

*А. Є. ШАМРАЙ***ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИМИКАЧА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З ВИКОРИСТАННЯМ СХЕМИ ПРИМУСОВОГО ГАСІННЯ ДУГИ ДЛЯ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ**

Вступ. У статті розглядається проблема вимкнення великих індуктивних струмів при коротких замиканнях у тягових мережах постійного струму міського електротранспорту та метрополітену. Висока динамічність навантаження, зростання рівня коротких замикань та відсутність природного переходу струму через нуль суттєво ускладнюють гасіння електричної дуги постійного струму. Традиційні вимикачі часто демонструють недостатню швидкодію або знос контактів, що обумовлює потребу у застосуванні схем примусового дугогасіння. **Мета.** Метою роботи є експериментальне дослідження ефективності вимикача постійного струму зі схемою примусового гасіння дуги у режимах короткого замикання, визначених стандартом IEC 61992-2, а саме: режим максимальної амплітуди струму (f), режим максимальної енергії (e), режим дистанційного замикання (d). **Методика.** У роботі наведено принцип дії вимикача зі схемою LC-комутації, яка забезпечує створення зустрічного струму для гасіння дуги у вакуумній камері. Експериментальні випробування проведено в лабораторії ІРН інституту (Берлін). Для кожного режиму наведено параметри живлення, осцилограми. **Результати:** Вимикач успішно пройшов серію випробувань, забезпечивши гарантоване вимкнення короткого замикання у всіх трьох режимах. Основні експериментальні показники: у режимі f: пік струму 71,8 кА, час вимикання 1,94 мс, перенапряга 1,95 кВ; у режимі e: сталий струм короткого замикання 42,2 кА, час вимикання 4 мс, перенапряга 1,77 кВ; у режимі d: сталий струм короткого замикання 8,14 кА, час вимикання 3,9 мс, перенапряга 1,47 кВ. **Практична цінність.** Результати випробувань підтверджують надійну роботу схеми LC-комутації, стабільність нульового переходу струму у вакуумній камері. Можливість реального впровадження досліджуваного вимикача на тягових підстанціях міського електротранспорту та метро як більш швидкодіючого та надійного приладу комутації.

Ключові слова: вимикач постійного струму, примусове дугогасіння, тягові підстанції, коротке замикання, вакуумна камера, комутаційні перенапряги, захист тягових мереж.

*А. YE. SHAMRAI***EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF A DC CIRCUIT BREAKER USING A FORCED ARC-EXTINGUISHING SCHEME FOR TRACTION SUBSTATIONS**

Introduction. The article investigates the problem of interrupting large inductive currents during short-circuit faults in direct-current traction networks of urban electric transport and metro systems. High load dynamics, increased short-circuit levels and the absence of a natural current zero crossing significantly complicate the extinction of a direct-current electric arc. Traditional circuit breakers often demonstrate insufficient speed or excessive contact wear, which creates the need for forced arc-extinguishing schemes. **Goal.** The goal of this work is to experimentally investigate the performance of a direct-current circuit breaker equipped with a forced arc-extinguishing scheme under short-circuit conditions defined by IEC 61992-2, namely: the maximum current amplitude mode (f), the maximum energy mode (e), the distant short-circuit mode (d). **Methodology.** The paper describes the operating principle of the breaker employing an LC-commutation circuit that generates a counter-current for arc extinction in the vacuum interrupter. Experimental tests were carried out at the IPH Institute laboratory (Berlin). For each test mode, supply parameters, oscillograms are presented. **Results.** The breaker successfully passed a series of tests, ensuring reliable interruption of short-circuit currents in all three modes. The key experimental parameters are: in mode f: peak current 71,8 kA, total break time 1,94 ms, overvoltage 1,95 kV; in mode e: sustained short-circuit current 42,2 kA, total break time 4 ms, overvoltage 1,77 kV; in mode d: sustained short-circuit current 8,14 kA, total break time 3,9 ms, overvoltage 1,47 kV. **Practical value.** The test results confirm the reliable operation of the LC-commutation scheme and stable current zero crossing in the vacuum interrupter. The studied breaker can be practically implemented at traction substations of urban electric transport and metro systems as a faster and more reliable switching device.

Keywords: direct-current circuit breaker, forced arc extinction, traction substations, short-circuit, vacuum interrupter, commutation overvoltages, traction network protection.

