урахуванням впливу параметрів іскроутворюючого механізму; запалювання і запобігання запалюванню вибухонебезпечної газової суміші електричними розрядами різної енергії і тривалості; іскрозахисні електронні елементи, які забезпечують підвищення іскробезпеки кола при комутації і перевантаженнях.

Предмет дослідження: вплив параметрів розряду, режимів комутації електричних кіл на запалювальну здатність газоповітряної вибухонебезпечної суміші і прогнозування рівня небезпеки електричного іскріння в тестовому колі (безкамерна оцінка іскробезпеки).

Методи дослідження. При вирішенні поставлених задач у роботі використовувалися теоретичні та експериментальні методи, зокрема: теплової теорії горіння і вибуху, теорії тепло- і масопереносу, основ електротехніки та електроніки, чисельного рішення нелінійних диференціальних рівнянь, параболічних диференціальних рівнянь в приватних похідних 1 і 2-х вимірної постановки, математичного комп'ютерного моделювання та аналітичних перетворень, активних фізичних експериментів з осцилографування параметрів розряду в електричних колах, обробки результатів експериментальних даних.

Похибка результатів розрахунків з урахуванням прийнятих припущень не перевищує 16% при визначенні запалюючих струмів. Порівняння розрахункових результатів проводилося з міжнародними стандартами, з ГОСТ, з експериментами по окремим видам складних кіл, з протоколами випробувань і сертифікатів

відповідності нормам з охорони праці та промислової безпеки готових виробів, виданих Державним випробувальним сертифікаційним центром вибухозахищеного та рудникового електрообладнання УкрНДІВЕ, Акредитованим випробувальним центром МакНДІ.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в комплексному теоретичному обґрунтуванні умов теплового запалювання вибухонебезпечних сумішей електричними розрядами і встановленні закономірностей появи небезпечних факторів, що викликають займання метано-повітряної суміші (МПС) від електричного розряду в іскробезпечних колах рудникового вибухозахищеного електрообладнання, а також ефективності способів їх подавлення.

Основні наукові положення і результати, їх новизна:

1. Вперше обґрунтований і розроблений розрахунковий метод «безкамерної теплової оцінки» іскробезпеки електричних кіл усуває недолік випробувань динамічно працюючих джерел іскробезпечного живлення, пов'язаний із зниженою, в деяких випадках, достовірністю отримання найбільш небезпечного режиму комутації на стандартних іскроутворюючих механізмах і, відповідно, недостатній рівень надійності зазначених випробувань, що забезпечують безпечні умови ведення гірничих робіт.

2. Вперше встановлене не менше ніж 6 кратне, адаптоване до струму перехідного процесу, зростання теплової постійної часу плазми розряду при розмиканні ІБ електричного кола. Зазначена залежність забезпечує задану надійність електрообладнання з видом захисту ІБК при визначенні розрахункових мінімальних запалюючих струмів, виключаючи їх завищення до 52%.

3. В області тривалостей розряду менше 40 мкс для найбільш небезпечної швидкості розмикання 6,5 м/с індуктивних кіл запалююча енергія розряду зростає при скороченні його тривалості. Урахування цього явища дозволяє підвищити припустиму потужність ІБ джерел живлення, що забезпечує безпеку умов праці при експлуатації електрообладнання, з видом вибухозахисту «іскробезпечне електричне коло».

4. Складне електричне коло, що містить ємнісні і індуктивно-ємнісні елементи оцінюється на іскробезпеку за розрядами замикання при сталості напруги на ньому і використанні функціонального зв'язку запалюючої енергії розряду від його тривалості і напруги на ємності.

5. В іскробезпечних джерелах живлення постійного струму з «ізолюючим» захистом і сприймаючим елементом, виконаним у вигляді 2-х порогового компаратора замість дроселю, тривалість розряду скорочується в 3 рази, а припустима підключаєма індуктивність збільшується в 2,5 рази за умови однакової уставки струму захисту джерела від короткого замикання на його виході.

6. Найнебезпечніша швидкість розмикання індуктивного кола при визначенні її максимально припустимого значення в ІБ електричній системі, яка містить комбінацію джерел живлення з нелінійною навантажувальною характеристикою може знижуватися до 0,046 м/с на відміну від прийнятої для кола з лінійною навантажувальною характеристикою - 6,5 м/с.

Практичне значення одержаних результатів полягає в створенні методів, які дозволяють на етапі проектування надійно розрахувати параметри іскробезпечних кіл, знизити обсяги сертифікаційних випробувань та їх трудомісткість, забезпечуючи при цьому нормований рівень іскробезпечних параметрів електричних кіл згідно НПАОП 10.0-1.01-10 "Правила безпеки у вугільних шахтах", ГОСТ 22782.5 і ІЕС 60079-11, в реалізації пропозицій і технічних рішень щодо підвищення ефективності діючої іскробезпечної апаратури (джерела жив-

лення постійного струму з пороговими елементами у вигляді компараторів, блоки іскрозахисту світильників іскробезпечних і сигналізаторів метану, електрично пов'язані системи з комбінацією нелінійних навантажувальних характеристик джерел); у розробці нормативного документа «Методика розрахункової оцінки іскробезпеки слабкострумових кіл постійного струму, схем і блоків іскрозахисту рудникового обладнання», галуззю застосування якого є безкамерна оцінка іскробезпеки вибухозахищеного електрообладнання при його проектуванні, розробці та випробуваннях.

Використання результатів роботи.

1. Результати досліджень лягли в основу нормативного галузевого документа: «Методика розрахункової оцінки іскробезпеки слабкострумових кіл постійного струму, схем і блоків іскрозахисту рудникового обладнання» (2013 р.), розробленому за погодженням ДВНЗ «ДонНТУ» та Державним Макіївським науково-дослідним інститутом з безпеки робіт у гірничій промисловості (МакНДІ).

2. Достовірні, захищені патентами методи безкамерної оцінки і прогнозування іскробезпеки електричних кіл складної конфігурації використовуються в спеціалізованому конструкторському бюро НВО «Світло шахтаря» і ЗАТ «Донецька інжинірингова група» при виборі оптимальних за швидкістю та допустимою потужністю параметрів розроблюваного іскробезпечного електрообладнання шляхом порівняння можливих схемних рішень.

3. Методики оцінки іскробезпеки електричних кіл і кіл пов'язаного електрообладнання, яке експлуатується у вибухонебезпечних зонах і програмні продукти застосовуються у випробувальному сертифікаційному центрі вибухозахищеного електрообладнання УкрНДІВЕ і акредитованому випробувальному центрі МакНДІ для попередньої оцінки іскробезпеки електричних кіл і вибору найбільш небезпечних випробувальних режимів перевірки у вибухових камерах.

4. Технічні рішення з обмеження енергії іскріння кіл з індуктивними навантаженнями використані для створення двох серій іскробезпечних джерел живлення постійного струму підвищеної потужності ПП-12 і ПП-24 (8 модифікацій) з блоком іскрозахисту, який вимикається при перевищенні значення модуля похідної струму. Блоки живлення випускаються ЗАТ «ДІГ» (м. Донецьк) і ТОВ «Феррол» (м. Воронеж).

5. Рекомендації, спрямовані на підвищення чутливості блоку іскрозахисту шахтних головних акумуляторних світильників, реалізовані в блоках іскрозахисту серійних виробів БІЗ-2 і БІЗ-4, що входять до складу світильників вибухобезпечних СВГ5, СВГ6 і сигналізаторів метану СМС5М3. Зазначені вироби випускаються НВО «Світло шахтаря».

Особистий внесок автора в роботу, опубліковані в співавторстві полягає у формулюванні задач досліджень, ідеї роботи та її наукових положень; створенні методик, лабораторної установки і програмних продуктів для проведення наукових досліджень; систематизації та науковому аналізу отриманих результатів, розробці науково обґрунтованих технічних рішень: способу розрахункової оцінки іскробезпеки електричних кіл рудникового електрообладнання, іскробезпечного джерела живлення підвищеної вимикаючої здатності.

Усі результати при вирішенні поставлених у дисертації завдань виконані автором самостійно. У наукових працях, опублікованих у співавторстві автору належать: в роботах [1-7, 9-15, 21-23, 27] - основні ідеї, тобто аналіз і формування напрямків досліджень, розробка методів досліджень, аналітичні перетворення виразів, написання висновків і практичних рекомендацій; [26, 32] - постановка задачі досліджень, пропозиція способів обмеження виділеної енергії розряду в

коло; [30] - формула винаходу, порівняльний аналіз варіантів, визначення граничних параметрів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідалися та обговорювалися на VII-й Міжнародній конференції «Золота осінь» Донбаського регіонального відділення Міжнародної академії наук екології та безпеки життєдіяльності (МАНЕБ), 2007 рік; на Міжнародній науково-практичній конференції «Гірничорятувальна справа і сучасні проблеми гірничого виробництва», 2008 рік (м. Донецьк); на Міжнародній науково-технічній конференції «Автоматизація, технологія і якість в машинобудуванні», 2008 рік (м. Донецьк); на V-й та VI-й Міжнародних науково-технічних конференціях «Управління режимами роботи об'єктів електричних і електромеханічних систем» (КРЕС -2011, 2013 роки) (м. Святогірськ); на VI-й Міжнародній науково-практичній конференції «Донбас-2020. Перспективи розвитку очима молодих вчених », 2012 рік (м. Донецьк); на XI-й, XII-й науково-технічній конференції аспірантів «Автоматизація технологічних об'єктів і процесів. Пошук молодих», 2011, 2012 рік, (м. Донецьк); на Всеукраїнській науково-практичній конференції аспірантів та молодих вчених «Наукова весна-2012», ДВНЗ «Національний гірничий університет», 2012 рік (м. Дніпропетровськ); на Міжнародній науково-практичній конференції «Перспективні інновації в науці, освіті, виробництві і транспорті '2012» (м. Одеса); на XIX-й Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інноваційний потенціал української науки - XXI століття», 2013 (м. Запоріжжя); на вчених Радах ДонНТУ з конкурсних наукових проєктів (м. Донецьк), 2010, 2011 рік; у вигляді доповіді по роботі - на розширеному засіданні кафедри «Охорона праці та аерологія» ДонНТУ.

Публікації. Основний зміст дисертації викладено у 35 друкованих працях, з них - у 22 статтях, опублікованих у наукових журналах і збірниках, включених до переліку фахових видань України і Росії, у наукометричних базах SCOPUS і РІНЦ, у 3 патентах, у 6 збірках праць конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу і 6 розділів, загальних висновків і містить загальний обсяг 343 сторінки, з них 271 сторінка основного тексту, 38 сторінок додатків, 51 таблиця, 100 рисунків.

Автор висловлює щире подяку д.т.н., проф. О.П. Ковальову за багаторічну підтримку та увагу до отриманих у роботі результатів.

Також автор висловлює глибоку подяку д.т.н. З.М. Іохельсону за консультації при становленні проблеми та на протязі виконання дисертаційної роботи.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі «Обґрунтування необхідності вдосконалення безкамерних методів оцінки іскробезпеки електричних кіл» відзначено, що за результатами розслідування аварій на промислових об'єктах не виявлено вибухів від іскробезпечних кіл систем керування, контролю, сигналізації, зв'язку, автоматики, тому, з огляду на те, що постійно збільшується обсяг електрообладнання у іскробезпечному виконанні, зростає необхідність робіт з розширення сфери його застосування.

Створення і впровадження в промисловість такого електрообладнання нині ускладнено недостатньою вивченістю теорії процесу запалювання вибухонебезпечних газових сумішей у слабкострумівих колах.

В Україні, Росії та інших країнах основу оцінки іскробезпеки (ІБ) електричних кіл становлять експериментальні випробування за допомогою вибухових камер.

Особливості експериментального методу оцінки іскробезпеки за допомогою вибухових камер дозволяють визначити його недоліки: висока трудомісткість і тривалість випробувань; низька стабільність і погана повторюваність результатів; велика кількість необхідних іспитових режимів; недоступність для широкого застосування в науково-дослідних інститутах і конструкторських бюро на стадії проектування і пророблення схемних рішень; складність забезпечення вірогідності камерних випробувань з погляду реалізації найнебезпечніших умов комутації.

Обґрунтована актуальність створення нового принципу конструювання і проведення сертифікаційних випробувань апаратури з видом вибухозахисту «іскробезпечне електричне коло». Його суть полягає в розробці високоточного способу розрахункової оцінки іскробезпеки кіл різних класів складної конфігурації, а також у використанні структурних безпечних елементів, таких як джерела живлення, лінії зв'язку і навантаження.

Показано стан технічних засобів забезпечення та існуючого наукового рівня методів оцінки, розробки і сертифікації іскробезпеки слабкострумових електричних кіл. Розглянуто внесок вчених Гаврильченко Л.І., Гаврильченка Л.А., Давидова В.В., Деміхова В.І., Діденка В.П., Єригіна О.Т., Залогіна О.С., Іванілова В.М., Іохельсона З.М., Кириченка Б.М., Ковальова П.Ф., Когана О.Г., Когана Е.Г., Колосюка А.В., Колосюка В.П., Комарова В.С., Коптікова В.П., Кравченка В.С., Красіка Я.Л., Лаппо П.В., Лахманова В.Ф., Мамченка С.В., Мнухіна А.Г., Неймана В.Б., Павлова Д.Д., Павлюченко Л.О., Паніна О.В., Петренка Б.А., Піроцького П.П., Погорельського А.Є., Свістельніка О.А., Серова В.І., Султановича А.І., Толченкіна Р.Ю., Трембицького А.Л., Фаєрштейна Л.Б., Федоренка Г.Л., Шатіло А.М., Яковлева В.П., М. Крамера, У. Герлаха, У. Йоханесмайєра та ін з УкрНДІВЕ, ДВНЗ ДонНТУ, ВАТ «Автоматгірмаш ім. В.А.Антипова» (м. Донецьк), МакНДІ (м. Макіївка), ДВНЗ НГУ (м. Дніпропетровськ), УкрНДІПБ (м. Київ), ІПКОН РАН, МДГУ (м. Москва), ІГД ім. О. О. Скочинського (м. Люберці), ВДУ (м. Володимир), ВАТ НЦ ВостНІІ (м. Кемерово), РТВ (Брауншвейзький фізико-технічний інститут, Німеччина).

Розглянуто теорії запалювання вибухонебезпечних газових сумішей електричними розрядами (електрична і теплова) і процеси протікання теплового вибуху, а також відомі аналітичні дослідження математичних моделей розігріву суміші і її осередкового запалювання.

Виявлено їхні основні недоліки, а саме: наближене лінійне урахування зміни коефіцієнта температуропровідності в різних областях теплового поля; недостатній діапазон небезпечних швидкостей розмикання іскроутворюючого механізму (ІУМ); спрощений підхід до визначення початкового радіуса джерела і температури розряду; відсутність порівняльного аналізу результатів з експериментальними даними і зв'язку отриманих результатів з розповсюдженими на практиці типами електричних кіл і параметрами ІУМ.

Проведено аналіз нормативної бази способів вибухозахисту, зокрема, заснованих на принципі обмеження потужності іскри. Визначені мета, задачі та сформульована науково-технічна проблема дослідження, яка полягає у розвитку наукових методів створення іскробезпечної апаратури на основі розкриття закономірностей виникнення теплового вибуху від електричного розряду, встанов-

ленні закономірностей процесу енерговиділення в розряд на межі запалювання газових сумішей, що дозволяє підвищити загальний рівень безпеки праці при роботі з електрообладнанням у вугільних шахтах.

У другому розділі «Принципи побудови моделей дугового розряду розмикання в аварійних режимах іскробезпеки електричних кіл» викладено аналітичний опис розряду розмикання в аварійних режимах слабкострумових електричних кіл. Наведено оцінку впливу втрат енергії в контакти ІУМ і часу небезпечного нагрівання електрода різних діаметрів при наростанні струму в режимі короткого замикання до моменту спрацьовування захисту.

Недоліки відомих раніше законів лінійної зміни в часі струму, напруги розряду і уточнених на їх основі нелінійних моделей розряду показані О.Т. Еригіним. Вони полягають у неможливості достовірної оцінки за ними динамічної вольт-амперної характеристики електричної дуги і необхідності обов'язкового використання експериментальної інформації для прогнозних розрахунків.

Проаналізовані основні види електричних розрядів, виникаючих при комутації в ІБК: дуговий, іскровий, тліючий і змішаний. Запалення вибухонебезпечної газової суміші розрядами, що мають місце при комутації індуктивних, омичних, а також ряду змішаних кіл, що не містять зосереджену ємність, визначається їхньою дуговою стадією.

