

УДК [622.673.1: 681.514.54]  
DOI 10.31471/1993-9981-2022-1(48)-103-108

## РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЗАПАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ НИЗЬКОВОЛЬТНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КІЛ

*В.В. Лопатін*

*Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України  
вул. Сімферопольська 2а, м Дніпро, 49005. тел. (0562) 46-01-51, факс (0562)46-24-26  
e-mail [vlop@ukr.net](mailto:vlop@ukr.net), [nanu@igtm.dp.ua](mailto:nanu@igtm.dp.ua)*

У статті отримано нові наукові знання про процес запалювання вибухонебезпечної суміші низьковольтним вимірювальним колом (НВК), на основі яких у перспективі могли б розробити досконаліший галузевий документ, наприклад, новий ДСТУ або ДЕСТ.

Прямий спосіб електровимірювальної оцінки іскробезпеки досконаліший, оскільки дозволяє безпосередньо визначити максимум енергії електричного розряду за час, встановлений критерієм, тобто параметр, що визначає займисту здатність електричного розряду електричного ланцюга НВК. Труднощі реалізації такого підходу полягають в складності створення електричної моделі розряду, що копіює реальний розряд у НВК, яка повністю відповідала б реальному іскроутворенню і враховувала б найбільш небезпечні шахтні умови вугільного вибою.

Пропонується спосіб непрямого контролю вимірювання параметра, що визначає запальну здатність електричного розряду НВЦ. Отримано просту аналітичну залежність, що дозволяє з достатньою для практики точністю оцінити запальну здатність НВЦ від його довжини. Запропоновано спосіб класичного моделювання запальної здатності НВЦ, а також оригінальний спосіб імітаційного моделювання. У статті показано апробацію даних досліджень на двох зарубіжних конференціях та інтерес до них зарубіжних колег в Австралії та Іраку.

**Ключові слова:** низьковольтне вимірювальне коло (НВЦ), оцінка іскробезпеки, запальна здатність, математична модель, класичне та імітаційне моделювання, спосіб непрямого контролю.

The article obtained new scientific knowledge about the process of ignition of an explosive mixture by a low-voltage measuring circuit (LVC), on the basis of which a more advanced industry document could be developed in the future, for example, a new DSTU or DEST. A method is proposed for indirect control of the measurement of a parameter that determines the incendiary ability of the LVC electric discharge.

The direct method of electrical measurement of intrinsic safety is more perfect, as it allows you to directly determine the maximum energy of the electric discharge for the time set by the criterion, ie the parameter that determines the flammability of the electric discharge of the electrical circuit. The difficulty of implementing this approach is the difficulty of creating an electric model of the discharge, which copies the real discharge in the NEC, which would fully correspond to the real sparking and would take into account the most dangerous mine conditions of coal face.

A simple analytical dependence has been obtained, which makes it possible to estimate the incendiary ability of an LVC on its length with sufficient accuracy for practice. A method for the classical modeling of the incendiary ability of the LVC is proposed, as well as an original method for simulation. The article shows the approbation of research data at two foreign conferences and the interest of foreign colleagues in Australia and Iraq in them.

**Keywords:** low-voltage measuring circuit (LVC), intrinsic safety assessment, incendiary ability, mathematical model, classical and simulation modeling, indirect control method.

### Вступ

Як відомо, [1, 2, 3] існує електровимірювальна оцінка іскробезпеки низьковольтного вимірювального кола (НВК), та можливі два способи вимірювання: прямий і непрямий спосіб вимірювання параметра, який

визначає запальну здатність електричного розряду НВК.

Прямий спосіб досконаліший, оскільки дозволяє безпосередньо визначити максимум енергії електричного розряду за критеріальний час, тобто параметр, що визначає займисту здатність електричного розряду електричного

ланцюга НВК. Труднощі реалізації такого підходу полягають в складності створення електричної моделі розряду, що копіює реальний розряд у НВК, яка повністю відповідала б реальному іскроутворенню і враховувала б найбільш небезпечні шахтні умови вугільного вибою.

Для прямого (приладового) контролю за наявністю напруги від 12 В існує один дуже рідкісний прилад типу "ПОШУК 5А". Контроль здійснюється за допомогою світлодіодних індикаторів, які забезпечують ступінчасту індикацію. Його параметри: тривалість розряду, що моделюється, мкс 100; 300; 1000 ± 5%; кількість електрики, що протікає за моделлю розряду, А×мкс 1;3;10;30;100 ± 3%; вхідний опір 20 МОм; похибка визначення енергії розряду "ПОШУК 5А" ± 5%.