Вступ. Міські тягові підстанції та підстанції метрополітену функціонують за умов високої динаміки навантаження, значних струмів короткого замикання та постійних коливань режимів роботи через нерівномірність рух рухомого складу [1, 2]. Вимикачі на таких підстанціях виконують важливі функції – захист тягових ліній, а саме швидке відключення при аварійних режимах, а також підключення та від'єднання фідерів від шин постійного струму, які живляться через трансформаторно-випрямні агрегати.

Тягові лінії мають виражений індуктивний характер, що разом з відсутністю природного переходу постійного струму через нуль ускладнює процес гасіння електричної дуги та підвищує вимоги до комутаційної апаратури [3].

Зростання потужності тягових навантажень, перехід до рекуперативного гальмування, необхідність підвищення швидкості руху та енергоефективності приводять до збільшення амплітуди й швидкості зміни струмів у мережах постійного струму. У цих умовах традиційні вимикачі з механічним гасінням дуги часто демонструють недостатню швидкодію, підвищений знос

контактів або обмежену здатність до багатократних комутацій [3, 4]. Саме тому актуальними є технології примусового гасіння дуги, які дозволяють організувати зустрічний струм та штучно формувати перехід постійного струму через нуль або переносити частину струму в допоміжні кола, зменшуючи навантаження на головний комутаційний контакт.

Сучасні дослідження зосереджені на розробці та оптимізації схем примусового дугогасіння, зокрема із застосуванням LC-комутацій, гібридних топологій та електронних силових ключів [3 – 5]. Такі рішення дають можливість значно підвищити швидкодію, зменшити час тривалості дуги та забезпечити стабільність вимкнення навіть за високих індуктивностей тягових ліній. Це підтверджує актуальність експериментальних досліджень, які спрямовані на випробування вимикачів у аварійних режимах, які максимально наближені до реалістичних.

Метою даної роботи є експериментальне дослідження процесу вимкнення вимикачів постійного струму, оснащених схемою примусового гасіння дуги, під час коротких замикань у різних характерних

© А.Є. Шамрай, 2025

режимах відповідно до стандарту IEC 61992-2:

- максимального струму замикання, «f»;
- максимальної енергії замикання, «e»;
- дистанційного замикання, «d».

Основна частина. Випробування вимикача зі схемою примусового гасіння дуги були проведені у IPH Institute, Berlin.

Зовнішній вигляд випробувального стенду наведено на рис. 1.



Рис. 1. Зовнішній вигляд випробувального стенду

Функціональна схема вимикача зі схемою примусового гасіння дуги наведена на рис. 2.

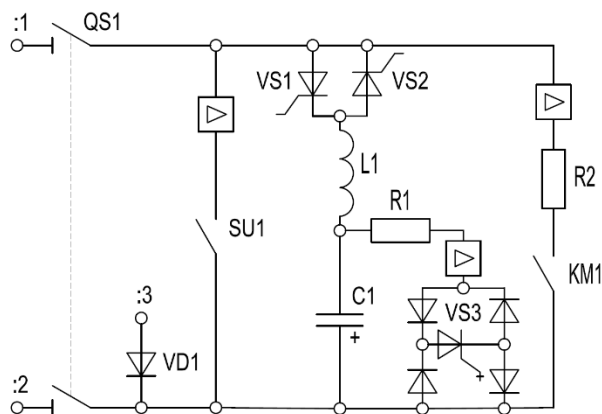


Рис. 2. Функціональна схема вимикача

Загальний принцип роботи вимикача, що зображений на рис. 2 полягає у наступному. Конденсатор C1 заряджається від зовнішнього джерела з полярністю, що показана на рис. 2, потім вмикається вимикач. Під час протікання струму через вимикач відбувається вимірювання струму та його порівняння з уставкою струмового захисту. Якщо виміряне значення струму більше уставки, то спрацьовує захист і подається

команда на швидке вимкнення вимикача. Спочатку подається імпульс струму на соленоїд вимкнення механічного приводу і далі через час не більше 1,2 ms подаються імпульси керування на VS1 у такий спосіб створюючи струм через вакуумну камеру SU1 зустрічний до струму короткого замикання. В момент коли струм через SU1 дорівнює нулю дуга зникає і аварійний струм продовжує замикатись через коло VS1 – L1 – C1 тим самим заряджаючи C1 напругою з протилежним значенням. Коли напруга на конденсаторі досягне значення випрямляча, то струм буде спадати, а енергія яка запасена в індуктивності тягової лінії буде створювати перенапруження на конденсаторі C1. При досягненні напруги на C1 критичного значення спрацьовує тиристор VS3 і розряджає C1 на гальмівний резистор R1, це відбувається поки вся енергія індуктивності тягової лінії не буде розсіяна на R1.