З метою вдосконалювання розрахункових схем заміщення електричного розряду пропонуються математичні моделі дуги у вигляді «чорної скриньки» (ЧСК). Ідея моделювання полягає в описі іскрового (дугового) розряду як нелінійного компонента, провідністю якого управляє звичайне диференціальне рівняння (ЗДР) за допомогою віртуальної ЧСК у вигляді закритої форми, редукованні ЗДР до алгебраїчного і рішенні останнього за допомогою кодів (solvers) пакетів схемотехнічного моделювання. Провідність дуги передбачається не постійною і пов'язаною з її теплоємністю.

Загальною рисою розглянутих математичних моделей є можливість виразити постійну часу і охолоджуючу потужність як певні функції провідності дуги g або її струму i .

Відокремлені три підмоделі дуги у вигляді ЧСК, які в подальшому використовуються при розрахунках процесу запалювання газової суміші в електричних колах різної частоти і форми напруги джерела живлення (табл. 1).

Таблиця 1- Моделі слабкострумової дуги у вигляді ЧСК для оцінки іскробезпечних параметрів електричних кіл

Тип моделі	Особливості параметрів моделі
	<i>Змінний струм</i>
model0_v	$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau(g)} \left(\frac{gu^2}{P_{out}(g)} - 1 \right) \text{c } P_{out} = P_d \cdot 2\pi f \tau(g)$
model1_v	$\frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\tau(g)} \left(\frac{ui - P_{out}(g)}{u_0^2 g} - 1 \right) \text{c } P_{out} = P_d \cdot 2\pi f \tau(g)$
	<i>Постійний струм</i>
model_3	$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau(g)} \left(\frac{gu^2}{P_{out}(g)} - 1 \right) \text{c } P_{out} = P_d$

де P_{out} - потужність, що відводиться від дуги при її живленні змінним струмом; P_d - те ж саме для статичного режиму горіння дуги; τ - постійна часу

дуги, необхідна для того, щоб провідність дуги змінилася в e раз; u_0 - напруга дуги в сталому стані; t - час руху контактів; f - частота мережі; u, i - миттєве значення напруги і струму дугового розряду.

На основі теоретичних і експериментальних робіт сформувався уявлення про те, що в стовпі дуги високого тиску з досить гарним наближенням реалізується стан термічної плазми і дуговий розряд, як розігрійтий обсяг газу, власне кажучи являє собою накопичувач теплової енергії, для якого справедливий закон теплової інерції.

У сталому режимі існує енергетичний баланс дуги: $E_{д.сп} i_d - P_0 = 0$ ($E_{д.сп}$ - усереднене значення напруженості поля в стовпі і анодній області дуги), а в несталому режимі $E_{д.сп} i_d - P_0 > < 0$, де P_0 - потужність, що відводить від себе одиниця довжини дуги.

При малих струмах (від 0,02 А до 5 А) у випадку відкритої дуги справедливим є припущення $P_0 = \text{const}$. Тоді опір одиниці довжини дуги по Майру: $R_0 = k \cdot e^{-Q/Q_0}$ (де k - постійна, яка характеризує початковий опір дуги до моменту розмикання кола; Q_0 - кількість теплоти в одиниці довжини дуги (Q), при внесенні (видаленні) якої опір дуги змінюється в e раз). Рівняння Майра:

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{Q_0}{R_0} \cdot \frac{dR_0}{dt} = E_{д.сп} i_d - P_0. \quad (1)$$

Для рішення (1) необхідно мати ще одне рівняння, яке дає зв'язок параметрів електричного кола з дугою. Якщо задається закон зміни струму дугового розряду в часі $i = f(t)$, $E_{д.сп} = R_0 f(t)$, то після ряду перетворень, переходячи від питомих величин на одиницю довжини дуги до її повної довжини l_d (міжконтактному проміжку):

$$\begin{cases} \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\tau} \cdot \left(\frac{gu^2}{P_p} - 1 \right), \\ i_d = gu_d \end{cases} \quad (2)$$

де $P_d = P_0 \cdot l_d$.

P_d може бути представлена спрощено з використанням статичної вольт-амперної характеристики дугового розряду $u_d = u_k + \left(ad + \frac{bd}{i_d} \right) vt$ у вигляді:

$$P_d = \left[u_k + E_{д.сп} (i_d) l_d \right] i_d = i_d (u_k + ad \cdot v \cdot t) + bd \cdot v \cdot t \quad (3)$$

де u_k - мінімальне значення катодного спадання напруги; для катода, виготовленого з кадмію, $u_k = 8$ В; v - швидкість розмикання контактів, м/с; ad, bd - коефіцієнти, що характеризують умови одержання характеристик для обмежених діапазонів початкового струму дугового розряду: $ad = 82,81$ В/мм, $bd = 2,42$ В·А/мм при $i = 0,024 \dots 0,1$ А і $ad = 43,89$ В/мм, $bd = 5,18$ В·А/мм при $i = 0,05 \dots 2 \dots 2$ А.

τ залежить від струму розряду і радіуса стовпа. Якщо обмежитися температурами, що не перевищують 10000 К (слабкострумові кола), можна викорис-

тати одночленну ступеневу апроксимацію теплових функцій дуги, наведену для повітря при атмосферному тиску¹.

$$\tau = \frac{r_0^2 \cdot D_b \cdot (2\pi r_0 \sqrt{B_p})^{\frac{2(1-b)}{p+1}}}{i^{\frac{2(1-b)}{p+1}}}, \quad (4)$$

де r_0 – розрахунковий радіус стовпа дуги, см; коефіцієнти $B_p = 1,76 \cdot 10^{-7}$, $b = 0,25$, $D_b = 0,18$, $p = 3,5$.

Розроблено блок розмикання електричного кола для прогнозування іскробезпеки електричних кіл рудникового електрообладнання (рис.1) на прикладі прикладного програмного забезпечення Simulink Matlab 6.5.

Між виходом вимірника напруги і входом керованого джерела струму включена Simulink модель передаткової функції у вигляді математичного запису системи - блок DEE.

$$\begin{cases} \frac{d \ln g}{dt} = \frac{u(2)}{\tau} \cdot \left(\frac{gu(1)^2}{P_d} - 1 \right), \\ i_d = gu_d \end{cases}, \quad \begin{cases} \frac{dx(1)}{dt} = \frac{u(2)}{\tau} \cdot \left(\frac{e^{x(1)} u(1)^2}{P_d} - 1 \right), \\ y = e^{x(1)} u(1) \end{cases}, \quad (5)$$

де $u(1)$ – перший вхід DEE блоку, на який подається напруга дуги u_d ; $u(2)$ – другий вхід, що визначає логіку розмикання кола: $u(2) = 0$ при замкнутому контакті і $u(2) = 1$ на початку дугового розмикання контакту; $u(3)$ – третій вхід, зворотний зв'язок за струмом дуги i_d , використовується для обчислення P_d за формулою (3); $u(4)$ – четвертий вхід, на який подається модельний час t ; $u(5)$ – п'ятий вхід, на який подається постійна часу дуги τ відповідно до формули (4); $x(1)$ – змінна стану диференціального рівняння - $\ln(g)$; y – вихід блоку DEE, що дорівнює струму дуги i_d ; P_d – параметр дуги, виражений через формулу (4); τ - допоміжний вихід блоку розмикання електричного кола, слугує для реєстрації постійної часу дуги.

При замкнутому контакті вирішується диференціальне рівняння $d \ln g / dt = 0$.

Гнучкі зворотні зв'язки за струмом і напругою дугового розряду дозволили автоматично адаптувати постійну часу τ і потужність P_d , що відводиться від дуги, до комутаційного процесу, тобто врахувати їхню залежність як від параметрів електричного кола, так і від часового чинника.

Для визначення початкових параметрів дугового розряду застосовано модифікований "метод джерел", який допускає, що теплофізичні параметри газу приймаються постійними. До них належать λ , c , ρ , a - коефіцієнт теплопровідності [Вт/(мм*К)], питома теплоємність газу [Дж/(кг*К)], щільність газу [кг/мм³],

$a = \frac{\lambda}{c\rho}$ [мм²/с] коефіцієнт температуропровідності. Пошук температури, яка від-

повідає розрахунковому стану газу, здійснюється ітераційним методом.

¹ Використання характеристик повітря замість 8,5% метано-повітряної суміші створює незначний запас у бік зменшення запалюючих струмів

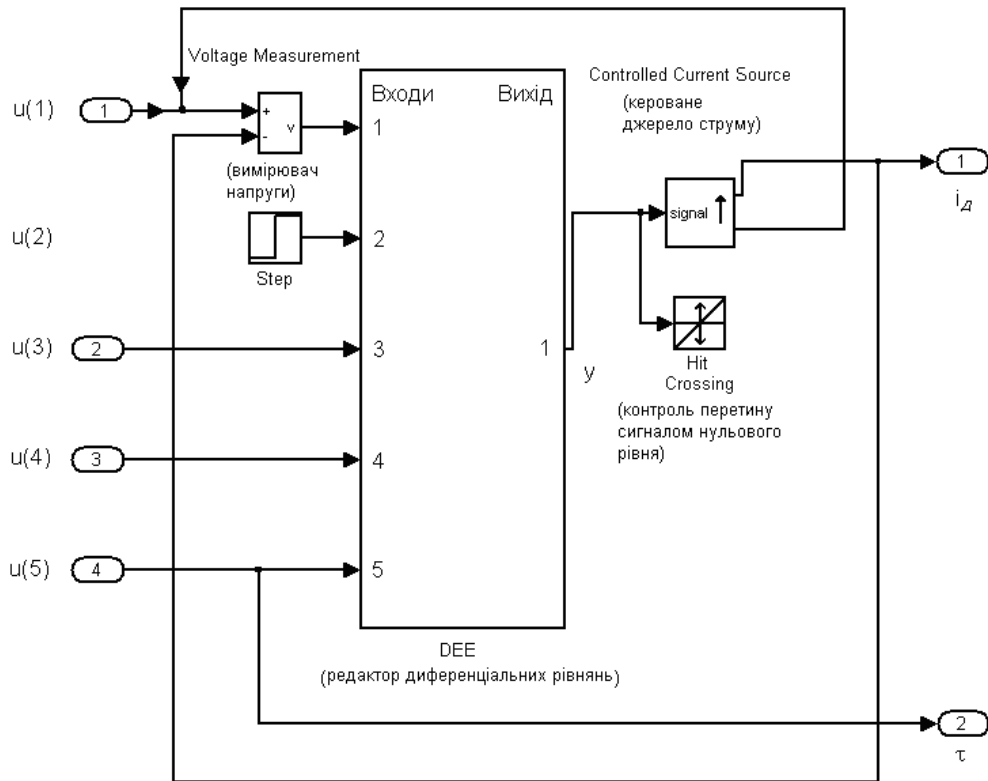


Рисунок 1. Блок розмикання електричного кола

Дуговий слабкострумовий розряд замінюється безперервним лінійним джерелом тепла потужністю P_d , що діє починаючи з моменту часу $t=0$.

Для безперервно діючого уздовж координати z лінійного джерела обмеженої довжини l_d при змінній у часі потужності $P_d(t)$:

$$T = \int_0^t \frac{P_d(t') dt'}{8\pi\lambda \cdot (t-t')} \cdot \left[\Phi\left(\frac{z+l_d/2}{\sqrt{4a(t-t')}}\right) - \Phi\left(\frac{z-l_d/2}{\sqrt{4a(t-t')}}\right) \right] e^{-\frac{r^2}{4a(t-t')}} \quad (6)$$

де Φ – чисельний інтеграл, $\Phi = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-z^2} dz$, r – радіус-вектор.

Початковий радіус вогнища запалення r_0 і його максимальна температура T , отримані при обчисленнях, наведені на рис. 2.

Важливим теплофізичним параметром, що використовується в моделях розрахункової оцінки іскробезпеки електричних кіл є *теплова постійна часу* електричної дуги τ . Вона характеризує теплову інерційність при зміні електричних властивостей дуги в нестационарних режимах.

Для визначення теплової постійної часу дуги використовувалися два дослідницьких методи: а) побудова за осцилограмами u та i у динамічному режимі

залежності $y = \frac{1}{\tau} \cdot \left(1 - \frac{x}{P_0 l_d}\right)$, де $x = u \cdot i$, $y = \frac{1}{R_d} \frac{dR_d}{dt}$, $\frac{dy}{dx} = \frac{1}{\tau P_0 l_d}$. Одержавши з осцилограмм відповідні дані u_d , i_d і R_d , за цією формулою можна визначити величину $P_0 l_d$ для відповідної крапки, а також знайти: $\tau = \frac{1}{(P_0 l_d) \cdot (dy/dx)}$.

б) за кривою опору $R_d(t)$ визначається час, протягом якого електричний опір дуги змінюється в e раз.

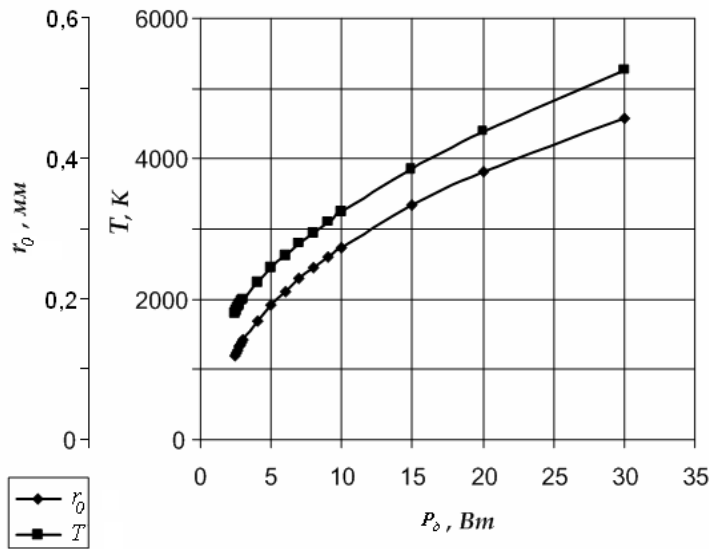


Рисунок 2. Залежність максимуму температури T і радіуса r_0 циліндричного стовпа дуги від потужності дуги P_d

небезпечно нагрівання електрода з різними діаметрами при швидкому наростанні струму короткого замикання в аварійному режимі до моменту його відключення захистом. Проведено зіставлення досягнутої за цей час і максимальної граничної запалюючої температури для МПС. Зокрема, встановлено, що для струму 28 А, який протікає по мідному електроду діаметром 0,2 мм, час досягнення небезпечної температури нагрівання 1020°C становить 0,28 с.

У третьому розділі «Дослідження математичної моделі осередкового запалювання газоповітряної суміші під впливом електричного розряду» досліджені процеси осередкового запалювання МПС під впливом слабкострумового електричного розряду на основі диференціальних виразів теплових балансів і дифузійних явищ масоперенесення.

Оскільки при формуванні вогнища відносно підвищення тиску у фронті полум'я визначається квадратом відношення швидкості фронту полум'я і швидкості звуку, тобто числом Дамкеллера Dm , а швидкості, що відповідають формуванню вогнища запалення, як правило, $S_b < 2$ м/с, можна прийняти тиск у зоні фронту полум'я постійним.

Після проходження електричного пробою формується ударна хвиля, яка поширюється в газі. Тиск у хвилі падає в міру її видалення від зони іскрового розряду, а швидкість поширення хвилі тиску випереджає швидкість хвилі прогріву. Показано, що до моменту формування стійкого фронту полум'я хвиля стиску йде далеко від високотемпературної зони, тим швидше, чим менше число Dm , і подальший процес запалювання відбувається практично в нерухомому середовищі в ізобаричних умовах.

У рамках теплової теорії запалювання її суворе математичне формулювання повинне базуватися на одночасному обліку явищ теплопровідності і дифузії при наявності екзотермічної хімічної реакції окислювання МПС. Математична модель електричного запалювання газової суміші являє собою систему рівнянь, що описує процеси теплопровідності, хімічної кінетики з урахуванням

У відповідності з осцилограмами напруги і струму при дуговому розряді розмикання згідно двох розглянутих методів: на проміжку $t=0-150$ мкс (мало змінюється $R_d(t)$) - $\tau \approx 60-90$ мкс; на проміжку $t=150-175$ мкс (зростаючий $R_d(t)$) - $\tau \approx 100-150$ мкс; на проміжку $t=175-200$ мкс (спадний $R_d(t)$) - $\tau \approx 200-220$ мкс.