"ПОШУК 5А" має функції визначення полярності, цілісності чи урвища кола, знаходження фазного провідника, звукову сигналізацію. Час збереження заряду 9-12 годин. Заряджання приладу від мережі 220 В відбувається протягом 20 секунд. Виконаний у зручному для візуального та звукового контролю ударостійкому пластиковому корпусі. Електрична міцність ізоляції приладу становить щонайменше 2000 вольт.

З наведених характеристик "ПОШУК 5А" цілковито очевидно, що для наших цілей, щодо безпечного використання вимірювальних низьковольтних кіл (НВК) в вугільних шахтах, він цілком не годиться. Таким чином для прямого (приладового) контролю нині відсутня технічна можливість його здійснити.

Тому автором пропонується свій спосіб непрямого контролю вимірювання параметра, який визначає запалювальну здатність електричного розряду НВК. Для реалізації цього непрямого способу оцінка може бути побудована за принципом реакції електричного кола НВК на модель електричного розряду. По реакції електричного кола НВК і встановленого зв'язку визначають максимум енергії електричного розряду, що виділяється з оцінюваного кола НВК за критеріальний час. Запропонований автором спосіб докладніше описаний у роботах [4, 5].

Більш детально та докладно з питання виявлення умов та параметрів що до

математичної моделі запальною здатності вид НВК показано у роботах автора [2-7].

Проте ще не було вирішено важливі питання виявлення умов та параметрів моделі, що до математичної запальною здатності вид НВК.

#### **Виклад основного матеріалу і результати дослідження.**

Низьковольтне вимірювальне коло (НВК) за своєю суттю є індуктивно-ємнісним електричним колом з розподіленими параметрами. Залежно від параметрів НВК при випробуваннях на іскробезпеку поводить як чиста індуктивність, як чиста ємність або як індуктивно-ємнісне коло. Фундаментально та детально це було досліджено у роботах [3-5].

Автор неодноразово висловлював свою точку зору на математичні моделі та моделювання. Однак, як показує практика та публікації, далеко не всі дослідники та вчені її поділяють. Створюють моделі заради моделі і не можуть відповісти навіть і кому вона потрібна. Тому висловлю свою точку зору вкотре. На мою думку модель створюється з єдиною метою - відповіді на конкретні питання до об'єкту, що моделюється, під цілком певним «кутом зору», причому обраний «кут зору» і визначає вибір моделі.

Зі сказаного випливають наступні етапи побудови математичної моделі:

1. Чітко формуються основні питання моделі, відповіді на які ми хочемо отримати з її допомогою.

2. Безжально відсівають все другорядне і залишають лише мінімально достатні, вплив яких суттєвий при пошуку відповіді на поставлені питання.

3. Формують конкретні гіпотези про функціонування, причому мають бути наведені теоретичні доводи на користь їх прийняття у сенсі правдоподібності.

4. Гіпотези виражаються у формі математичних співвідношень, які поєднуються у формальний опис моделі.

З погляду автора на цьому побудова моделі закінчена.

Далі слід дослідження моделі (співвідношень) за допомогою аналітичних або обчислювальних методів, які і призводять до відшукування відповідей на запропоновані питання. Такий підхід суттєво зменшує

створення неадекватних моделей, що потім вимагають покращення або взагалі заміни моделі. Тридцятирічна наукова практика автора підтверджує ефективність методу пропонуваного вище.

Найгірший випадок з погляду іскробезпеки, це коли НВК виявляє себе як чиста індуктивність. Тому при аналізі енерговіддачі ми справедливо замінюємо НВК індуктивністю. Оскільки аналіз впливу НВК необхідно робити залежно від довжини НВК, введемо позначення:

$$\zeta = L_{\text{ноз}}/R_{\text{ноз}}, \quad (1)$$

де  $L_{\text{ноз}}$  – погонна індуктивність НВК (мкГн/м),  $R_{\text{ноз}}$  – погонний опір НВК (мкОм/м).

Справедливо рахувати для даного моделювання, що постійна часу характеризує тип застосованого кабелю НВК і не залежить від його довжини. Як відомо з роботи [3], тривалість електричного розряду, при якій запальна енергія мінімальна, являє собою час формування мінімального ядра полум'я від енергії електричного кола НВК. Експериментально показано, що величина мінімальної запальної енергії становить 0,15 мДж для 8,5% метано-повітряної суміші. Для полегшення моделі зробимо так, щоб ця величина була безрозмірною, віднесемо її до часу формування мінімального ядра полум'я ВШС  $\beta$ :

$$\phi = \zeta/\beta. \quad (2)$$

Характерна особливість, що під час займання ВШС електричними розрядами з тривалістю більшою, ніж час формування мінімального полум'я, критерієм запальної здатності електричного розряду буде його потужність (енергія розряду за час формування мінімального ядра полум'я).

