

**Гліб Миколайович Стрункін<sup>1</sup>, Андрій Євгенович Шамрай<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>магістр, інженер

ТОВ «Плутон ІС» (Запоріжжя, Україна)

E-mail: [strunkingleb@gmail.com](mailto:strunkingleb@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1719-4132>. ResearcherID: [LNQ-2155-2024](https://orcid.org/0009-0009-1719-4132)

<sup>2</sup>аспірант кафедри електричних машин

Національний університет «Запорізька Політехніка» (Запоріжжя, Україна),

заступник Генерального директора

ТОВ «Плутон ІС» (Запоріжжя, Україна)

E-mail: [Andrey.Shamray@pluton.ua](mailto:Andrey.Shamray@pluton.ua). ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3516-1989>

## МОДЕЛЮВАННЯ ВИМИКАННЯ НАДШВИДКОДІЮЧОГО БЕЗДУГОВОГО ВИМИКАЧА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Наведено відомості про захист контактної мережі постійного струму міського електричного транспорту та метрополітену. Показано, що підвищити швидкодію автоматичних вимикачів можливо при застосуванні комутації струмів короткого замикання за допомогою вакуумної камери. Для гасіння дуги в вакуумній камері запропоновано методи розряду попередньо зарядженого конденсатора у протифазі струму короткого замикання. Для подальшої оптимізації надшвидкодійних вимикачів виникає потреба створення імітаційної моделі. Розроблено модель надшвидкодійного вимикача постійного струму у програмі PSIM. Наведено детальний опис моделі. Виконаний аналіз процесів вимикання автоматичного вимикача. Намічено подальші кроки для використання моделі.

**Ключові слова:** надшвидкодійний вимикач, вакуумна камера, постійний струм, імітаційна модель, PSIM, вимикання струму короткого замикання.

Рис.: 3. Бібл.: 12.

**Актуальність теми дослідження.** Захист тягової мережі постійного струму міського електричного транспорту та метрополітену від струмів короткого замикання залишається важливою задачею, для вирішення якої на сучасному етапі залучають не тільки методи традиційних електричних апаратів, а і їх поєднання з пристроями силової електроніки. Вакуумні вимикачі тривалий час застосовувалися лише для комутації кіл змінного струму. Проте додавання до них напівпровідникових пристроїв зробило можливим ефективне гасіння дуги й постійного струму, завдяки чому ці апарати називають бездуговими. Сучасні виробники тягового обладнання вже вийшли на ринок з такими апаратами, які дозволили зменшити час вимикання надструмів та збільшити комутаційний ресурс вимикачів без регламентного обслуговування. Подальша оптимізація бездугових апаратів пов'язана з потребою або проведення натурного експерименту, або залучання імітаційного моделювання. В останньому випадку модель повинна бути адекватною, яку потрібно підтвердити існуючим експериментом.

**Постановка проблеми.** При розробці надшвидкодійного бездугового автоматичного вимикача постійного струму, зважаючи на те, що натурний експеримент пов'язаний зі значними фінансовими витратами, можливістю виникнення аварійних ситуацій з руйнуванням дослідного зразка та залученням людиногодин спеціалістів різного профілю, спеціалістами ТОВ «Плутон ІС» було побудовано та перевірено імітаційну модель, яка описує його вимикання при відключенні аварійних струмів та дозволяє здійснювати віртуальний експеримент при оптимізації його параметрів, що і є змістом цієї роботи.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання використання швидкодійних вимикачів для захисту тягових мереж постійного струму неодноразово підіймалося в літературі [1; 2]. Проте йдеться виключно про використання суто механічних вимикачів, в яких енергія ланцюгів постійного струму розсіювалася у вигляді тепла при виникненні дуги під час вимикання [3]. Попри деякий прогрес, який пов'язано з вибором нових матеріалів та форми дугогасильних камер, використання електродинамічних приводів та залучання методів прогнозування розвитку короткого замикання, суттєво підвищити надійність, зменшити час вимикання надструмів та покращити габарити вимикачів не вдавалося [4; 5]. Ідея використання вакуумних вимикачів стикалася з потребою гасіння дуги постійного струму, без якого ваку-

умна камера руйнувалася через велике тепловиділення [6]. Розвиток силової електроніки дозволив поєднати вакуумний контактор та ланцюг гасіння, що складався з попередньо зарядженого конденсатора, який розряджався напівпровідниковим пристроєм зустрічно струму короткого замикання. Коли алгебраїчна сума струмів короткого замикання та гасіння ставала рівною нулю, дуга гасла, а вимикач переходив у вимкнений стан [7; 8].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Інженерні розробки таких вимикачів стикалися з відсутністю або складністю теоретичних основ для опису та моделювання процесу комутації, який пов'язаний не тільки з електромагнітними процесами в електронній схемі вимикача, а й з електромеханічним процесом руху контакту вакуумної камери та коротким горінням дуги постійного струму, тому альтернативним рішенням може стати імітаційне моделювання. Імітаційне моделювання дозволяє спростити процес розрахунку та оптимізації вимикача, що пришвидшує його конструкторську розробку.