Аналогічно при пробійному розряді розмикання: на проміжку $t = 0-100$ мкс (зростаючий $R_d(t)$) - $\tau \approx 20-80$ мкс; на проміжку $t = 100-150$ мкс (спадний $R_d(t)$) - $\tau \approx 100-150$ мкс.

Розроблена методика і програма розрахункової оцінки часу

зв'язку між значеннями відносної концентрації пального в будь-якій крапці простору і значеннями температур у цих крапках, і містить внутрішнє джерело тепла в стовпі розряду.

При відсутності полум'ягасильної дії контактів застосовується рівняння (7):

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + Q_s(t, r, F) + P_0(t, r), \quad (7)$$

де Q_e [Вт/мм³] - потужність теплового джерела екзотермічної реакції на одиниці об'єму; P_0 [Вт/мм³] - потужність іскрового розряду на одиниці об'єму; r - сферична координата [мм]; T [К] - миттєве значення температури в момент часу t [мкс]; F - частка вигорілого метану відносно його початкової концентрації.

Якщо прийняти, що вся енергія електричного розряду виділяється в сфері радіуса r_0 , то вирішується центрально-симетрична задача про розподіл температур:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + Q_e + P_0, \quad (8)$$

Початкові умови задачі: $T = T_n(r)$ при $0 \leq r \leq r_0$; $T = 300$ К при $r > r_0$; $F = 0$. Граничні умови задачі: $T = 300$ К при $r = \infty$ і $t \geq 0$; $T = T_n(0)$ при $r = 0$ і $t \geq 0$. Для щільності енергії теплового джерела було прийнято: P_0 при $0 \leq r \leq r_0$ і $0 \leq t \leq T_p$; $P_0 = 0$ при $r > r_0$ або $t > T_p$, де $T_n(r)$ - початковий розподіл температури усередині радіуса джерела розряду; T_p - тривалість дії іскрового джерела.

В якості основного постулату хімічної кінетики прийняте положення, що швидкість реакції W пропорційна добутку концентрації реагуючих речовин у цей момент часу (формула Арреніуса). Для групи сумішей I точність моделювання можна підвищити, ґрунтуючись на дослідженнях, проведених спеціально для цього типу пального. Залежність швидкості реакції dc_{CH_4}/dt від температури в діапазоні $T = 930-1120^\circ$ С при $r_{CH_4} = 0,01-0,10$ відповідає постійній енергії

активації $E=60$ ккал/моль ($r_i = \frac{c_i}{c}$ - відносна молярна концентрація, c_i $\left[\frac{\text{молек}}{\text{см}^3} \right]$ - концентрація i - ої компоненти в суміші). Таким чином, сумарна формула для швидкості перетворення метану в суміш СО, Н₂ і Н₂О при $T > 930^\circ$ С:

$$W = -\left(\frac{dc_{CH_4}}{dt}\right) = 7 \cdot 10^8 \frac{p}{T} r_{CH_4}^{-0,5} r_{O_2}^{1,5} \exp\left[-\frac{60000}{RT}\right], \quad [\text{моль} \cdot \text{см}^{-3} \cdot \text{сек}^{-1}], \quad (9)$$

де тиск $p > 1$ виражений в ата, $R = 1.987$ [кал/моль К] - універсальна газова постійна.

Кількість тепла, що виділяється в одиниці об'єму:

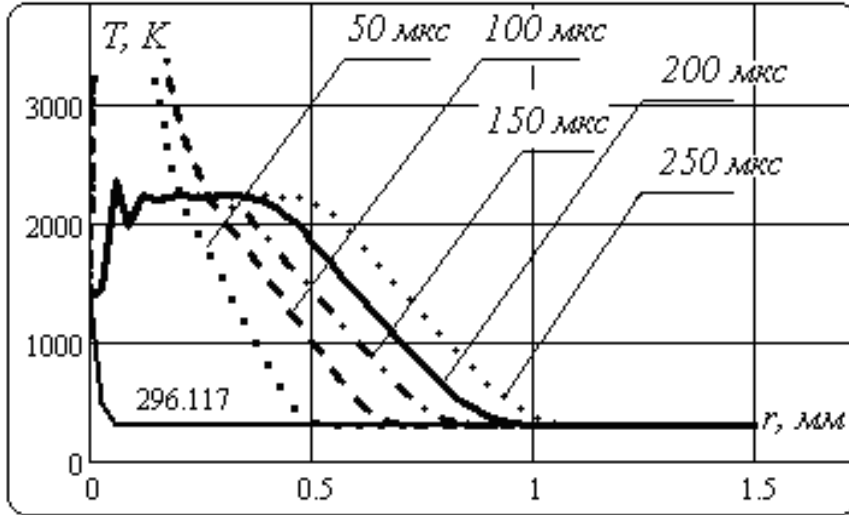
$$Q_e = q_T \cdot W \cdot 10^{-3}, \quad [\text{Вт/мм}^3], \quad (10)$$

де $q_T = 889,5 \cdot 10^3$ [Дж/моль] - питома теплова здатність реакції.

У виразах (7) і (9) необхідно врахувати вигоряння в процесі реакції реагуючих компонентів, отже, зменшення їхньої концентрації. При цьому, виходячи з

рівняння реакції $CH_4 + 2O_2 = 2H_2O + CO_2$, поточна концентрація метану складатиме $C_A = C1 - F \cdot C1$, а кисню $C_B = C2 - 2 \cdot F \cdot C1$ ($C1$ і $C2$ – початкові концентрації метану і кисню, %).

Кількість тепла, що виділяється в m -й крапці координати сферичного радіуса в k -тий момент часу залежить від частки вигорілого компонента $f_{m,k}$ на k -ому кроці за часом в m -тій крапці:



$$f_{m,k} = \frac{\Delta T_{m,k}}{T_M}, \quad (11)$$

де T_M – температура при повному згорянні компонента.

Сумарна частка згорілого компонента в m -тій крапці k -того кроку за часом може бути знайдена шляхом послідовного підсумовування:

$$F_{m,k} = \sum^k f_{m,k}, \quad (12)$$

Рішення рівняння (8), доповнене граничними та початковими умовами, у загальному

Рисунок 3. Температура вздовж радіуса вогнища запалення в різні моменти часу і виникнення хімічної реакції, що самопідтримується (енергія, яка витрачається на нагрів горючої газової суміші $W_p = 0,17$ мДж)

вигляді може бути знайдено чисельними методами з використанням явного сіткового відображення за 4-х крапковою різницевою схемою:

$$T_{m,k+1} = T_{m,k} + \frac{\Delta_t \cdot a(T_{m-1,k})}{\Delta_r^2} T_{m-1,k} + \frac{\Delta_t \cdot a(T_{m+1,k})}{\Delta_r^2} T_{m+1,k} - 2 \frac{\Delta_t \cdot a(T_{m,k})}{\Delta_r^2} T_{m,k} + \frac{2\Delta_t \cdot a(T_{m+1,k})}{\Delta_r^2} \times \frac{T_{m+1,k} - T_{m,k}}{m} + q(m \cdot \Delta_r, T_{m,k}, F_m, t) \cdot \Delta_t. \quad (13)$$

де q – функція джерела, що враховує одночасне виділення тепла в екзотермічній реакції і плазмі дуги; Δ_t [с], Δ_r [мм] – крок за часом і радіусом.

Для зазначених початкових умов, різних значень P_0 і часу розряду T_p визначена температура полум'я (рис. 3). Самопідтримна хімічна реакція виникає, якщо фронт полум'я з температурою стійкого горіння МПС $T_T = 2173$ К має П-подібну форму ($W_p \geq 0,17$ мДж).

Реальне теплове джерело при електричному запалюванні, як правило, ближче за формою до циліндра, що спирається своїми торцями в електроди, які розмикаються, тобто в цьому випадку доцільно при розрахунку температурного поля розглядати тільки один квадрант площини, у якій розташована вісь симетрії (рис. 4).

Перенос тепла подібний до процесу теплопровідності, якщо прийняти коефіцієнти переносу енергії за рахунок теплового розширення, конвекції і дифузії постійними.

З огляду на зазначену конфігурацію моделі, система диференціальних рівнянь в 2-х мірній циліндричній системі координат (ЦСК) (z, r) , що описує процес електричного запалювання вибухонебезпечної суміші:

$$c(T) \cdot \rho(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda(T) \cdot \nabla^2 T + Q_3(z, r, T, \eta) + P_0(t, z, r, T), \quad (14)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial T} = \frac{1 - \eta}{T}, \quad (15)$$

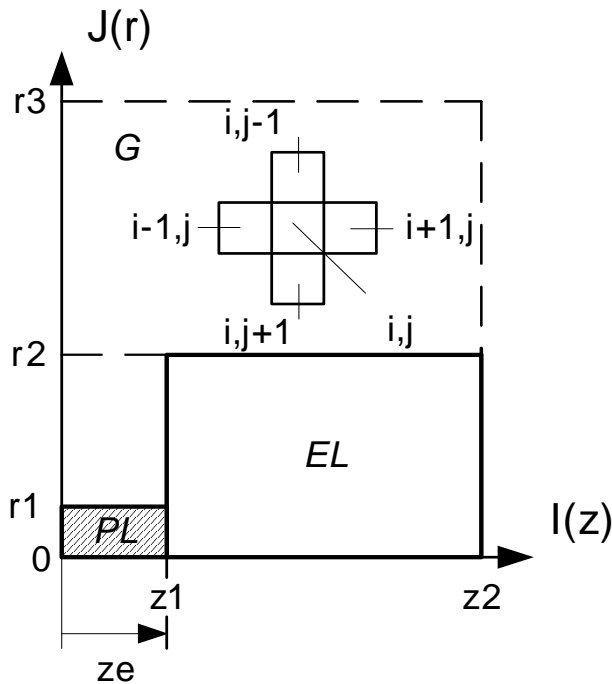


Рисунок 4. Апроксимація простору моделі (PL - стовп розряду, EL - електрод, G - горюча газова суміш, r, z – циліндричні координати)

осях z і r .

Для щільності енергії теплового джерела було прийнято: P_0 при $(0 \leq z \leq z_e) \wedge (0 \leq r \leq r_1) \wedge t \leq T_p$; $P_0 = 0$ при $(0 \leq z \leq z_2) \wedge (0 \leq r \leq r_3) \wedge t > T_p$.

Залежно від вибору часового шару m , за температурами якого розраховуються коефіцієнти рівнянь (16), (17) може застосовуватися або квазілінійна $m=k$, або нелінійна $m=k+1$ різницева схема. Нелінійна схема в порівнянні із квазілінійною дає меншу похибку чисельного рішення вихідної задачі. Особлива перевага стає помітною при збільшенні кроку за часом Δ_t . Стійкість і монотонність отриманої різницевої схеми оцінювалася за величинами безрозмірного числа

Куранта: $Cu = \frac{a_{\max} \Delta_t}{\Delta_z^2} \leq 5$, що в 10 разів перевищує рекомендовану при викорис-

танні явної різницевої схеми.

Сіткове відображення диференціального рівняння теплопровідності в ЦСК (локально-одномірною схемою з розщепленням за окремими координатами z, r), з огляду на осьову симетрію задачі:

- по r (16):

де η - частка використаного (у результаті хімічної реакції або теплового розширення газу) метану по відношенню до його початкової концентрації в даній крапці простору; t - час; u, i - напруга і струм розряду; r_1 - радіус стовпа розряду (рис. 4); P_0 - потужність електричного розряду,

$$P_0 = \frac{u \cdot i}{c \rho \pi \cdot r_1 \cdot \int_0^t v(t) dt}$$

Початкові умови задачі: $T_{i,j} = T_n$, $\eta_{i,j} = 0$ при $(0 \leq r \leq r_1) \wedge (0 \leq z \leq \Delta_z)$, інакше $T_{i,j} = \text{const} = 300$ К. Граничні умови задачі: $T_{i,j} = 300$ К при $r=r_3, z=z_2$ і $t > 0$; $T_{i,j} = T_n$ при $(z=0) \wedge (0 \leq r \leq r_1)$ або при $(r=0) \wedge (0 \leq z \leq z_1)$ і $t > 0$, інакше $T_{i,j} = \text{const} = 300$ К при $t > 0$, де T_n - максимальна початкова температура стовпа розряду; Δ_z - крок сітки ЦСК по осі z (рис. 4); i, j - порядковий номер сітки по

$$\begin{aligned}
& v_{i,j}^{k+1} \cdot \left[-\frac{\Delta_t}{j \cdot \Delta_r^2} \cdot a(T_{i,j}^m) - 1 - \frac{\Delta_t}{\Delta_r^2} \cdot (a(T_{i,j-1}^m) + a(T_{i,j+1}^m)) \right] + \\
& + v_{i,j+1}^{k+1} \cdot \left[a(T_{i,j}^m) \cdot \frac{\Delta_t}{j \cdot \Delta_r^2} + a(T_{i,j+1}^m) \cdot \frac{\Delta_t}{\Delta_r^2} \right] + \\
& + v_{i,j-1}^{k+1} \cdot \left[\frac{\Delta_t}{\Delta_r^2} \cdot a(T_{i,j-1}^m) \right] + T_{i,j}^k + q(i \cdot \Delta_z, j \cdot \Delta_r, T_{i,j}^k, \eta_{i,j}, k \cdot \Delta_t) \cdot \frac{\Delta_t}{2} = 0;
\end{aligned} \tag{16}$$

- по z (17):

$$\begin{aligned}
& T_{i,j}^{k+1} \cdot \left[-1 - \frac{\Delta_t}{\Delta_z^2} (a(v_{i-1,j}^{k+1}) + a(v_{i+1,j}^{k+1})) \right] + \\
& + T_{i-1,j}^{k+1} \cdot \left(\frac{\Delta_t}{\Delta_z^2} \cdot a(v_{i-1,j}^{k+1}) \right) + T_{i+1,j}^{k+1} \cdot \left[\frac{\Delta_t}{\Delta_z^2} \cdot a(v_{i+1,j}^{k+1}) \right] + \\
& + v_{i,j}^{k+1} + q(i \cdot \Delta_z, j \cdot \Delta_r, v_{i,j}^{k+1}, \eta_{i,j}, k \cdot \Delta_t) \cdot \frac{\Delta_t}{2} = 0;
\end{aligned} \tag{17}$$

де i, j – номери координат по осі z і радіусу r ; Δ_t - крок за часом (визначається, виходячи з умов стійкості і монотонності різницевого рішення задачі); Δ_r, Δ_z - крок по радіусу і осі циліндричної системи координат; $a(T)$ - коефіцієнт

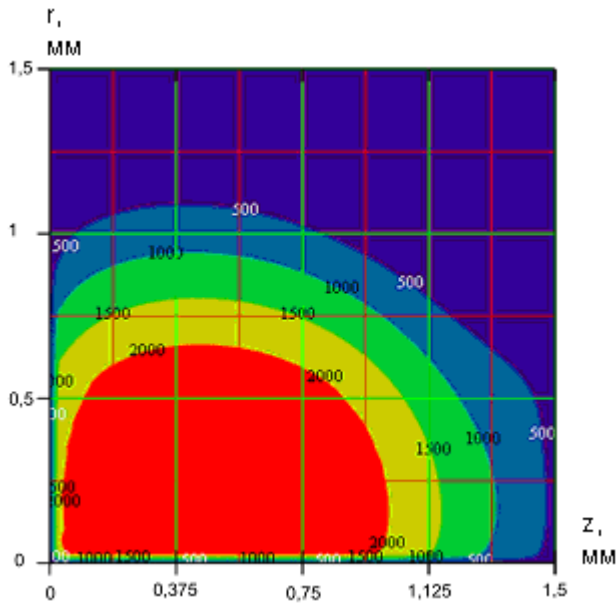


Рисунок 5. Ізолінії температури при займанні метано-повітряної суміші (небезпечний режим)

температуропровідності, що враховує процеси теплопровідності, дифузії і теплового розширення газу; $m = k$ або $k + 1$ - номер часового шару; v - температура, що виникла після закінчення попереднього одномірного процесу.

У процесі розвитку ядра полум'я відбувається зміна температури газової суміші (більш, ніж в 6 разів) і відповідна зміна об'єму вогнища. Щоб урахувати це явище вибухонебезпечна газова суміш розглядається як ідеальний газ (властивості газу наближені до ідеального при його високій температурі, для якого $\frac{pV}{T} = const$ (p, V, T - тиск, об'єм, температура), і рівняння (15), записується в різницевій формі:

$$\eta^{k+1} = \eta^k + \frac{\Psi(1 - \eta^{k+1}) \cdot (T^{k+1} - T^k)}{T^{k+1}} = \frac{\eta^k + \frac{\Psi}{T^{k+1}} \cdot (T^{k+1} - T^k)}{1 + \frac{\Psi}{T^{k+1}} \cdot (T^{k+1} - T^k)}, \tag{18}$$

де $\Psi = 0,325$ - константа, що враховує скінченність швидкості руху газу; k - номер поточного кроку за часом.