Дослідження процесу формування мінімального ядра полум'я ВШС автором дуже докладно та фундаментально було розглянуто у роботах [3-5].

Змоделюємо енерговіддавання з НВК (з лінійною характеристикою навантаження), до якого підключений новий додатковий НВК. У цьому випадку електрична енергія розряду, визначена за розглянутою вище лінійною струмовою моделлю для НВК за час розряду  $T$ , дорівнюватиме:

$$A_{\text{лин}} = I_{\text{ком}}ET/6, \quad (3)$$

де  $I_{\text{ком}}$  – комутуючий струм лінійного джерела живлення НВК до підключення додаткової НВК (мА),  $E$  – е.р.с. лінійного джерела живлення НВК (В),  $T$  – час розряду (мкс).

Після підключення додаткової НВК енергія електричного розряду НВК, з урахуванням індуктивності і за той же час, дорівнюватиме:

$$A_{\text{НВК}} = I_1ET/6 + L_{\text{ноз}}(I_1^2/2) = \\ = I_{\text{ком}}ET/6\{I_1/I_{\text{ком}} + I_1/I_{\text{ком}}[3L_{\text{ноз}}/(R + R_{\text{ноз}})T]\}, \quad (4)$$

де  $R$  – обмежувальний опір омичного джерела живлення електричного кола НВК без фідера (Ом),

$$I_1 = E/(R + R_{\text{ноз}});$$

$$I_{\text{ком}} = E/R, I_1/I_{\text{ком}} = R/(R + R_{\text{ноз}}).$$

Оскільки максимум електричної енергії розряду НВК за критеріальний час визначає його запалювальну здатність, то зміна цих величин дозволяє судити про зміну запалюючої здатності НВК при підключенні фідера різної довжини або додаткової НВК.

Однак, ще не було вирішено важливі питання виявлення параметрів щодо математичної моделі запальною здатності вид НВК.

Крім цього, з ряду причин не досліджувалися наявність нових додаткових параметрів, що надають істотний вплив на моделі математичної запальною здатності вид НВК, які раніше не враховувалися або не бралися до уваги.

З погляду автора за своєю суттю питання запальної здібності НВК носить характер імітаційного моделювання, яке відрізняється від описаного автором вище класичного математичного моделювання. Насамперед відмінність стосується в тому, що другим пунктом запропонованого автором способом імітаційного моделювання здійснюється декомпозиція об'єкта на більш прості, а потім в один блок об'єднуються «споріднені» компоненти вектору стану. Саме блоковий принцип дає можливість при побудові запропонованим автором способом імітаційної моделі встановлювати потрібні пропорції між точністю опису кожного блоку, забезпеченістю його достатньої інформацією та необхідністю досягнення мети імітаційного моделювання,

якщо ми хочемо досягти високого рівня адекватності моделі реальному об'єкту. Запропонований автором блоковий принцип побудови імітаційної моделі (за принципом розщеплення) дає принципово нову можливість верифікувати кожен блок до його включення в загальну модель, а також тому, що вона може включати залежності складнішого характеру, що не описуються простими математичними співвідношеннями. Це є новизною, чого не беруть до уваги мої опоненти бо цього ніколи не було у моїх попередників.

Для моделювання різної довжини НВК введемо позначення

$$k = R_{noz} / (R + R_{noz}). \quad (5)$$

Як очевидно, коефіцієнт характеризуватиме довжину фідера НВК, і може змінюватися від 0 (фідер відсутній) і до 1 (обмежувальний опір омичного джерела живлення  $R$  буде нехтує мало порівняно з омичним опором фідера). Пропонована модель дозволяє, змінюючи від 0 до 1, змодельовати всі випадки різної довжини фідера НВК.