Якщо коротке замикання трапляється при протіканні через вимикач зворотного струму, то алгоритм роботи вимикача дещо змінюється. Так як початкова полярність напруги на C1 не відповідає можливості гасіння зворотного струму, тому попередньо конденсатор C1 перезаряджається через увімкнену вакуумну камеру SU1 та тиристор VS1 після чого подається імпульс струму на соленоїд вимкнення механічного приводу і далі через час затримки подаються імпульси керування на VS2 при цьому конденсатор C1 розряджається у коливальному режимі, створюючи струм через вакуумну камеру SU1 зустрічний до струму короткого замикання. В момент коли струм через SU1 дорівнює нулю дуга зникає. Якщо при вимкненні з'являються перенапруження, то вони поглинаються так само, як і при прямому струмі короткого замикання, що описано вище.

Коло з R2 та KM1 використовується для перевірки тягової лінії на коротке замикання перед увімкненням вимикача.

На рис. 3 наведена схема випробувань вимикача зі схемою примусового гасіння дуги.

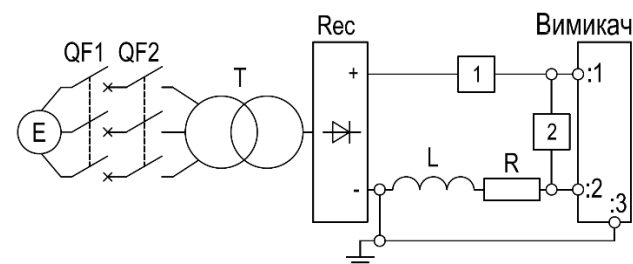


Рис. 3. Схема випробувань

На рис. 3 введені наступні позначення:

- E – силове живлення;
- QF1 – вимикач для вимкнення струму після проведення випробування та захисту;
- QF2 – вимикач, що вмикається і подає енергію у випробуване коло;
- T – силовий трансформатор;
- Rec – силовий випрямляч;

- R – активне навантаження;
 L – індуктивне навантаження;
 1 – датчик для вимірювання струму;
 2 – датчик для вимірювання напруги.

Випробування у режимі максимального струму замикання. Випробування проводились за схемою, наведеною на рис. 3, згідно з параметрами табл. 1.

Таблиця 1 – Дані для проведення випробувань у режимі «б»

Напруга джерела	1000 V
Налаштування розчеплювача	12 kA
Пік короткого замикання	71 kA
Стале значення короткого замикання	50 kA
Постійна часу кола короткого замикання	—
Початкова швидкість зростання струму	14 kA/ms
Циклічність випробувань	O - 15s - CO - 15s - CO - 60s - CO

Примітка: O – open (вимкнення); C – close (увімкнення).

Протягом випробувань реєструвалися осцилограми струму та напруги на вимикачі, отримані за допомогою датчиків 1 та 2 (див. рис. 3). На рис. 4 подані зареєстровані осцилограми, які підтверджують успішність усіх циклів «увімкнення – вимкнення» відповідно до заданої послідовності.

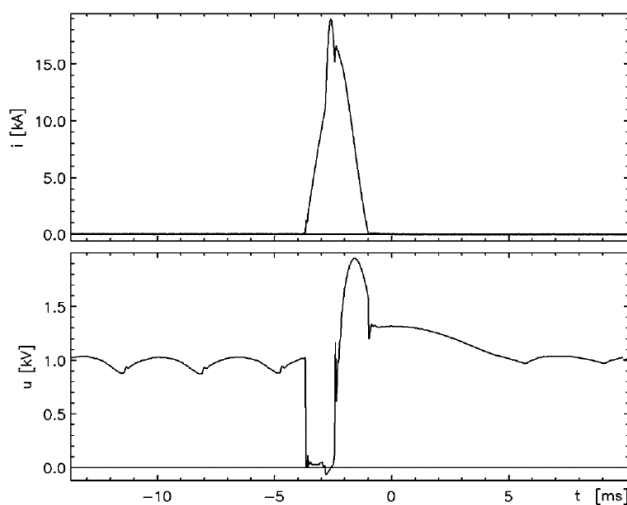


Рис. 4. Осцилограми випробувань в режимі «б»