Енергетична зона виникнення стійкого горіння метано-повітряної суміші з температурою близько 2173 К, а також зона його руйнування визначається згідно картини поля теплового вибуху (див. рис. 5).

Оцінка зміни агресивності розряду під дією впливу діаметра електродів і довжини міжконтактного проміжку на енергію запалювання показав, що процес поширення фронту полум'я з електродами, які повільно розмикаються ($v=0,046$ м/с), тобто в умовах значної їхньої дії, змінюється (див. рис. 6). Енергія запалення залежно від радіуса електродів r_2 зростає з 0,5 мДж при $r_2 = 0,25$ мм до 1,2 мДж при $r_2=0,5$ мм.

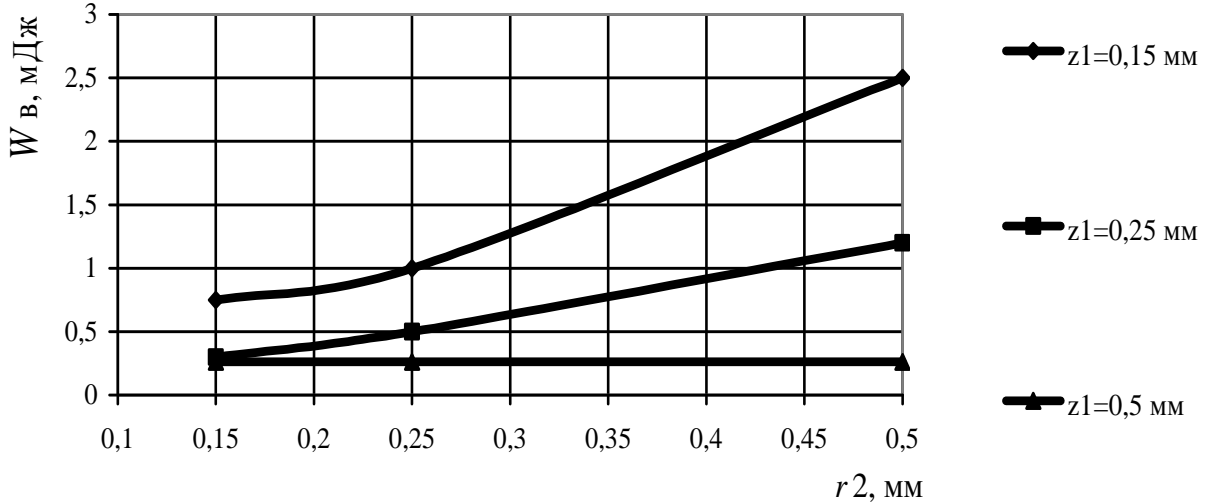


Рисунок 6. Залежність запалюючої енергії метано-повітряної суміші від радіуса електрода і довжини міжконтактного проміжку

За аналогією загального характеру залежностей запалюючої енергії розряду від його тривалості і швидкості комутації з урахуванням кратності зниження мінімальних запалюючих струмів і корегування кута нахилу цих залежностей для груп сумішей ПА і ПВ здійснюється перерахування їх ІБ параметрів за відомими параметрами сумішей групи І.

Для більшості швидкостей v розмикання кола залежності мінімальної запалюючої енергії від тривалості розряду $W_3(T_p, v)$ у логарифмічних координатах з достатньою для практичних розрахунків точністю апроксимуються лінійними ділянками: 1 – спадний, застосовується для малих часів розряду з $T_p < 40$ мс і $v=6,5$ м/с; 2 – область постійної енергії; 3 – зростаючий, описується рівнянням:

$$W = bT^k, \quad (19)$$

де T – тривалість розряду, мс; W – запалююча енергія в мДж (для спрощення індекси опущені); b, k – коефіцієнти, обумовлені для кожної вибухонебезпечної суміші та швидкості v .

Вихідними даними розрахунку слугує інформація, що належить до суміші групи І (швидкості комутації v , коефіцієнти k і b , час перегину T_{II} графіка рис. 9). Результатами є коефіцієнти суміші групи ІІ, які позначені як $b1$ і $k1$:

$$\beta = \frac{W_{\min II}}{W_{\min I}}, \quad W1 = W \cdot \beta, \quad (20)$$

$$b1 = \frac{\beta \cdot bT^k}{T1^{k1}}, \quad k1 = \frac{\ln(bT^k) - \ln(W)}{\ln(T1) - \ln(T_{II} \cdot T^*)}, \quad (21)$$

$$W1 = b1 \cdot (T_M \cdot T^*)^{k1} \quad (22)$$

де $W_{\min II}$ і $W_{\min I}$ - запалююча енергія електричної іскри для сумішей груп I і II, знайдена при мінімальному запалюючому струмі кола [мДж]; T^* - відношення тривалості розряду для суміші групи II (T_1) і суміші групи I (T); T_{II} - час перегину похилої частини графіка запалюючої енергії для контрольної суміші групи I (рис. 9), [мс]; T_M - тривалість розряду, зведена до суміші групи I, [мс]; $T_M \cdot T^*$ - тривалість розряду, зведена до суміші групи II, [мс] (наприклад, у крапці перегину $T_{II} \cdot T^*$); W_I і W - запалююча енергія розряду для сумішей груп II і I на похилій ділянці 3, [мДж].

Значення мінімальних запалюючих струмів для омичних кіл узяті з ГОСТ Р МЭК 60079-11-2010, а тривалості розряду визначаються з використанням моделі дугового розмикання при швидкості комутації $v = 0,046$ м/с.

Залежність $\beta(T^*)$ апроксимується наступним виразом (коефіцієнт кореляції – 0,98):

$$\beta(T^*) = 0,023 \cdot e^{3,825 \cdot T^*} - 0,031 \quad (23)$$

Результати розрахунку похибок мінімальних запалюючих струмів сумішей підгруп ІА і ІВ зіставлялися з відомими експериментальними даними ДСТ. Проте дані результати вимагають більш ретельної експериментальної перевірки на складних ІБК вибухозахищеного електрообладнання для зазначених підгруп газових сумішей.

У четвертому розділі «Розробка розрахункового методу безкамерної теплової оцінки іскробезпеки контурів електричних кіл складної структури» проведена розробка розрахункового методу безкамерної теплової оцінки (БТО) іскробезпечних контурів електричних кіл складної структури і прискореного технічного експрес-методу БТО (ТБТО), що дозволяє скоротити розрахунковий час в 5 разів при збереженні тієї ж точності.

Реальні схеми ІБ кіл не завжди являють собою сукупність послідовно та паралельно з'єднаних елементів. Якщо до їх складу входить хоча б одна «місткова структура», така схема є складною. У містковій структурі елементи з'єднані таким чином, що її подальше спрощення неможливо за допомогою елементарних перетворень. Еквівалентування кіл з такими параметрами ускладнено.

Моделювання процесу дугової комутації в електричних колах побудовано з використанням системи рівнянь (5). Вона дає можливість одержати вихідні дані для розрахункової оцінки ІБ за методом «безкамерної теплової оцінки»: енергію, тривалість розряду і середню потужність.

Метод, відповідно до якого оцінювалися ІБ параметри, протестовано на прикладі простих омичних, індуктивних кіл і індуктивного кола з паралельним з'єднанням гілок. Безпека заданих параметрів розряду характеризується виникненням стійкого фронту полум'я або його руйнуванням з урахуванням впливу діаметра електродів і довжини міжконтактного проміжку на енергію запалювання.

Схеми оцінки ІБ електричних кіл заданої конфігурації аналізувалися із застосуванням стимуляційного аналогового моделювання в середовищі MicroCap версій 7..9. Енергія розряду W_p і його тривалість T_p при розмиканні контактів з різними швидкостями (0,046 м/с..6,5 м/с) прораховувалася на комп'ютерній моделі, визначалися іскробезпечні і запалюючі струми (напруги), а потім отримані

значення порівнювалися з аналогічними експериментальними даними за ГОСТ Р МЭК 60079-11-2010 і розрахунковими даними за ГОСТ Р 51330.10 - 99.

Опір резистора RD (рис. 7), що моделює розряд розмикання, задано за допомогою математичного виразу:

$$RD = if(T < c_br, 1e-4, STP(c_br) \cdot 1 / EXP(I(LI))), \quad (24)$$

де T - поточний модельний час, с; c_br - момент початку комутації кола – розмикання ключа $SW1$, с; $STP(c_br)$ - функція, що приймає «1» при $T \geq c_br$ і «0» в інших випадках.

Ключ $SW1$ керується за часом, що відповідає зміні опору від 0,0001 Ом при $T < c_br$ (служує для моделювання замкнених контактів електричного кола до комутації) до опору 10^7 Ом при $T \geq c_br$, що впливає з диференціального рівняння провідності дуги (5). Для формування цієї провідності використане джерело напруги $E1$ (рис. 7), що задає між вузлами 5 і 0 напругу $V(E1)$, яка відповідає правій частині 1-го рівняння системи (5):

$$V(E1) = \frac{d \ln g}{dt} = STP(c - br) \cdot (1 / \tau) \cdot ((EXP(I(LI)) \cdot V(RD) ^ 2) / (I(R0) \cdot (8 + ad \cdot vs \cdot (T - c_br)) + bd \cdot vs \cdot (T - c_br)) - 1), \quad (25)$$

де ad і bd – коефіцієнти вольт-амперної характеристики дуги; vs – швидкість комутації; τ - постійна часу дуги.

Струм через додаткову індуктивність $LI = 1$ Гн визначає інтеграл від напруги джерела $V(E1)$, тобто $I(LI) = \ln(g)$.

Для напруг джерела живлення E у діапазоні 20..300 В моделювання показало, що для омичного кола при $E=20..100$ В результати погоджуються з похибкою не більше 11%. Але подальше збільшення живлячої напруги $E=100..300$ В призводить до зниження розрахункової енергії, яка виділяється у розряд, що пояснюється невідповідністю прийнятих вольт-амперних характеристик. Похибка практично не залежить від напруги джерела живлення в зазначених діапазонах і може корегуватися за струмом діленням на $K_k=1,37$.

Аналіз індуктивного кола проводився для послідовного з'єднання джерела постійного струму - батареї ($U=70$ В, 24 В, 12 В) і RL – гілки ($L=0.01$ мГн..1000 мГн). У зв'язку з тим, що розрахункові дані в ДСТ і стандартах ІЕС відсутні, запалююча здатність визначалася за характеристиками іскробезпеки $i-U-L$. Порівняння з даними стандартів ІЕС показали, що у всьому зазначеному діапазоні вони погоджуються з похибкою не більше 16%.

Тут же порівнювалися дані розрахунків, виконані за відомими методиками без врахування динамічних властивостей плазми розряду (ІГС ім. А. А. Скочинського, МакНДІ). Встановлено, що за період комутації теплова постійна часу дуги τ (τ у формулі (25)) змінюється в 6 разів, тому, відповідно до розробленого методу, потрібен облік цього явища. У протилежному випадку при визначенні мінімальних запалюючих струмів вносяться істотні похибки (до 52%), які зростають зі збільшенням індуктивності і скороченням часу розряду.

Для комп'ютерного моделювання іскробезпечного кола пропонуються методики, що враховують вплив розповсюджених іскрогасильних шунтів (діодний, резисторний, варисторний, стабілітронний та їхні комбінації), які можуть використовуватися в іскробезпечних електричних схемах.

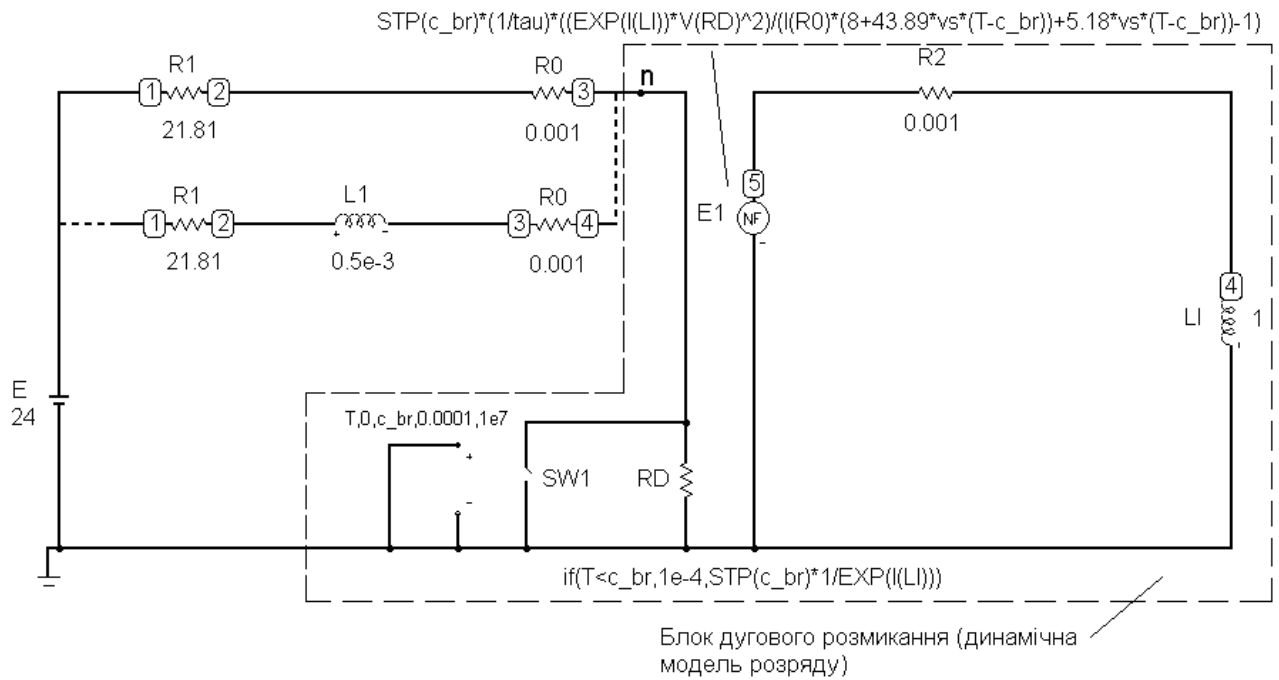


Рисунок 7. Розрахункова схема для оцінки іскробезпеки омичного і індуктивного кола

Ефективність дії діодного і стабілітронного шунтів перевірялася у небезпечному за запалювальною здатністю колі (вибухонебезпечна суміш - метан-повітря). Параметри кола: напруга джерела живлення $U = 30$ В, статична індуктивність кола $L = 0,1$ Гн, омичний опір індуктивного елемента $R_L = 35$ Ом, стабілітрон $8EQ045_IR - BV = 45$ В, час переносу заряду $TT = 1$ нс, діод $BYV26D - TT = 128,2$ нс. Порівняння запалюючих параметрів різних варіантів кіл представлені в табл. 2, з якої робиться висновок про ефективність використання зазначених шунтів.

Таблиця 2 - Оцінка іскробезпеки індуктивного кола з діодним і стабілітронним шунтами ($v = 6,5$ м/с)

Шунт	i , А	T_p , мкс	W_p , мкДж	$P_{ср}$, Вт	$W_з$, мкДж	R , Ом
діодний <i>BYV26D</i>	0,33	39	64	1,42	404	55
стабілітронний <i>8EQ045_IR</i>	0,33	39	58	1,35	404	55
без шунта	0,33	323,1	5400	12,9	920	55

Достовірність методу БТО була підтверджена порівнянням з експериментами у вибухових камерах.

У той же час, таке рішення має значну трудомісткість через нелінійність коефіцієнтів температуропровідності, а також джерел теплового поля. З метою спрощення алгоритму розрахунку необхідно володіти аналітичними залежностями, формуючими метод «технічної безкамерної теплової оцінки» (ТБТО), що робить рішення даної науково-технічної проблеми загальнодоступною для розроблювачів рудникових та хімічних апаратур.

За результатами накопичених даних обчислювального експерименту, проведеного за методом БТО, отримано масив крапок в 3-х вимірній області визначення, що зв'язує енергію запалення розряду $W_з$, мДж, його тривалість T_p , мс (мкс) і швидкість розмикання кола v , м/с на трьох характерних ділянках 1, 2, 3 (рис. 8).