Вираз (4) при підстановці в нього виразів (3) і (5) набуде вигляду:

$$A_{нвк} = A_{омич} (1-k) \times (1+3k\phi). \quad (6)$$

З виразу (6) видно, що НВК може суттєво характеризуватись коефіцієнтом  $l$  який дорівнює:

$$l = (I_1 E T / 6) / (I_1^2 L_{noz} / 2).$$

Тоді отримуємо нову математичну модель запальною здатності вид низьковольтних вимірювальних кіл (НВК).

$$\begin{aligned} A_{нвк} &= (I_1 E T / 6) [(1+l)/l] = \\ &= (I_{ком} E T / 6) (I_1 / I_{ком}) [(1+l)/l] = \\ &= A_{омич} (1-\phi) [(1+l)/l]. \end{aligned} \quad (7)$$

Зіставляючи математичні вирази (6) та (7), отримаємо

$$[(1+l)/l] = 1 + 3k\phi. \quad (8)$$

З математичного висловлювання (8) можна зробити висновок, що штучно введені автором коефіцієнти набувають наочності та простоти їх оцінки

$$l = 1/3k\phi, \quad (9)$$

$$k = 1/3l\phi, \quad (10)$$

та зручні у використанні.

## ВИСНОВКИ

Таким чином, з отриманих математичних виразів (9) та (10) видно, що задаючись коефіцієнтом  $l$ , можна не заморочуватись складними обчисленнями а елементарно, з достатньою для практики точністю, визначити значення коефіцієнта  $\phi$  – непряму характеристику довжини фідера НВК.

Проведений глибокий та детальний аналіз виконаного автором математичного моделювання дозволяє зробити такі висновки:

1. Найбільшу небезпеку (збільшення електричної енергії розряду) від НВК має місце саме в низьковольтних колах (мінімальний коефіцієнт  $n = E/U_{зап}$ ).

2. Найбільшу небезпеку має місце при рівності обмежувального опору джерела живлення та омичного опору НВК.

3. Оскільки коефіцієнт  $\phi$  визначається параметрами НДЦ і ВШС, то один і той же НВК залежно від ВШС може бути як елементом, що не обмежує іскробезпечну потужність у навантаженні, так і значно її знижує.

4. Додатковий НВК суттєво знижує іскробезпечну потужність електричного розряду додатково до втрат на омичному опорі НВК при її характеристиці  $\phi > 0,7$ .

5. Додатковий НВК повинен бути ретельно проаналізований та досліджений перш ніж бути рекомендованим та впровадженим у вугільних шахтах України.

6. З викладеного може виникнути питання: а чи не замінює запропонований автором метод імітаційного моделювання методи оптимізації? Автор на нього відповідає однозначно – ні, не замінює, але дуже суттєво доповнює та посилює.

Ці наукові розробки автором вимог та моделювання запальною здатності вид низьковольтних вимірювальних кіл (НВК) пройшли апробацію на двох зарубіжних гірничих конференціях [6, 7] і отримали в 2022 році велику зацікавленість зарубіжних колег.

Отримані нові наукові знання про процес формування вибуху газоповітряної суміші від запалювання вибухонебезпечної суміші низьковольтним вимірювальним колом могли б розробити більш досконалий галузевої документ, наприклад новий ДСТУ або ДЭСТ, в порівнянні з використовуваними в

Акредитованих сертифікаційних центрах і численних інших діючих та існуючих в Україні. Проте злиденне фінансування абсолютно не дозволяє це здійснити навіть у найближчому майбутньому

Наприклад, виконані особисто автором фундаментальні наукові дослідження: оригінальне математичне моделювання та моделі електричних сигналів були включені до складової частини ДСТУ 7302:2013 «СТАТИЧНА ЕЛЕКТРИКА Терміни та визначення основних понять», яке було прийнято та набуло чинності (наказ Мінекономрозвитку України від 14 жовтня 2013 р. № 1231).

#### Список використаних джерел

1. Электрооборудование взрывозащищенное с видом взрывозащиты «Искробезопасная электрическая цепь». Технические требования и методы испытания: ГОСТ 22782.5-1985. – [Введен 1980-01.-01]. – М.: Изд.-во стандартов, 1985. – 70 с.
2. Лопатін, В.В. Наукові основи розроблення системи контролю технічного стану жорсткого армування шахтних стовбурів: дис. доктора техн. наук: 05.11.13./ Лопатін В.В.- Івано-Франківськ 2013. - 392с.
- 3 Лопатін, В.В. Розробка вимог та моделювання процесу запалювання вибухонебезпечної суміші низьковольтним вимірювальним коло/ Лопатін В.В.- Методи та прилади контролю якості. Науково технічний журнал - Івано - Франківськ - № 2 (47), 2021, С. 78-89
4. Лопатін, В.В. Контроль технічного стану та підвищення ресурсу штангової насосної установки [Текст]: монографія/ В.В. Лопатін, Б.В. Копей, І.Б. Копей; Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу; Ін-т геотехн. механіки ім. М.С. Полякова НАН України.-ІФНТУНГ, 2020.- 378с.
5. Лопатін, В.В. Мобільні вимірювальні системи в нафтогазовій та гірничій промисловості [Текст]: монографія/ В.В. Лопатін, Б.В. Копей, О.І. Стефанишин; Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу; Ін-т геотехн. механіки ім. М.С. Полякова НАН України.-ІФНТУНГ, 2010.-392с.