Вимикач з циклічністю, що наведена у табл. 1 зробив декілька увімкнень – вимкнень, при цьому всі вимкнення силового струму були успішними, що підтверджується осцилограмами на рис. 4.

Значення параметрів під час випробування наведені у табл. 2, які демонструють здатність вимикача ефективно гасити дугу навіть за пікового струму 71 kA та високої швидкості його зміни.

Таблиця 2 – Результати випробувань в режимі «б»

Пік короткого замикання	71,8 kA
Стале значення короткого замикання	51,3 kA
Початкова швидкість зростання струму	13,9 kA/ms
Струму, що розривається	18,9 kA
Комутаційна перенапруга	1948 V
Тривалість протікання струму	2,83 ms
Повний час вимикання	1,94 ms

Випробування у режимі максимальної енергії замикання. Дослідження в цьому режимі виконувалися відповідно до умов табл. 3.

Таблиця 3 – Дані для проведення випробувань у режимі «е»

Напруга джерела	1000 V
Налаштування розчеплювача	12 kA
Пік короткого замикання	—
Стале значення короткого замикання	40 kA
Постійна часу кола короткого замикання	31,5 ms
Початкова швидкість зростання струму	1,6 kA/ms
Циклічність випробувань	O - 15s - CO - 15s - CO - 60s - CO

Осцилограми на рис. 5 показують стабільну роботу схеми гасіння дуги, незважаючи на значну постійну часу кола 31,5 ms, що визначає підвищену енергію в індуктивності лінії.

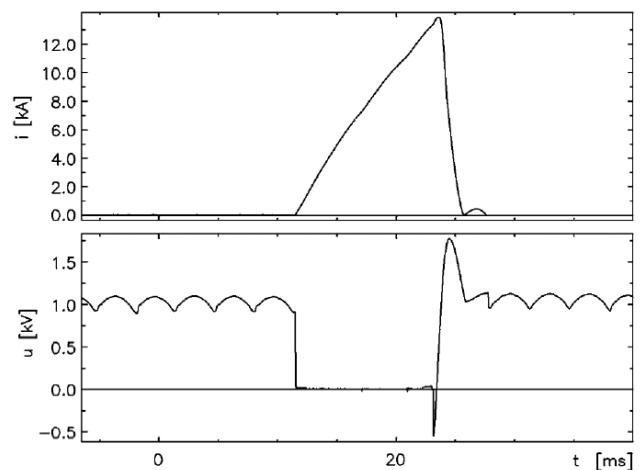


Рис. 5. Осцилограми випробувань в режимі «е»

Результати обробки осцилограм наведені у табл. 4. Максимальний сталий струм у цьому режимі становив 42,2 kA, а час повного вимкнення не більше 4 ms.

Таблиця 4 – Результати випробувань в режимі «е»

Стале значення короткого замикання	42,2 kA
Постійна часу кола короткого замикання	31,5 ms
Початкова швидкість зростання струму	1,34 kA/ms
Струму, що розривається	13,8 kA
Комутаційна перенапруга	1770 V
Тривалість протікання струму	16,3 ms
Повний час вимикання	4 ms

Випробування у режимі дистанційного замикання. Параметри випробування наведено у табл. 5. У цьому випадку характерною є велика постійна часу (понад 60 ms) і відносно невелика величина струму.

Випробування проводились згідно схеми, що наведена на рис. 3. Налаштування випробувань згідно табл. 5.

Таблиця 5 – Дані для проведення випробувань у режимі «д»

Напруга джерела	1000 V
Налаштування розчеплювача	7 kA
Пік короткого замикання	—
Стале значення короткого замикання	8 kA
Постійна часу кола короткого замикання	63 ms
Початкова швидкість зростання струму	0,51 kA/ms
Циклічність випробувань	O - 15s - CO - 15s - CO - 60s - CO

Осцилограми на рис. 6 демонструють коректне функціонування вимикача за всіх циклів роботи. Підсумкові значення визначених експериментальних параметрів наведено в табл. 6. Стале значення струму склало 8,14 kA, а час вимкнення 3,9 ms.