Ділянка 2 відповідає постійній запалюючій енергії, а ділянка 3 – зростаючій, що пояснюється збільшенням тепловіддачі в навколишню газову суміш. Це пов'язане з малою інтенсивністю надходження енергії з електричного джерела запалення. Ділянка 1 з $T_p < 40$ мкс не була раніше врахована у наявному експериментальному матеріалі, отже, цілий клас кіл (зокрема, концепція Power-і з скороченою тривалістю розряду) не було охоплено розрахунковими методами визначення ІБ параметрів.

Для контрольних сумішей, більш агресивних, ніж суміш групи I відсутня інформація про крапку перегину ділянок 1-2, тому в подальших розрахунках при тривалостях розрядів менше, ніж час перегину T_p ділянки 2-3, використовуються W_{\min} ділянки 2.

Залежність $W_3(v, T_p)$ апроксимується в логарифмічній системі координат на кожній з ділянок у вигляді однієї із двох форм подання:

$$W_3 = b_i T_p^{k_i} \quad (\text{форма 1}) \quad (26)$$

$$\begin{cases} W_3 = e^{a_0 + a_1 \cdot \ln(T_p)} & v = 6,5; 4 \text{ м/с} \\ W_3 = a_0 + a_1 \cdot \ln(T_p) & v = 1,8; 0,9; 0,3; 0,11; 0,046 \text{ м/с} \end{cases} \quad (\text{форма 2}) \quad (27)$$

де T_p - тривалість розряду, виражена в мкс при $v = 6,5; 4$ м/с й у мс при $v = 1,8; 0,9; 0,3; 0,11; 0,046$ м/с; W_3 – запалююча енергія розряду в мДж; i – номер ділянки на рис. 8, $i = \overline{1,3}$.

Отримані коефіцієнти b_i , k_i і a_0 , a_1 наведені в табл. 3. Кількісну оцінку запалюючої здатності розрядів у досліджуваному колі можна одержати, порівнявши енергію W_p , що надходить до розряду, з запалюючою енергією W_3 метано-повітряної суміші за однаковою тривалістю розряду T_p і швидкістю комутації v .

Якщо співвідношення $W_p / W_3 \geq 1$ хоча б на однієї з ділянок $i = \overline{1,3}$ (рис. 8), то коло визнається іскробезпечним. Номер ділянки визначається, виходячи із діапазонів T_p , що рекомендуються (табл. 3).

Необхідно відзначити, що апроксимація у формі 2 (27) призводить до більш сильного регресійного зв'язку $W_3(v, T_p)$ за Фішером, тому її рекомендується використовувати для визначення небезпеки запалюючої енергії. Регресійна залежність у формі 1 (26) зручна для перерахувань запалюючих параметрів більш агресивних сумішей, ніж 8,3% - кова метано-повітряна суміш.

У п'ятому розділі «Розробка методу розрахункової комп'ютерної оцінки іскробезпеки індуктивно-ємнісних кіл» викладено дослідження з розробки і тестування нового методу розрахункової комп'ютеризованої оцінки іскробезпеки електричних кіл, що містять індуктивно-ємнісні елементи.

Ємності конденсаторів і напруги на них у сукупності можуть перевищувати іскробезпечні значення. Разом з тим, навіть якщо кожен окремий конденсатор в електричній схемі є іскробезпечним, то в результаті аварійної роботи електрообладнання може виникнути паралельне з'єднання кіл, які містять ємнісні елементи, що порушить ІБ схеми в цілому.

Таким чином, на стадії розробки і при випробуваннях іскробезпечного електрообладнання неодноразово виникає необхідність оцінки іскробезпеки паралельного і змішаного з'єднання ємнісних кіл.

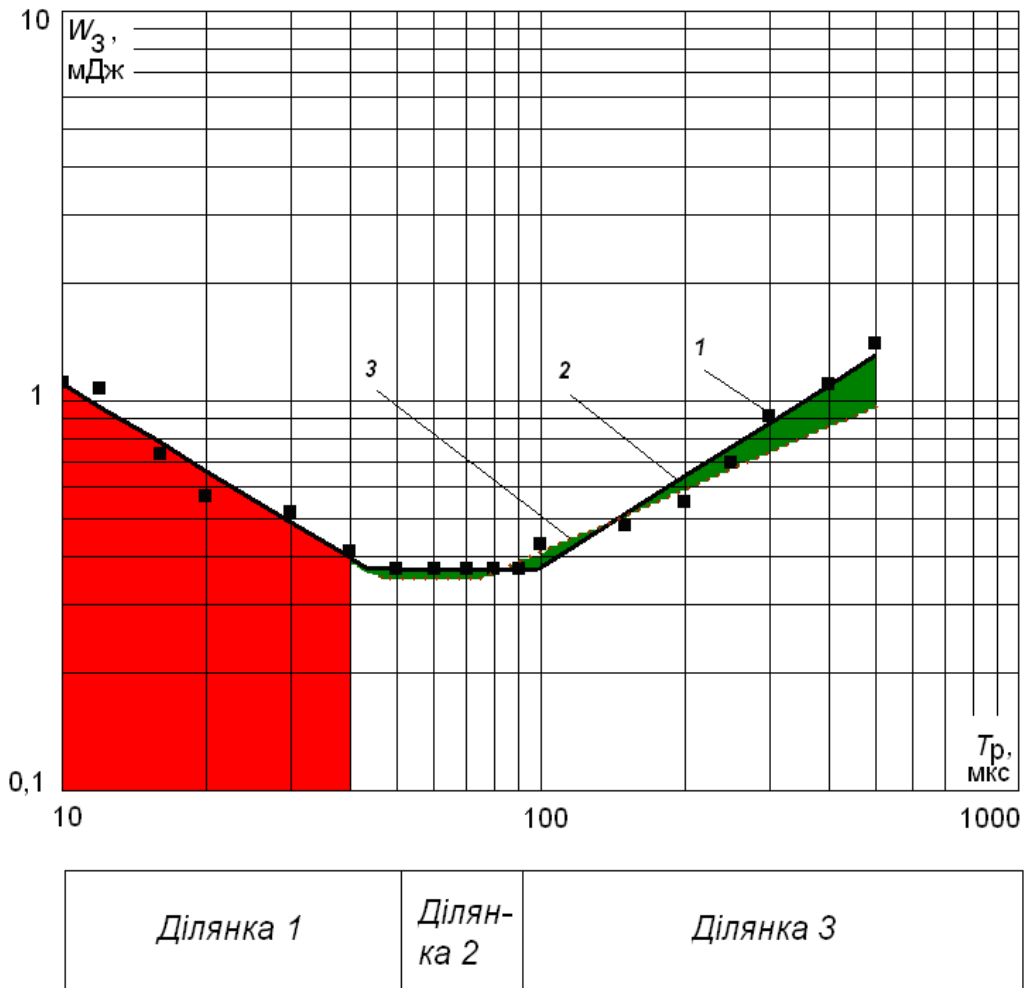


Рисунок 8. Залежність запальної енергії W_3 , мДж контрольної суміші групи I від тривалості розряду T_p , мкс при швидкості розмикання кола $v=6,5$ м/с. Графіки: 1- дані обчислювального експерименту; 2- розрахункові дані; 3 - експериментальні дані

Осцилографічні дослідження розрядів замикання в таких колах дають підставу припускати, що при малих обмежувальних опорах напруга на розряді змінюється залежно від величини струму, що протікає через нього. При достатньо великих обмежувальних опорах напруга на розряді залишається практично незмінною під час його існування і приблизно дорівнює 11..12 В. Розряд кола з малими опорами має невелику тривалість і його небезпека визначається кількістю енергії, що виділилася. Звідси видно, що вимогам аналізу небезпеки розрядів замикання в широкому діапазоні зміни їх параметрів може відповідати модель постійної напруги на розряді, яка дорівнює 11 В.

Також дотепер для безкамерної оцінки іскробезпеки ємнісних кіл використовуються залежності мінімальної запальної напруги від ємності з урахуванням обмежуючих опорів, отриманих для основних газових сумішей (ГОСТ 22782.5-78, ІЕС 60079-11, ГОСТ Р 51330.10-99). Кола, які строго відповідають наведеним залежностям, на практиці обмежуються малим переліком значень ємності конденсатора і опору послідовного резистора. Крім того, розрядні контури можуть містити індуктивні елементи, що забезпечують побудову резонансних схем, і комплексна оцінка іскробезпеки для такого загального випадку розгалуженого кола стає неможливою.

Аналіз причин появи похибок відомих методів безкамерної оцінки складних ємнісних кіл, заснованих на заміні паралельного з'єднання ємнісних елементів одним еквівалентним RC колом з параметрами $C_{екв}$ і $R_{екв}$ дозволив встановити, що даний метод не дає можливості точно визначити час розряду T_p , тому що за однакової енергії розряду W_p розбіжність у визначенні T_p становить 46%.

Зіставлення енерговиділення еквівалентного і складного кола показало, що дана методика безкамерної оцінки складних ємнісних кіл має наступні недоліки: трудомісткість розрахунків при визначенні еквівалентних параметрів $C_{екв}$ і $R_{екв}$; неможливість точно визначити час розряду T_p , тому що даний показник відрізняється при розрахунку заданих параметрів n паралельно з'єднаних RC ланок і при розрахунку еквівалентних їм параметрів приблизно в 2 рази; криві залежності мінімальної запалюючої напруги вибухобезпечних сумішей не охоплюють весь діапазон сполучень обмежувальних опорів ($R = 10, 100, 1000$ Ом) і ємностей.

З метою усунення зазначених недоліків відомих методів безкамерної оцінки іскробезпеки ємнісних і індуктивно-ємнісних кіл запропоновано використати комп'ютерну модель, засновану на припущенні про сталість напруги на розряді слабкострумowego кола $U_p = const$ і однопробійному іскровому розряді. Основні елементи та співвідношення комп'ютерного моделювання розряду в індуктивно-ємнісному колі наведені на рис. 9.

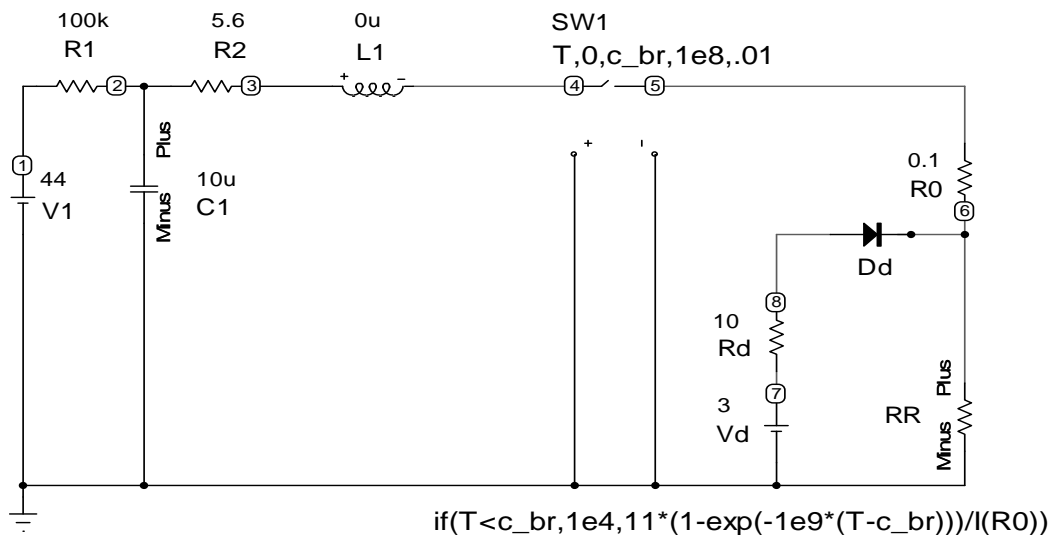


Рисунок 9. Схема розрахунку іскробезпеки індуктивно-ємнісного кола за розрядами замикання

Ключ $SW1$ у вихідному стані розімкнено, що забезпечує заряд конденсатора $C1$ до напруги джерела живлення $V1$. Перехідний процес запускається в момент замикання ключа. Додатковий ланцюжок Vd, Rd, Dd задає попередній струм через розряд і моделює виникнення в ньому автоелектронної емісії. У колі розряду конденсатора $C1=10$ мкф присутні опір $R2=5,6$ Ом і індуктивність, наприклад, $L1=0$ мкГн. Опір $R1=100$ Ом обмежує струм джерела живлення $V1$.

Модель RR показує зміну в часі опору розрядного проміжку, а він, у свою чергу, залежить від параметрів розрядного контуру.

При використанні даної моделі іскрового розряду замикання початкова ділянка кривої напруги на розряді $U(RR)$ після моменту замикання ключа $SW1$ не впливає на проходження струму в розряді $I(RR)$. Потім встановлюється постійна напруга $U_p = 11$ В и починається проходження струму через розряд.

Таблиця 3 - Розрахункові коефіцієнти для визначення запальної енергії метано-повітряної суміші W_3 (швидкість комутації $v_i = 0,046; 0,11; 0,3; 0,9; 1,8; 4; 6,5$ м/с)

Швидкість, м/с	Тривалість розряду	Розрахунковий вираз, мДж	Ділянка					
			1		2		3	
6,5	$T1 \leq 44$ мкс; $T2 = (44..90]$ мкс; $T3 = (90..500]$ мкс	$W_3 = b_i T_p^{k_i}$	$b1 = 5.804$	$k1 = -0.718$	$b2 = 0.37$	$k2 = 0$	$b3 = 0.014$	$k3 = 0.738$
4	$T2 \leq 120$ мкс; $T3 > 120$ мкс	$W_3 = b_i T_p^{k_i}$	-	-	$b2 = 0.44$	$k2 = 0$	$b3 = 0.022$	$k3 = 0.625$
1,8	$T2 \leq 0,4$ мс; $T3 > 0,4$ мс	$W_3 = b_i T_p^{k_i}$	-	-	$b2 = 0,8$	$k2 = 0$	$b3 = 3,312$	$k3 = 1,55$
0,9	$T2 \leq 0,5$ мс; $T3 > 0,5$ мс	$W_3 = b_i T_p^{k_i}$	-	-	$b2 = 1,1$	$k2 = 0$	$b3 = 2,1$	$k3 = 0,869$
0,3	$T2 \leq 1$ мс; $T2 = (1..3]$ мс	$W_3 = b_i T_p^{k_i}$	-	-	$b2 = 1.9$	$k2 = 0$	$b3 = 1,9$	$k3 = 0,967$
0,11	$T2 \leq 2$ мс; $T2 = (2..10]$ мс	$W_3 = b_i T_p^{k_i}$	-	-	$b2 = 3.7$	$k2 = 0$	$b3 = 1,691$	$k3 = 1,13$
0,046	$T2 = (2..5]$ мс; $T3 = (5..10]$ мс	$W_3 = b_i T_p^{k_i}$	-	-	$b2 = 7.046$	$k2 = 0.109$	$b3 = 2.265$	$k3 = 0.829$
Швидкість, м/с	Тривалість розряду	Розрахунковий вираз, мДж	Ділянка					
			1		2		3	
6,5	$T1 \leq 44$ мкс; $T2 = (44..90]$ мкс; $T3 = (90..500]$ мкс	$W_3 = e^{a0+a1 \cdot \ln(T_p)}$	$a0 = 1,798$	$a1 = -0.739$	$a0 = -0.994$	$a1 = 0$	$a0 = -4.079$	$a1 = 0.692$
4	$T2 \leq 120$ мкс; $T3 > 120$ мкс	$W_3 = e^{a0+a1 \cdot \ln(T_p)}$	-	-	$a0 = -1.843 \cdot 10^{-3}$	$a1 = -0.169$	$a0 = -3.744$	$a1 = 0.605$
1,8	$T2 \leq 0,4$ мс; $T3 > 0,4$ мс	$W_3 = a0 + a1 \cdot \ln(T_p)$	-	-	$a0 = 0,8$	$a1 = 0$	$a0 = 2.344$	$a1 = 1.712$
0,9	$T2 \leq 0,5$ мс; $T3 > 0,5$ мс	$W_3 = a0 + a1 \cdot \ln(T_p)$	-	-	$a0 = 1.088$	$a1 = -0.051$	$a0 = 1.894$	$a1 = 1.215$
0,3	$T2 \leq 1$ мс; $T2 = (1..3]$ мс	$W_3 = a0 + a1 \cdot \ln(T_p)$	-	-	$a0 = 1.904$	$a1 = -2.756 \cdot 10^{-3}$	$a0 = 1.474$	$a1 = 3.002$
0,11	$T2 \leq 2$ мс; $T2 = (2..10]$ мс	$W_3 = a0 + a1 \cdot \ln(T_p)$	-	-	$a0 = 3.7$	$a1 = 0$	$a0 = -2.857$	$a1 = 8.099$
0,046	$T2 = (2..5]$ мс; $T3 = (5..10]$ мс	$W_3 = a0 + a1 \cdot \ln(T_p)$	-	-	$a0 = 7.173$	$a1 = 0.858$	$a0 = -5.316$	$a1 = 8.799$

Розрахунок часу розряду рекомендується здійснювати, вимірюючи відносний час сплеску кривої $I(RR)$ між початком її росту і величиною струму обриву розряду (приймається 3 мА).