**Метою статті** є побудова імітаційної моделі, яка дозволяє проаналізувати процес вимикання надшвидкодійного вимикача постійного струму й дає можливість знизити фінансові витрати при розробці серійного продукту та надалі провести оптимізацію його параметрів.

**Виклад основного матеріалу.** Захист тягової мережі постійного струму міського електричного транспорту та метрополітену вимагає від автоматичного вимикача високої швидкодії, здатності розсіювати енергію, накопичену в контактній мережі, та високу надійність. Комутація постійного струму значно складніша за комутацію змінного. Якщо в мережах змінного струму фізичні процеси сприяють гасінню дуги завдяки природному переходу струму через нуль, то в колах постійного струму цей ефект відсутній. Дугогасильна камера, розділяючи велику дугу на менші, лише частково вирішує проблему.

Попри значні успіхи в розробці вимикачів постійного струму, зокрема збільшення струмів вимкнення, покращення динамічних характеристик та скорочення часу вимикання, існуючі рішення не досягли рівня надійності, безпеки та економічності вакуумних вимикачів змінного струму. Головною проблемою залишається ненадійність головного контакту та необхідність регулярного обслуговування дугогасної камери, що підвищує вартість експлуатації та свідчить про недосконалість технології [8]. Екологічна безпека також залишається питанням, що потребує покращення. Фактично, технологія комутації постійного струму практично не змінювалася із середини минулого століття. На відміну від цього, технологія комутації змінного струму давно вирішила більшість цих проблем, використовуючи вакуумне середовище (або інертний газ), відсутність газовиділення та необхідності обслуговування контактів, що робить її значно надійнішою та безпечнішою.

У ТОВ «Плутон ІС» розроблено гібридний вимикач постійного струму AFB на струми 2,5 та 4 кА і напругою до 1000 В (рис. 1), який поєднує механічні комутаційні елементи із силовими електронними компонентами, дозволяючи переривати струм без виникнення дуги [8; 9].

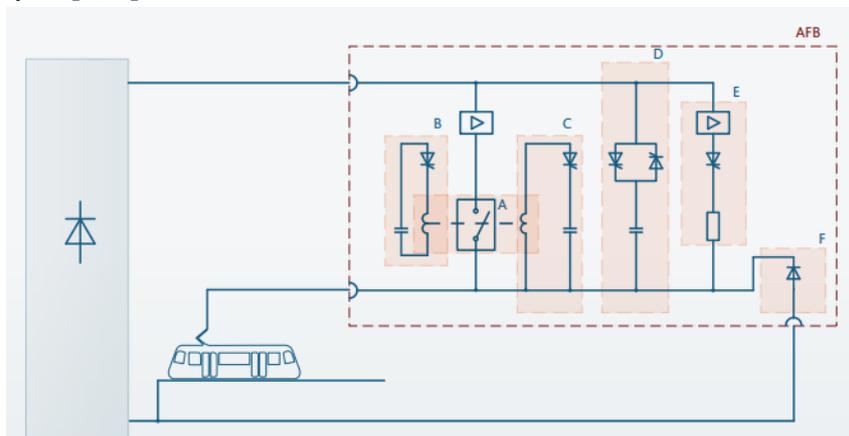


Рис. 1. Структурна схема вимикача AFB

Джерело: розроблено автором за [8].

Перед вмиканням ланцюг Е перевіряє наявність короткого замикання в контактній мережі. Вмикання автоматичного вимикача відбувається за допомогою електромагнітного приводу В. При отриманні команди на вимикання, система управління активує тиристор С, що перенаправляє енергію високовольтного конденсатора на котушку вимикання. Створене магнітне поле запускає механізм розмикання контактів вакуумної камери А. Під час розмикання виникає дуга, яка гаситься енергією попередньо зарядженого конденсатора. Струм розряду конденсатора, керований тиристором D, подається в протифазі до основного струму силового кола. Коли їх алгебраїчна сума досягає нуля, дуга гасне, і контакти остаточно розмикаються, перериваючи струм. Надлишок енергії контактного проводу замикається через зворотний діод F [8].