6. Lopatin V.V. Development of a mathematical model of the ignition capacity of low-voltage measuring circuits [Електронний ресурс]/ V.V. Lopatin /7IYGEC — 7TH INTERNATIONAL YOUNG GEOTECHNICAL ENGINEERS CONFERENCE/ 29 Apr 2022 - 01 May 2022 Sydney, Australia Режим доступу до ресурсу:

<https://icsmge2022.org/7iygec/>.- Назва з екрану.

7. Lopatin V.V. Développement d'un modèle mathématique de la capacité d'allumage des circuits de mesure basse tension [Електронний ресурс]/ V.V. Lopatin/ IRAQ 2022 — THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTECHNICAL ENGINEERING/ 17 May 2022 - 19 May 2022 Baghdad, Iraq, Asia Режим доступу до ресурсу:

<https://ocs.uobaghdad.edu.iq/index.php/ICGEI/ticgei>.- Назва з екрану.

#### References

1. Elektroborudovaniye vzryvozashchishchennoye s vidom vzryvozashchity «Iskrobezopasnaya elektricheskaya tsep'». Tekhnicheskiye trebovaniya i metody ispytaniya: GOST 22782.5-1985. – [Vveden 1980-01.-01]. – М.: Izd.-vo standartov, 1985. – 70 s.
2. Lopatin, V.V. Naukovi osnovy rozroblennya systemy kontrolyu tekhnichnoho stanu zhorstkoho armuvannya shakhtnykh stovburiv: dys. doktora tekhn. nauk: 05.11.13./ Lopatin V.V.- Ivano-Frankivs'k 2013. - 392s.
3. Lopatin, V.V. Rozrobka vymoh ta modelyuvannya protsesu zapalyuvannya vybuhonebezpechnoyi sumishi nyz'kovol'nyim vymiryuval'nyim kolo/ Lopatin V.V.- Metody ta pryklady kontrolyu yakosti. Naukovo tekhnichnyy zhurnal - Ivano - Frankivs'k - № 2 (47), 2021, S. 78-89
4. Lopatin, V.V. Kontrol' tekhnichnoho stanu ta pidvyshchennya resursu shtanhovoyi nasosnoyi ustanovky [Tekst]: monohrafiya/ V.V. Lopatin, B.V. Kopey, I.B. Kopey; Ivano-Frankiv. nats. tekhn. un-t nafty i hazu; In-t heotekhn. mekhaniky im. M.S. Polyakova NAN Ukrayiny.- IFNTUNH, 2020.-378s.
5. Lopatin, V.V. Mobil'ni vymiryuval'ni systemy v naftohazoviy ta hirnychiy promyslovosti [Tekst]: monohrafiya/ V.V. Lopatin, B.V. Kopey, O.I. Stefanyshyn; Ivano-Frankiv. nats. tekhn. un-t

nafty i hazu; In-t heotekhn. mekhaniky im. M.S. Polyakova NAN Ukrayiny.-IFNTUNH, 2010.-392s.

6. Lopatin V.V. Development of a mathematical model of the ignition capacity of low-voltage measuring circuits [Електронний ресурс]/ V.V. Lopatin /7IYGEC — 7TH INTERNATIONAL YOUNG GEOTECHNICAL ENGINEERS CONFERENCE/ 29 Apr 2022 - 01 May 2022 Sydney, Australia Режим доступу до ресурсу: <https://icsmge2022.org/7iygec/>.- Назва з екрану.

7. Lopatin V.V. Développement d'un modèle mathématique de la capacité d'allumage des circuits de mesure basse tension [Електронний ресурс]/ V.V. Lopatin /IRAQ 2022 — THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTECHNICAL ENGINEERING/ 17 May 2022 - 19 May 2022 Baghdad, Iraq, Asia Режим доступу до ресурсу: <https://ocs.uobaghdad.edu.iq/index.php/ICGEI/ticgei>.- Назва з екрану.