Відповідно до графіків залежностей мінімальної запалюючої напруги від ємності кола за ГОСТ Р 51330.10-99 (ІЕС 60079-11) визначені запалюючі параметри для різних типів сумішей (І, ІА, ІВ), опорів струмообмежувального резистора R , Ом, напруг батареї U , В, ємностей C , мкФ. У розрахунках також приймаються припущення про сталість напруги розряду $U_p = 11$ В і струму закінчення перехідного процесу $I_p = 3$ мА.

У разі малих тривалостей ємнісних розрядів замикання $T_p < 1$ мс для визначення мінімальної запалюючої енергії W_3 використовується метод апроксимації за 3-м найближчими напругами і фіксованою тривалістю розряду T_p .

Наприклад, для підгрупи ІВ і $T_p = 46$ мкс запалююча енергія W_3 залежно від U становить: $U = (30; 40; 50)$ В, $W_3 = (0,427; 0,279; 0,211)$ мДж відповідно. Далі знаходять коефіцієнти регресії (28): $ka=2,82$; $kb=-0,07$; $kc=0,15$ і W_3 згідно (28). При $U=43$ В отримано $W_3(43) = 0,252$ мДж. Якщо $W_p > W_3$ – схема є вибухонебезпечною, інакше схема є вибухобезпечною.

$$W_3(U) = ka(U, T_p) \cdot e^{kb(U, T_p) \cdot U} + kc(U, T_p), \quad (28)$$

де $ka(U, T_p)$, $kb(U, T_p)$, $kc(U, T_p)$ залежать від напруги U на ємності CI (рис. 9) і тривалості розряду T_p (W_3 в [мДж], T_p в [мкс]).

У разі тривалостей розряду $T_p > 1$ мс залежності запалюючої енергії розряду від його тривалості $W_3(T_p)$ апроксимовані за допомогою логарифмічної регресії (29), для якої знайдені коефіцієнти апроксимації $a(U)$, $b(U)$, $c(U)$:

$$W_3(T_p) = a(U) \cdot \ln(T_p) + b(U) \cdot \sqrt{T_p} + c(U). \quad (29)$$

де U – напруга заряду конденсатора, В.

Результати для сумішей підгруп І і ІА наведені в табл. 4.

Розрахунками підтверджено, що похибка оцінки іскробезпеки складних ємнісних кіл за розрядами замикання розробленим безкамерним методом не перевищує 10-20 % від оцінок, отриманих за допомогою вибухових камер.

Таблиця 4 - Запалюючі енергії W_3 груп І, ІА залежно від напруги ємнісного кола і часу розряду замикання T_p

Значення коефіцієнтів рівняння регресії	
Суміш І	$a(U) = 3,854 \cdot 10^{-3} \cdot \ln(U) - 6,937 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{U} - 0,01064$
	$b(U) = -0,299 \cdot \ln(U) + 0,051 \cdot \sqrt{U} + 1,027$
	$c(U) = 0,036 \cdot \ln(U) - 6,314 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{U} - 0,1005$
	$W_3(T_p) = a(U) \cdot \ln(T_p) + b(U) \cdot \sqrt{T_p} + c(U)$
Суміш ІА	$a(U) = 5,33832 \cdot 10^{-3} \cdot \ln(U) - 1,00577 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{U} - 0,01417$
	$b(U) = -0,56895 \cdot \ln(U) + 0,09348 \cdot \sqrt{U} + 1,72385$
	$c(U) = 0,05598 \cdot \ln(U) - 0,01050 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{U} - 0,14886$
	$W_3(T_p) = a(U) \cdot \ln(T_p) + b(U) \cdot \sqrt{T_p} + c(U)$

У шостому розділі «Прогнозування іскробезпеки пристроїв на стадії проектування і випробувань, оцінка ефективності спеціальних видів іскрозахисту» міститься опис комп'ютерного методу синтезу параметрів і прогнозу іскробезпеки пристроїв на стадії проектування і випробувань, а також оцінка ефективності спеціальних видів іскрозахисту. У розділі розроблені алгоритм і програма розрахунку, які застосовані до джерел живлення постійного струму.

Інтелектуальні давачі температури, тиску, потоку, а також концентратори і контролери верхнього рівня вимагають досить потужних іскробезпечних джерел живлення. До них належить, наприклад, апаратура автоматизації шахтного водовідливу ААВ-3А В5. Оптимальним рівнем напруги для них є 12 В, в окремих випадках (для віддалених або потужних споживачів) - 24 В, а номінальна сила струму досягає 5А при напрузі 12 В і 3 А при напрузі 24 В.

Наведено опис іскробезпечного блоку живлення і захисту для цифрових систем керування і диспетчеризації ИПИ-24-3, що розроблявся за участю автора. Дослідження розрядів і процесів комутації, а також аварійних режимів дозволили оцінити іскробезпечність підключених до нього кіл.

Структура математичної моделі (рис. 10), що реалізує даний метод, містить джерело електричної енергії 1 з лінійною, трапецоїдною або прямокутною вольтамперною характеристикою на виході, реактивне електричне коло 2 з довільним з'єднанням її елементів (у т.ч. і місткових схем), блок 3 дугового розряду, що враховує динамічну зміну тепловий постійної часу дугового розряду τ і потужності, що відводиться від розряду в залежності від сили струму і напруги комутаційного процесу, конвертор 4 з електричної моделі в теплову, блок 5 результатів розрахунку температурного фронту полум'я, рівного температурі горіння метано-повітряної суміші 2173 К, накопичувачі 6 і 7 інформації, що дозволяють застосувати графічні засоби для виводу результатів або збереження і документування звітів. Для розрахунків у блоках 3 і 4 використовується база теплофізичних властивостей газових сумішей 8 у заданих умовах роботи електрообладнання і база дизайну іскроутворюючого механізму 9, що враховує швидкість і характер розходження контактів, їхні розміри та матеріал.

При комутації однієї з гілок електричного кола, у якій встановлено блок 3 дугового розмикання із заданими параметрами, прораховується виділення енергії розряду $W_p(t)$ і часу його існування T_p , а також залежність миттєвої зміни середньої електричної потужності дуги $P_{cp}(t)$ від часу t . Отримані параметри розряду передаються в теплову модель блоку 4, що визначає розвиток теплового вибуху (наявність або відсутність температурного фронту полум'я горіння). Швидкість розмикання контактів кола, початкова провідність дуги і момент початку розмикання кола визначаються користувачем у діалоговому вікні.

Дослідження проведені на прикладі комутації активно-індуктивного навантаження іскробезпечного блоку живлення типу ИПИ-24-3. Бар'єр іскрозахисту складається з двох силових ключів з незалежним керуванням, що забезпечує дублювання, шунта для виміру сили струму навантаження джерела і схеми керування. Обмеження сили струму досягається за рахунок керування опором ключів. Навантаження з індуктивністю LH і опором RH вимикається у момент часу c_{br} . Результати тестування із застосуванням коефіцієнта іскробезпеки 1,5 зведені в табл. 5.

Ці результати задовільно узгоджуються з безпечними параметрами, отриманими при контрольних випробуваннях у Державному іспитовому сертифікаційному центрі вибухозахищеного і рудникового електрообладнання УкрНДІВЕ (ІСЦ УкрНДІВЕ) (м. Донецьк) (висновок експертизи №1843-2010). Припустимі

параметри іскробезпечних кіл для джерела ИПИ-24-3 склали: індуктивність LH - не більше 0,05 мГн; ємність CH - не більше 10 мкФ.

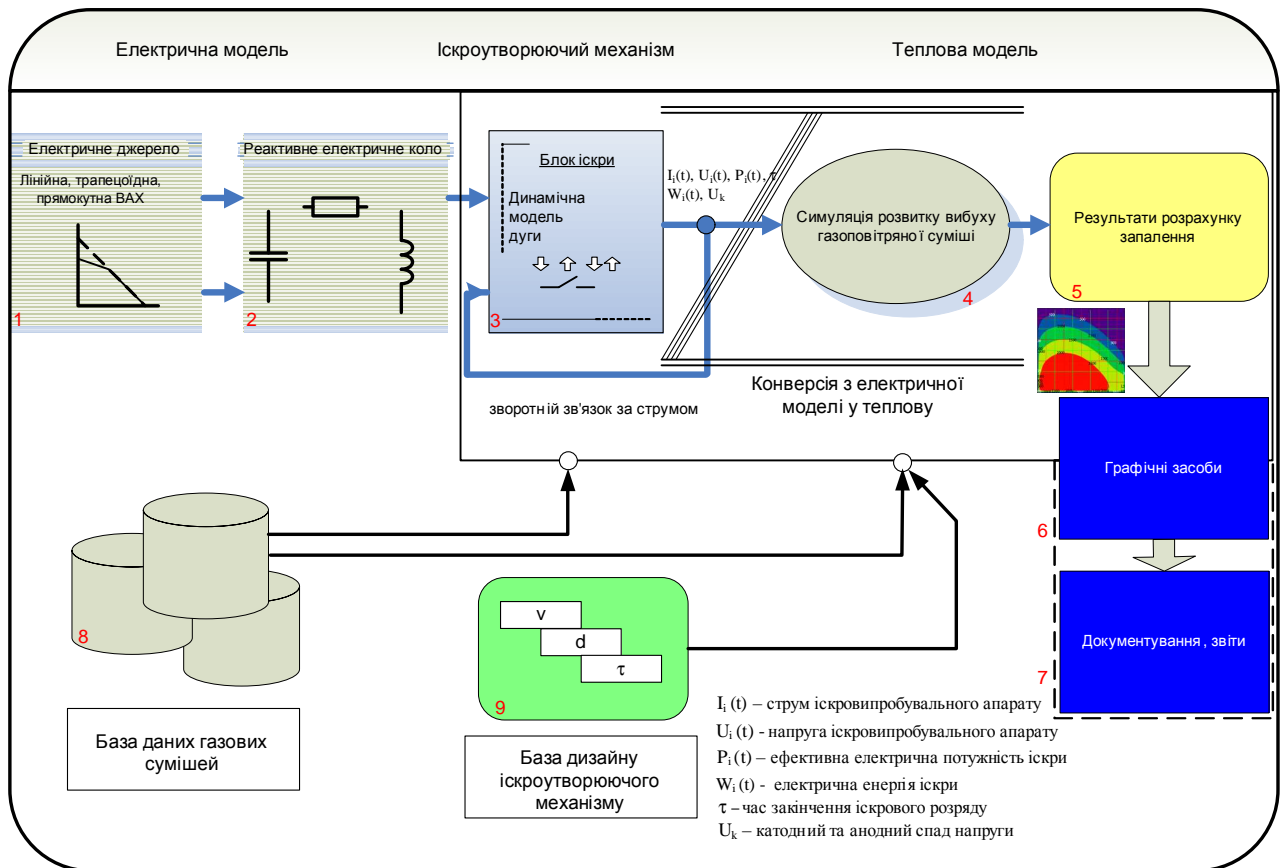


Рисунок 10. Блок - діаграма програмного забезпечення автоматичного аналізу запалення в тестовому електричному колі

Для сімейства іскробезпечних джерел живлення, що працюють відповідно до зазначеного принципу дії, а також джерела живлення АГАТ ВН-24.30 (протокол випробувань №9146-І Іспитового центра МакНДІ, м. Макіївка) з різними уставками струмів статичного відсічення, виконувалися аналогічні оцінки за методом БТО. Результати зведені в табл. 5.

Таблиця 5 - Результати оцінки ІБ джерел ИПИ (з коефіцієнтами запасу за струмом і напругою 1,5)

Тип джерела	Група вибухонебезпечної газової суміші	Максимально припустима зовнішня індуктивність LH , мГн		Максимально припустима зовнішня ємність CH , мкф	
		метод БТО	сертифікат	метод БТО	сертифікат
ИПИ-12-5	I	0,045	0,05	40	50
ИПИ-24-3	I	0,055	0,05	7	10
ИПИ-12-1,3	IIA	0,185	0,1	11	10
ИПИ-24-1,5	IIA	0,13	0,1	3	5
АГАТ ВН-24.30	I	0,022	0,02	6	6

Дослідження, виконані в роботі, дають можливість подальшої розробки способів забезпечення іскробезпеки схем шахтних головних акумуляторних світильників (ШГС).

Сучасні електронні блоки іскрозахисту (БІЗ) ШГС містять електронний ключ із точкою з'єднання до споживача електроенергії, ключ керування електронним ключем, вихід якого підключений до керуючого входу електронного ключа, давач сигналу при перевантаженнях і давач сигналу при комутації, увімкнені послідовно з електронним ключем у канал споживача електроенергії. Їхні виходи зв'язані зі схемою керування електронним ключем.

Давачами сигналу при перевантаженнях і давачами сигналу при комутації є по 1-му способу - резистор, по 2-му способу – трансформатори струму. Ефективність роботи зазначених БІЗ порівнювалася за критерієм відносної чутливості їхніх сприймаючих вузлів у динамічних умовах роботи. Залежності для визначення відносного динамічного коефіцієнта чутливості давачів виділення сигналу БІЗ знайдене як відношення приростів вихідної величини $\Delta y / y$ до вхідної величини $\Delta x / x$: $S_d = \frac{dy(t) / y(t)}{dx(t) / x(t)}$ у безрозмірних одиницях.

Розрахункові схеми давачів БІЗ наведені на рис. 11.

Чутливість давача у динамічному режимі за способом 1: $S_d = \frac{du_d(t) / dt}{u_d(t)} \frac{i(t)}{di(t) / dt} = 1$, тобто це давач пропорційного типу, а за способом 2:

$$S_d = \frac{du_d(t) / dt}{u_d} \frac{i_2(t)}{di_2(t) / dt} = e^{\frac{R_2 t}{L_2}} \left(e^{\frac{-R_2 t}{L_2}} - 1 \right). \quad (30)$$

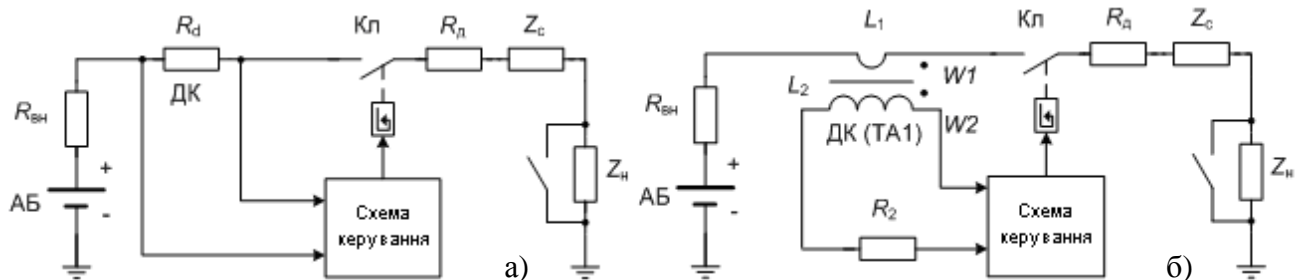


Рисунок 11. Електрична структурна схема шахтного головного акумуляторного світильника: а) з резистивним давачем (БІЗ-4); б) з давачем у вигляді трансформатора струму (БІЗ-2)

З (30) треба знайти відношення постійної часу L_2 / R_2 до тривалості розряду $T_p = 7$ мкс, що визначає величину чутливості давача. Параметри давача струму визначаються критичним значенням співвідношення $\gamma = L_2 / (R_2 T_p) = 1,446$. При $\gamma \leq \gamma_{кр}$ - $S_d \geq 1$, а при $\gamma > \gamma_{кр}$ - $S_d < 1$, тобто динамічна чутливість гірше в порівнянні із пропорційним давачем за способом 1.

Оцінка аварійних режимів блоків іскрозахисту ШГС була отримана з використанням моделей дугового розряду. Результати тестування показують, що блок іскрозахисту БІЗ-2 у всіх розглянутих режимах роботи (номінальних та аварійних) забезпечує іскробезпечність світильників, тому що енергія розрядів W_p не перевищують мінімальної енергії запалювання метано-повітряної суміші - 0,28 мДж. Блок іскрозахисту БІЗ-4 має гірші параметри і може забезпечити безпечну роботу світильника тільки за номінальним струмом, що не перевищує 0,75 А.