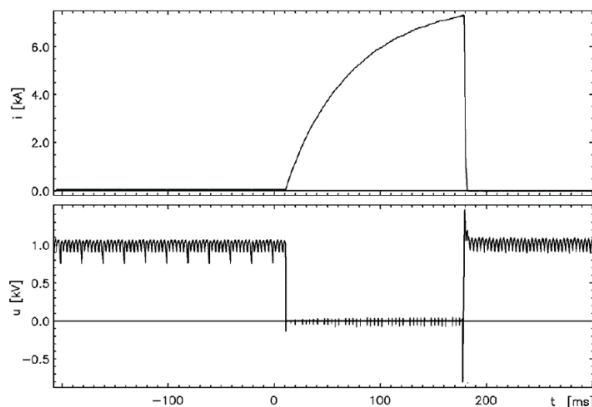


Рис. 6. Осцилограми випробувань в режимі «д»

Таблиця 6 – Результати випробувань в режимі «д»

Стале значення короткого замикання	8,14 kA
Постійна часу кола короткого замикання	65 ms
Початкова швидкість зростання струму	0,13 kA/ms
Струму, що розривається	7,28 kA
Комутаційна перенапруга	1467 V
Тривалість протікання струму	172 ms
Повний час вимкнення	3,9 ms

Висновки. Вимикач зі схемою примусового гасіння дуги успішно пройшов серію випробувань, забезпечивши гарантоване вимкнення короткого замикання у всіх можливих режимах. Основні експериментальні показники: у режимі максимального струму замикання «f»: пік струму 71,8 kA, час вимкнення 1,94 ms, перенапруга 1,95 kV; у режимі максимальної енергії замикання «e»: сталий струм короткого замикання 42,2 kA, час вимкнення 4 ms, перенапруга 1,77 kV; у режимі дистанційного замикання, «d»: сталий струм короткого замикання 8,14 kA, час вимкнення 3,9 ms, перенапруга 1,47 kV.

Результати випробувань підтверджують надійну роботу вимикача зі схемою примусового гасіння дуги за рахунок створення стабільного переходу струму через нульове значення у вакуумній камері.

References

1. Radu P. V., Lewandowski M., Szlag A., Steczek M. Short-Circuit Fault Current Modeling of a DC Light Rail System with a Wayside Energy Storage Device. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 10, art. no. 3527. doi: <https://doi.org/10.3390/en15103527>
2. Xia M., Zhou Y., Huang Y., Yang H., Tai Y. Research on Short-Circuit Characteristics of Subway DC Traction Power Supply System. *IEEE IECON 2020 – 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2020, pp. 3456–3460. doi: <https://doi.org/10.1109/IECON43393.2020.9254651>
3. Wang D., Liao M., Wang R., Li T., Qiu J., Li J., Duan X., Zou J. Research on Vacuum Arc Commutation Characteristics of a Natural-Commutate Hybrid DC Circuit Breaker. *Energies*, 2020, vol. 13, no. 18, art. no. 4823. doi: <https://doi.org/10.3390/en13184823>
4. Park S.-Y., Choi H.-S. Operation Characteristics of Mechanical DC Circuit Breaker Combined with LC Divergence Oscillation Circuit for High Reliability of LVDC System. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 16, art. no. 5097. doi: <https://doi.org/10.3390/en14165097>
5. Lv Z., Zhang Y., Zhang J., Zhang C., Wu Y., Zeng R., Li Z. Parameter Optimization Design of the Commutation Circuit of a Hybrid DC-Current-Limiting Circuit Breaker. *Energies*, 2023, vol. 16, no. 22, art. no. 7546. doi: <https://doi.org/10.3390/en16227546>

Надійшла (received) 15.10.2025

Відомості про авторів / About the authors

Шамрай Андрій Євгенович (Shamrai Andrii) – аспірант кафедри електричних машин, Національний університет «Запорізька політехніка», заступник Генерального директора ТОВ «Плутон ІС», м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3516-1989>; e-mail: shamray_andrey@me.com.