Ефективність застосування змінних струмів високої частоти визначається тим, що електричні параметри, необхідні для запалювання газової суміші, підвищуються в колах із частотами більше декількох кілогерців. Це в першу чергу пов'язане з інтенсивною деіонізацією іскри при перетинанні нульового рівня струму.

Необхідну схему для дослідження параметрів розряду в іскробезпечному колі синусоїдального джерела живлення високої частоти заданої конфігурації можна одержати в пакеті Simulink - моделі програмного комплексу MATLAB 6.5 (рис. 12).

Для кожної моделі дугового розряду згідно розд. 2 записується окреме диференціальне рівняння і заноситься до редактору DEE:

model 0 v

$$dx/dt = u(2) * (1/u(5)) * (\exp(x(1)) * (u(1)^2 / (u(3) * (8 + ad * v * u(4)) + bd * v * u(4))) * 2 * \pi * f * u(5) - 1)$$

model 1 v

$$dx/dt = u(2) * (1/u(5)) * ((\exp(x(1)) * u(1)^2 - (u(3) * (8 + ad * v * u(4)) + bd * v * u(4))) * 2 * \pi * f * u(5) / \exp(x(1)) / (8 + (ad + bd/u(3)) * v * u(4))^2 - 1).$$

model c

$$dx/dt = u(2) * (1/u(5)) * (\exp(x(1)) * (u(1)^2 / (u(3) * (8 + ad * v * u(4)) + bd * v * u(4))) - 1).$$

Дослідження дуги проводилося при наступних параметрах, що відповідають експериментальним даним Л. І. Гаврільченко: опір кола $R = 85$ Ом; індуктивність кола $L = 210, 110, 36, 7$ мкГн; швидкість розмикання $v = 6,5$ м/с; досліджувана частота варіюється в межах від 5000 до 70000 Гц.

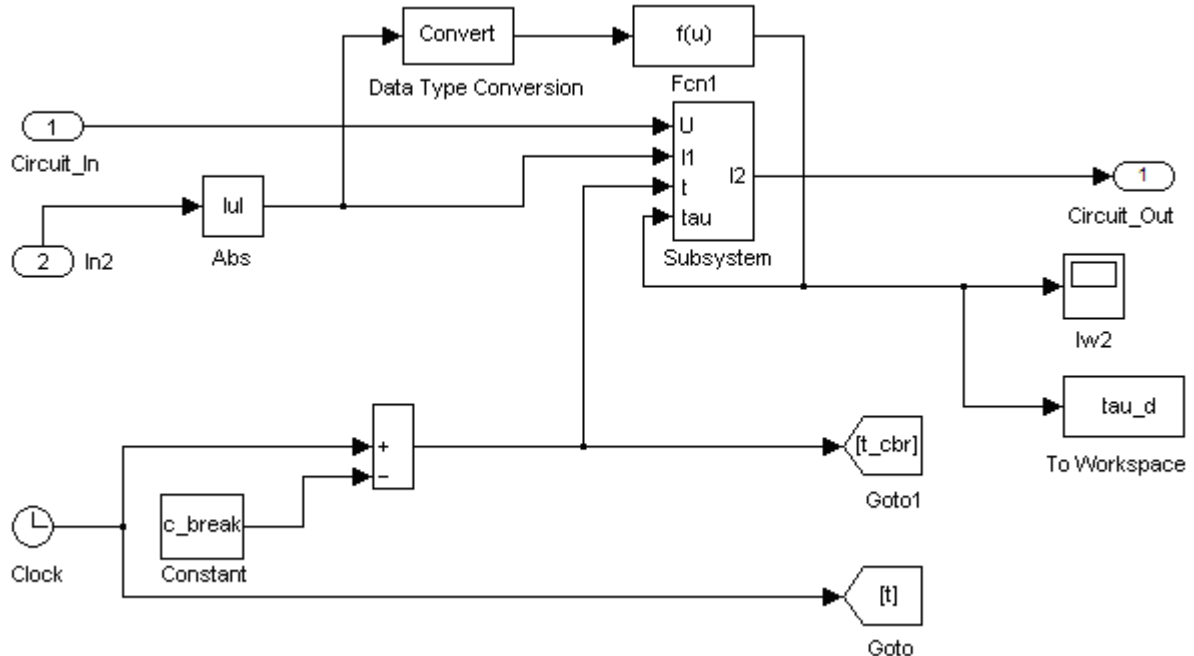


Рисунок 12 - Розрахункова схема для моделювання слабкострумової дуги змінного струму

Уперше встановлено, що для розрахункових схем електричного розряду в змінних високочастотних і імпульсних електричних колах доцільно використати модифіковані моделі дуги у вигляді «чорної скриньки» (табл. 1), які враховують узагальнені параметри охолоджуючої потужності і постійної часу теплової іонізації плазми залежно від провідності дуги.

Для діапазону розрахункових частот від 5000 Гц до 20000 Гц найбільш точної є *model0_v*, а для частот від 20000 Гц до 70000 Гц кращі результати за точністю показала *modell1_v*, що враховує пропорційне збільшення охолоджуючої потужності з ростом частоти живлення електричного кола.

Параметри дуги при живленні електричного кола напругою високої частоти показують, що тривалість іскріння залежить від числа проходів струму через нуль. Також відзначено, що за однакових умов комутації тривалість розряду T_p зменшується з ростом f . Зі збільшенням індуктивності зменшується частота за якої настає максимум струму. Відзначено, що при малих значеннях індуктивності можна одержати десятикратне підвищення іскробезпечного струму.

Уточнено методику визначення енергії дугового розряду при іскрінні в лінії системи імпульсного живлення з 1-фазним випрямлячем синусоїдального струму, що враховує швидкість комутації і час розряду. Це дозволило провести порівняльну оцінку ефективності даного виду забезпечення іскробезпеки і системи живлення постійним струмом з іскрозахисним діодним шунтуванням.

Результати оцінних розрахунків визначили область можливого використання даних систем імпульсного іскробезпечного живлення. Для $U = 12$ В імпульсне живлення буде вигідніше використовувати при початковому струмі дуги $I = 1$ А з параметром $m > 3,25$, а для $I = 0,15$ А - $m > 7$; для $U = 24$ В, $I = 1$ А з параметром $m > 3,75$, а для $I = 0,15$ А - $m > 4,1$; для $U = 100$ В, $I = 1$ А з параметром $m > 2,5$, а для $I = 0,15$ А - $m > 3,5$ (m – відношення індуктивного опору кола до активного).

Апробації запропонованих програмних продуктів показали, що вони дають можливість найбільш точно в порівнянні з існуючими попередніми методами безкамерної оцінки та у найкоротший термін з мінімальними витратами оцінити іскробезпечність електричних кіл поданої для аналізу апаратури.

Прибуток від впровадження математичної моделі при вартості випробувань одного виробу за допомогою вибухової камери в межах 15 тис. грн. становить 10344 грн. / рік. Розрахунок прибутковості проекту методом чистої дисконтованої вартості показує, що величина внутрішньої ренти становить 65%, що вище передбачуваної величини ставки позичкового відсотка 15%. Таким чином, інвестиція вигідна.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі дано розв'язання актуальної науково-технічної проблеми, що полягає у забезпеченні безпеки людей, що працюють із електрообладнанням у вугільних шахтах, шляхом розкриття закономірностей розвитку теплового вибуху від електричного розряду, отримання нових залежностей енергії, що виділяється в розряд і мінімальної запальноючої енергій від умов комутації електричних кіл, впливу іскрозахистих електронних компонентів в аварійному режимі роботи та розробці на цій основі вискоефективних методів створення іскробезпечної апаратури. Ці результати в цілому істотно спрощують і надійно забезпечують вибір оптимальних параметрів іскробезпечної апаратури, яка б задовольняла нормативним умовам ТБ і Держстандартів на стадії проектування.

Основні наукові і практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Проаналізовано існуючий науковий рівень методів оцінки, розробки і сертифікації ІБ кіл. Виявлено, що існує необхідність створення достовірних безкамерних методів оцінки іскробезпеки складних електричних кіл з параметрами, які динамічно змінюються і переважають у сучасному електрообладнанні та не можуть бути попередньо оцінені на іскробезпеку за існуючими методами і хара-

ктеристиками ДСТ.

2. Вперше для розрахункової оцінки іскробезпеки електричних кіл використана модель дугового розряду за рівнянням Майра, враховуюча теплофізичні параметри стовпа плазми. Це дозволило створити розрахункові моделі різних видів комутації, придатні для оцінки ІБ, у т.ч. і для систем зі скороченою тривалістю розряду. Уперше наведені розрахункові залежності теплових параметрів слабкострумового дугового розряду в іскробезпечних колах від потужності циліндричного джерела, довжини дугового стовпа, його радіуса і часу розряду.

3. Обґрунтовано та розроблено розрахунковий метод «безкамерної теплової оцінки» іскробезпеки електричних кіл (патент 55718 України), що враховує вплив обмежувальних елементів схем захисту, слабкострумового розряду, механізму запалення метано-повітряної суміші від джерела заданої потужності і тривалості, а також параметрів іскроутворюючого механізму; отримані аналітичні і чисельні рішення сіткових задач розвитку та припинення температурного фронту теплового вибуху, що дозволило впровадити експрес-метод прискореної оцінки електричних кіл будь-якої складності з різним способом завдання вихідних даних і використати його при пошуку оптимальних варіантів схем за швидкістю і енергії, що виділяється.

Запропоновані рішення скорочують час проектування і випробувань нових типів іскробезпечної апаратури приблизно в 5 разів.

4. Дістало подальший розвиток аналітичне обґрунтування залежності енергії розряду від параметрів джерела живлення, реактивних навантажень, шунтувальних елементів і вузлів «випереджального» динамічного захисту на межі запалення. Область малих тривалостей розряду ($T_p < 40$ мкс) не була раніше врахована в наявному експериментальному матеріалі.

Шляхом симуляційного аналогового моделювання на ЕОМ отримане наочне уявлення про вплив того чи іншого способу забезпечення ІБ схеми на процеси розвитку мінімального ядра полум'я при запалюванні газоповітряної суміші на іскроутворюючому механізмі із заданими параметрами. Це дозволяє вибирати заздалегідь необхідний рівень навантаження, кількісно визначати допустимість підключення зовнішнього кола до джерела живлення з мінімальними витратами в найкоротший термін.

5. Встановлена закономірність розвитку найнебезпечнішого виду розряду замикання в складному ємнісному та індуктивно-ємнісному колі на основі схем заміщення пробою іскрового проміжку, а також отримані залежності запалюючої енергії розряду від його тривалості і напруги кола.

Розроблено метод безкамерної оцінки іскробезпеки складних ємнісних, а також індуктивно-ємнісних кіл, що відрізняється від відомих тим, що при заданій напрузі заряду ємнісних елементів визначається енергія, яка виділилася з розряду W_p і час розряду T_p , а потім ці параметри порівнюються із запалюючими.

6. Вперше встановлено, що для розрахункових схем електричного розряду в змінних високочастотних і імпульсних електричних колах доцільно використовувати моделі дуги у вигляді «чорної скриньки», які враховують узагальнені параметри охолоджуючої потужності і постійної часу теплової інерції плазми залежно від провідності дуги, а також від частоти електромережі.

7. Запропоновано метод порівняльної оцінки і встановлення критичних параметрів високої відносної чутливості давачив сприймаючих вузлів, які використовуються у блоках іскрозахисту головних акумуляторних світильників з індуктивним, резистивним давачем і електронним ключем у динамічних режимах

роботи. На підставі цього обрані параметри блоків іскрозахисту, реалізовані у виробач, що випускаються серійно. Це дозволило збільшити припустиму навантажувальну здатність пристрою іскрозахисту такого типу.

8. Розроблено уніфіковану математичну модель оцінки безпеки об'єднаних ІБ систем, що враховують окремо або в комплексі 3 типи вихідних характеристик джерел (лінійна, трапецоїдна, прямокутна) при проектуванні вимірювальних і технологічних виробництв у хімічній і нафтогазовій промисловості.

9. Розроблено галузевий нормативний документ «Методика розрахункової оцінки іскробезпеки слабкострумових кіл постійного струму, схем і блоків іскрозахисту рудникового електрообладнання», що є засобом попередньої оцінки розроблювальних апаратур. Це значно скорочує строки її впровадження в промисловість і дозволяє максимально використати припустимий іскробезпечний рівень потужності кола.

Результати роботи використані в спеціалізованому конструкторському бюро НВО «Світло шахтаря» і ЗАТ «Донецька інжинірингова група» при виборі оптимальних за швидкодією і припустимій потужності параметрів розроблювального іскробезпечного електрообладнання шляхом порівняння можливих схемних рішень.

З урахуванням результатів роботи розроблено іскробезпечний блок живлення і захисту для цифрових систем керування і диспетчеризації ИПИ-24-3 (патент 69718 України).

10. Економічний ефект роботи полягає у скороченні часу проектування, розробки, сертифікації та впровадження в експлуатацію електрообладнання з видом вибухозахисту «іскробезпечне електричне коло». Прибуток від впровадження комп'ютерного стенда - програмного комплексу при вартості випробувань одного виробу за допомогою вибухової камери в межах 15 тис. грн. становить 10344 грн. / рік.

Соціальний ефект застосування отриманих результатів виконаних досліджень полягає у тому, що може бути знижений рівень і частота негативних проявів, які викликані технічними, економічними, соціальними наслідками вибухів, у доступності апробованих методів безкамерної оцінки, що не вимагає роботи з вибухонебезпечними речовинами, збільшенні іскробезпечної потужності і надійності апаратур з видом вибухозахисту «іскробезпечне електричне коло», що сприяє підвищенню рівня автоматизації виробництва і виключення небезпечних для здоров'я обслуговуючого персоналу факторів, пов'язаних зі знаходженням на вибухонебезпечних об'єктах.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Бершадский И.А. Моделирование влияния динамической индуктивности на ограничение энергии искрового разряда в аппаратах управления переменного тока / И.А. Бершадский, С.В. Шлепнев, А.В. Тоцкий // Збірник наукових праць ДонНТУ. - Серія "Електротехніка і енергетика". - Донецьк: ДонНТУ, 2005. – Випуск 98. - С.57-62.

2. Бершадский И.А. Сферическая модель воспламенения электрической искрой газовой смеси для оценки искробезопасности электрических цепей рудничного электрооборудования / И.А. Бершадский, М.С. Клименко, З.М. Иохельсон // Збірник наукових праць ДонНТУ. - Серія "Електротехніка і енергетика". - Донецьк: ДонНТУ, 2006. – Випуск 112. - С.126-131.

3. Иохельсон З.М. Расчетная модель воспламенения метано-воздушной смеси электрической искрой цилиндрической формы / З.М. Иохельсон, И.А. Бе-

ршадский, А.В. Неледва // Збірник наукових праць ДонНТУ. - Серія "Електротехніка і енергетика". - Донецьк: ДонНТУ, 2007. - Випуск 7(128). – С. 215-220.

4. Иохельсон З.М. Влияние параметров искры на воспламенение метано-воздушной смеси / З.М. Иохельсон, И.А. Бершадский // Уголь Украины. - 2007. - №9. - С. 44-46.

5. Иохельсон З.М. Модель дугового размыкания искробезопасной цепи постоянного тока / З.М. Иохельсон, И.А. Бершадский // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах. Сборник научных трудов МакНИИ. - Выпуск 20: Макеевка, 2007. – С. 178-185.

6. Иохельсон З.М. Предотвращение пожаров в шахтах от электрических искр рудничного электрооборудования / З.М. Иохельсон, О.И. Кашуба, И.А. Бершадский // Науковий вісник УкрНДПБ. - Випуск №2(16): Київ, 2007. - С. 23-27.

7. Иохельсон З.М. Расчетная оценка искробезопасности цепей постоянного тока рудничного электрооборудования / З.М. Иохельсон, О.И. Кашуба, И.А. Бершадский // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут", випуск 16: Київ, 2008. - С. 98-103.

8. Бершадский И.А. Симуляция переходных процессов в искробезопасных цепях горношахтного электрического оборудование и прогнозирование опасности воспламенения газовой смеси / И.А. Бершадский, Д.В. Северин // Вісті Донецького гірничого інституту.- Донецьк: ДонНТУ, 2008. - №2. - С. 178-183.

9. Иохельсон З.М. Метод оценки искробезопасности омических и индуктивных цепей постоянного тока / З.М. Иохельсон, И.А. Бершадский // Уголь Украины. – 2008. - №11. – С. 31-35.

10. Иохельсон З.М. Оценка влияния электродов при моделировании воспламенения газовой смеси от искрового разряда / З.М. Иохельсон, И.А. Бершадский // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах. Сборник научных трудов МакНИИ. - Выпуск 1(21): Макеевка, 2008. – С. 122-129.

11. Иохельсон З.М. Предотвращение пожаров в шахтах от электрических искр в омических и индуктивных цепях постоянного тока / З.М. Иохельсон, О.И. Кашуба, И.А. Бершадский // Науковий вісник УкрНДПБ. - Випуск №1(17), Киев, 2008. - С. 115-125.

12. Бершадский И.А. Использование программного обеспечения для прогнозирования воспламенения метановоздушной смеси в тестовой электрической цепи постоянного тока / И.А. Бершадский, З.М. Иохельсон, Е.И. Советова // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах. Сборник научных трудов МакНИИ. - Выпуск 1 (23): Макеевка, 2009. – С. 55-69.

13. Ковалев А.П. Моделирование параметров разряда и расчетная оценка искробезопасности при размыкании электрической цепи / А.П. Ковалев, И.А. Бершадский, З.М. Иохельсон // Электричество. – 2009. - №11. – С. 62-69.

14. Бершадский И.А. Развитие методики расчетной оценки взрывобезопасности электрических разрядов / И.А. Бершадский, З.М. Иохельсон, Т.А. Бондаренко // Уголь Украины. -2009. - №4. – С.25-28.

15. Бершадский И.А. Предельные условия воспламенения рудничного газа в искробезопасных емкостных электрических цепях / И.А. Бершадский, Д.В. Северин // Збірник наукових праць ДонНТУ. - Серія "Електротехніка і енергетика". - Донецьк: ДонНТУ, 2009. – Випуск 9(158). - С.15-20.

16. Бершадский И.А. Расчет параметров разряда для оценки искробезопасности емкостных цепей / И.А. Бершадский // Уголь Украины. - 2010. - №12. - С. 33-36.
17. Бершадский И.А. Разработка алгоритма компьютерной оценки искробезопасности рудничных слаботочных электрических цепей с ферромагнитными сердечниками / И.А. Бершадский // Взрывозащищенное электрооборудование: Сб. научных трудов УкрНИИВЭ. –Донецк, 2010. - С. 305 – 314.
18. Бершадский И.А. Методика оценки искробезопасности индуктивно-емкостных цепей группы I / И.А. Бершадский // Збірник наукових праць ДонНТУ. - Серія "Електротехніка і енергетика". - Донецьк: ДонНТУ, 2011. – Випуск 10 (180). - С.12-17.
19. Бершадский И.А. Выбор параметров датчика короткого замыкания в искробезопасных схемах шахтных головных аккумуляторных светильников / И.А. Бершадский // Збірник наукових праць ДонНТУ. - Серія "Електротехніка і енергетика". - Донецьк: ДонНТУ, 2011. – Випуск 11 (186). - С.45-49.
20. Бершадский И.А. Сравнительный анализ способов обеспечения искробезопасности шахтных головных аккумуляторных светильников / И.А. Бершадский, Г.Л. Федоренко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. - Серія гірничо-електромеханічна. - Донецьк: ДонНТУ, 2011. - випуск 21 (189). - С.3-13.
21. Бершадский И.А. Тестирование метода бескамерной тепловой оценки искробезопасности схемы источника питания / Бершадский И.А., Дубинский Ал.А. // Взрывозащищенное электрооборудование: Сб. научных трудов УкрНИИВЭ. –Донецк, 2011. - С. 230 – 240.
22. Бершадский И.А. Исследование воспламеняющей способности электрических разрядов в устройствах, питаемых напряжением высокой частоты 5-60 кГц / И.А. Бершадский, Ал. А. Дубинский, С.В. Солёный, Е.А. Кравец // Збірник наукових праць ДонНТУ. - Серія "Електротехніка і енергетика". - Донецьк: ДонНТУ, 2012. – Випуск 1(12)-2(13). - С.13-19.
23. Бершадский И.А. Усовершенствование метода пересчета воспламеняющих параметров взрывоопасных смесей в искробезопасных электрических цепях / И.А. Бершадский, Е.А. Тукмачева // Науковий вісник національного гірничого університету. – Дніпропетровськ: НГА, 2012. - №2(128). – С. 54-58.
24. Бершадский И.А. Расчетный метод бескамерной тепловой оценки искробезопасности электрических цепей / И.А. Бершадский // Електротехніка. – 2013. - №8. – С. 15-23.
25. Бершадский И.А. Оценка искробезопасности электрических систем во взрывоопасных зонах промышленных предприятий/ И.А. Бершадский // Безопасность труда в промышленности. - 2013. - №5. - С. 48-53.
26. Кормильцев П.В. Оценка возможности повышения искробезопасной мощности при импульсном питании / П.В. Кормильцев, И.А. Бершадский // Збірник наукових праць ДонНТУ. - Серія "Електротехніка і енергетика". - Донецьк: ДонНТУ, 2013. - Випуск 1(14). - С.108-113.
27. Бершадский И.А. Разработка методики сертифицирования и конструирования блоков искрозащиты рудничного электрооборудования / И.А. Бершадский, А.Ю. Гладков, Л.С. Соломатина // Збірник наукових праць ДонНТУ. - Серія "Електротехніка і енергетика". - Донецьк: ДонНТУ, 2013. - Випуск 1(14). - С.23-28.
28. Бершадский И.А. Обеспечение искробезопасности в системах автоматизации, предназначенных для взрывоопасных сред / И.А. Бершадский, Т.А. Бо-

ндаренко // Науково-технічний журнал "Інженер". – Донецьк ДонНТУ, 2008. - С. 16-19.

29. Пат. 55718 Україна, МПК E21F 9/00. Спосіб розрахункової оцінки іскробезпечності електричних кіл рудничного устаткування / Бершадський І.А. - № 201006385; заявл. 25.05.10; опубл. в Бюл., 2010, №24.

30. Пат. 69718 Україна, МПК E21F 9/00, G05F 1/59. Іскробезпечне джерело живлення / Бершадський І.А., Дубінський Ол.А., Власов В.Д.-№ 201112659; заявл. 28.10.11; опубл. в Бюл., 2012, №9.

31. Пат. 72224 Україна, МПК H01R 9/00. Електромонтажна коробка для побутових електромереж / Сольона О.Я., Ковальов О.П., Гудим В.І., Демченко Г.В., Бершадський І.А. - № 201201272; заявл. 07.02.2012; опубл. в Бюл., 2012, №15.

32. Кормильцев П.В. Интеллектуальный, искробезопасный источник питания с изменяющимися уставками и постоянным контролем параметров сети. / П.В. Кормильцев, Бершадский И.А. // Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте '2012». – Выпуск 2. Том 5. - Одесса: КУПРИЕНКО, 2012. – ЦИТ: 212-481, С. 63-68.

33. Бершадський І.А. Розробка методу оцінки кіл з нелінійними індуктивностями та іскробезпечними трансформаторами / І.А. Бершадський, А.В. Петрова // Вісник кафедри «Електротехніка» за підсумками Всеукраїнської науково-технічної конференції «Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка», Донецьк, 2010, С. 102-104.

34. Тукмачева Е.А. Эффективность использования искробезопасной системы питания для индуктивной нагрузки / Е.А. Тукмачева, И.А. Бершадский // Автоматизація технологічних об'єктів та процесів. Пошук молодих. Збірник наукових праць XI науково-технічної конференції аспірантів та студентів в м. Донецьку 17-20 травня 2011 р. - Донецьк, ДонНТУ, 2011, С. 78-79.

35. Бершадский И.А. Методика расчетной оценки искробезопасности цепей постоянного тока рудничного оборудования / И.А. Бершадский, Л.С. Соломатина // Перспективні напрямки української науки: Збірник статей 19-ої всеукраїнської науково-практичної конференції «Інноваційний потенціал української науки XXI сторіччя» 26.02 - 6.03 2013 р. – Запоріжжя, Видавництво ПГА, С.60-62.

АНОТАЦІЯ

Бершадський І.А. Розвиток наукових основ і методів створення іскробезпечного електрообладнання для підвищення безпеки праці гірників. - На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.26.01 - Охорона праці. - Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», Донецьк, 2014.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-технічної проблеми, яка полягає у забезпеченні безпеки людей, працюючих з електрообладнанням у вугільних шахтах, шляхом розкриття закономірностей розвитку теплового вибуху від електричного розряду, отримання нових залежностей енергії, що виділяється в розряд і мінімальної запальної енергії від умов комутації електричних кіл, впливу іскрозахисту електронних компонентів в аварійному режимі роботи та розробці на цій основі високоефективних методів створення іскробезпечної апаратури. Ці результати істотно спрощують і надійно забезпе-

чують вибір оптимальних параметрів іскробезпечної апаратури, яка б максимально задовольняла нормативним умовам ТБ і Держстандартів на стадії проектування.

Обґрунтовано і створено новий принцип конструювання та проведення сертифікаційних випробувань апаратури з видом вибухозахисту «іскробезпечне електричне коло», сутність якого полягає у розробці високоточного способу розрахункової оцінки іскробезпеки кіл різних класів складної конфігурації, а також у використанні структурних безпечних елементів, таких як джерела живлення, лінії зв'язку і навантаження.

Наукові положення і результати стали основою для вдосконалення моделі дугового розряду в частині встановлення характеру зміни теплової постійної часу від струму і довжини, що дозволило значно підвищити вірогідність розрахункових методів оцінки іскробезпеки з використанням вольт-амперних характеристик у динамічних режимах комутації.

Розроблена і затверджена «Методика розрахункової оцінки іскробезпеки слабкострумівих кіл постійного струму, схем і блоків іскрозахисту рудникового електрообладнання», яка дозволяє з високою точністю проводити безкамерні оцінки пристроїв з динамічними «випереджальним» і «шунтовим» захистами, у зв'язку з чим значно зменшуються трудомісткість випробувань.

Ключові слова: іскробезпека, електричний розряд, електричне коло, тепловий вибух, безкамерна оцінка іскробезпеки, джерело живлення, методи сертифікації, вибухозахищене електрообладнання, модель дугового розряду, перерахунок енергії

АННОТАЦІЯ

Бершадский И.А. Развитие научных основ и методов создания искробезопасного электрооборудования для повышения безопасности труда горнорабочих. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.26.01 – Охрана труда. – Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», Донецк, 2014.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научно-технической проблемы, состоящей в обеспечении безопасности людей, работающих с электрооборудованием на угольных шахтах, путем раскрытия закономерностей развития теплового взрыва от электрического разряда, получения новых зависимостей выделяемой в разряд и минимальной воспламеняющей энергии от условий коммутации электрических цепей, влияния искрозащиты электронных компонентов в аварийном режиме работы и разработке на этой основе высокоэффективных методов создания искробезопасной аппаратуры. Эти результаты существенно упрощают и надежно обеспечивают выбор оптимальных параметров искробезопасной аппаратуры, которая бы максимально удовлетворяла нормативным условиям ТБ и Госстандартов на стадии проектирования.

Получено комплексное теоретическое обоснование условий и критериев теплового воспламенения метано-воздушной смеси электрическими слаботочными разрядами и установлены закономерности появления опасных факторов, вызывающих воспламенение газовой смеси в искробезопасных цепях рудничного взрывозащищенного оборудования. На основе этих результатов достигнута возможность повышения эффективности способов обеспечения искробезопасности на стадии разработки и проектирования.

Исследованы процессы очагового зажигания метано-воздушной смеси под воздействием слаботокового электрического разряда на основе дифференциальных выражений тепловых балансов и массопереносных диффузных явлений. Согласно тепловой теории воспламенения предложена её математическая формулировка, базирующаяся на одновременном учете явлений теплопроводности и диффузии при наличии экзотермической химической реакции окисления метано-воздушной смеси. Раскрыт механизм электрического зажигания метано-воздушной смеси от источника постоянной либо переменной во времени мощности, который позволяет учитывать изменение теплофизических параметров газовой смеси от температуры и влияние на воспламенение диаметра и скорости расхождения электродов с подвижной граничной координатой, а это, в свою очередь, дает возможность повысить точность расчетов для сложных индуктивных цепей.

Обоснован и создан новый принцип конструирования и проведения сертификационных испытаний аппаратуры с видом взрывозащиты «искробезопасная электрическая цепь», сущность которого состоит в разработке высокоточного способа расчетной оценки искробезопасности цепей разных классов сложной конфигурации, а также в использовании структурных безопасных элементов, таких как источники питания, линии связи и нагрузка.

Научные положения и результаты стали основой для совершенствования модели дугового разряда в части установления характера изменения тепловой постоянной времени от его тока и длины, что позволило значительно повысить достоверность расчетных методов оценки искробезопасности с использованием вольт-амперных характеристик в динамических режимах коммутации.

Изложены исследования по разработке и тестированию нового метода расчетной компьютеризированной оценки искробезопасности электрических цепей, содержащих индуктивно-емкостные элементы с помощью разработанной математической модели однопробойного разряда замыкания.

Уточнены зависимости для определения области повышенной искробезопасной мощности в системах питания синусоидальным напряжением ВЧ и импульсным 1-фазным выпрямленным током.

Получил развитие метод аналитического пересчета энергии и длительности разряда электрической искры, определяющий опасность искрения в более агрессивных, чем метано-воздушная смесь подгрупп ПА, ПВ.

Предложен метод сравнительной оценки воспринимающих узлов блоков искрозащиты шахтных головных светильников и выбраны их параметры, оптимальные по максимальной относительной чувствительности.

Расчет доходности проекта методом чистой дисконтированной стоимости показывает, что инвестиции в переход на численный метод оценки искробезопасности электрооборудования выгоден.

Результаты исследований внедрены в специализированном конструкторском бюро НПО «Свет шахтера» и ЗАО «Донецкая инжиниринговая группа» при выборе оптимальных по быстродействию и допустимой мощности параметров разрабатываемого искробезопасного электрооборудования путем сравнения возможных схемных решений.

Предложенные методики оценки искробезопасных электрических цепей и цепей связанного электрооборудования во взрывоопасных зонах и программные продукты применяются в Испытательном сертификационном центре взрывозащищенного электрооборудования УкрНИИВЭ и Акредитованном испытательном центре МакНИИ для предварительной оценки искробезопасности электри-

ческих цепей и выбора наиболее опасных испытательных режимов проверки во взрывных камерах.

Разработана и утверждена «Методика расчетной оценки искробезопасности слаботочных цепей постоянного тока, схем и блоков искрозащиты рудничного электрооборудования».

Ключевые слова: искробезопасность, электрический разряд, электрическая цепь, тепловой взрыв, бескамерная оценка искробезопасности, источник питания, методы сертификации, взрывозащищенное электрооборудование, модель дугового разряда, пересчет энергии

ABSTRACT

Bershadsky I.A. Development of scientific basis and methods for the creation of intrinsically safe electrical equipment to improve the safety of coal miners.- As the manuscript.

Dissertation on gaining of scientific degree of doctor of engineering sciences after specialty 05.26.01 – Labour protection – State university «Donetsk National Technical University», Donetsk, 2014.

The dissertation work is dedicated to the solution of actual scientific and applied problems. It is to ensure the safety of electrical systems for miners, by revealing patterns of development of thermal explosion of an electrical discharge. This requires the acquisition of new dependencies of the energy released in the discharge, and the minimum ignition from electrical switching conditions, the influence of intrinsically safe electronic components in the emergency operation and development on this basis of efficient methods for creating intrinsically safe equipment. These results greatly simplify and reliably provide a choice of optimal parameters intrinsically safe equipment that would satisfy the statutory conditions as safety regulations and State Standards in the design stage.

Possibility is proved and the new principle of designing and carrying out certified tests of equipment with a look of intrinsically safe circuit which consists in development of a high-precision way of a settlement assessment of an intrinsic safety of a complex configuration, and also in use of structural safe elements, such as the power supply, communication lines and loading is created.

Both research and practical findings became a basis for improvement of model of an arc regarding establishment of nature of change of a thermal constant of time from a current and length of an arch that allowed to increase considerably reliability of method for calculated assessment of spark safety of electric circuits of mine equipment in dynamic modes of switching.

The technique of a settlement "Method for calculated assessment of spark safety of electric circuits of a direct current, schemes and blocks of mine equipment» which allows to carry out with high precision tubeless estimates of devices with dynamic protection is developed and approved.

Key words: intrinsically safe, electric discharge, electric circuit, thermal explosion, tubeless intrinsically safe assessment, power source, methods of certification, electrical arc model, the energy conversion