Вимикач АFB характеризується надшвидкою дією з часом вимикання менш як 1 мс на відміну від традиційних вимикачів з власним часом вимикання 4,5 мс та більше [10]. Подальше покращення характеристик вимикача потребує або проведення фізичного експерименту при різних параметрах ланцюга гасіння D (ємність конденсатора, індуктивність дроселя, момент включення тиристора відносно початку комутації, або побудови імітаційної моделі для віртуальних експериментів. Фізичний експеримент пов'язаний з фінансовими витратами, можливістю виникнення аварійних ситуацій та складністю реалізації, тому було побудовано імітаційну модель в середовищі PSIM 2023 від Altair, що призначено для аналізу пристроїв силової електроніки, електромеханіки, джерел електроживлення тощо [11].

На рис. 2 зображено модель автоматичного вимикача АFB-25 для аналізу процесів вимикання струму короткого замикання.

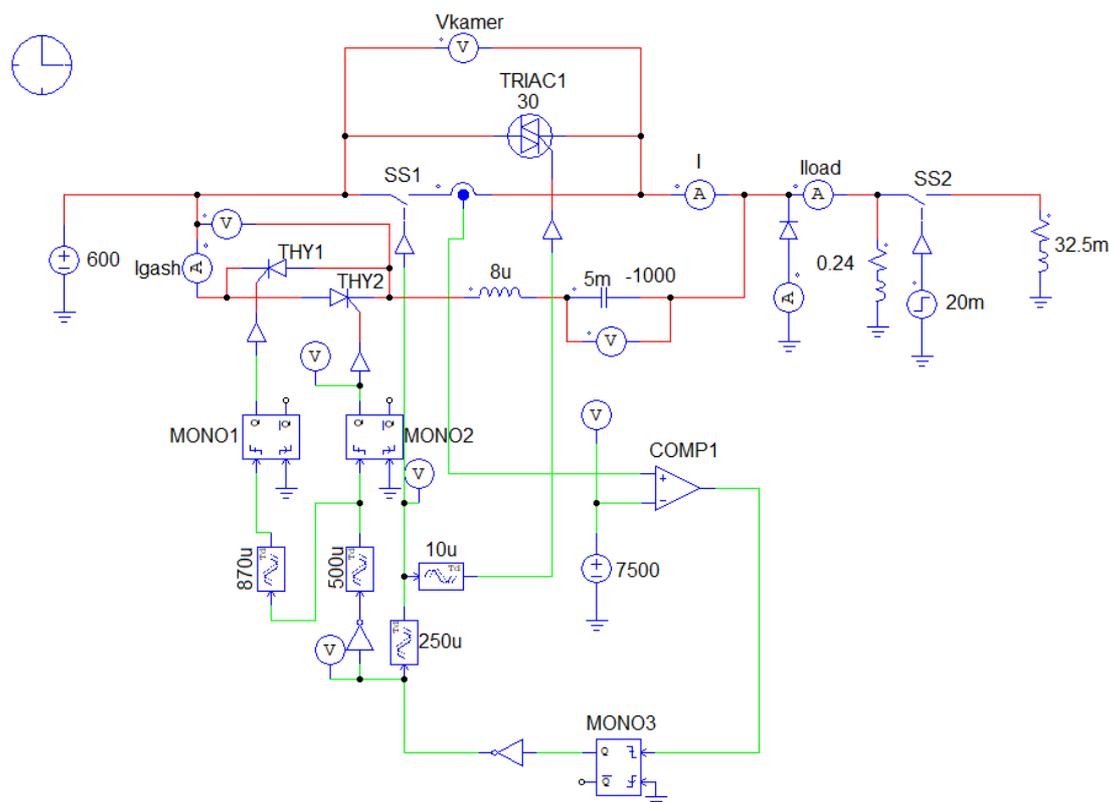


Рис. 2. Імітаційна модель вимикача АFB-25

Джерело: розроблено автором.

Випрямляч тягової підстанції моделюється у першому наближенні джерелом ЕРС, з напругою 600 В. Ідеальний ключ SS1 використано для імітації вакуумної камери, послідовно з якою увімкнено датчик для вимірювання робочого струму через вимикач. Паралельно камері підключено ланцюг гасіння, який складається із зустрічно-паралельних

тиристорів THY1, THY2, індуктивності величиною 8 мкГн та конденсатора ємністю 5 мФ з початковим зарядом негативною напругою -1000 В. Також паралельно вакуумній камері додано симістор TRIAC1, який своєю пороговою напругою імітує падіння напруги на дузі після її виникнення. Відомо [12], що падіння напруги на дузі у вакуумі описується формулою

$$U = U_c + U_a + E \cdot l, \quad (1)$$

де  $U_c$  – напруга катодної плями (зазвичай становить 15-30 В);  $U_a$  – напруга на аноді (зазвичай 2-5 В);  $E$  – напруженість електричного поля в стовпі дуги ( $10^{-4} - 10^{-5}$  В/м);  $l$  – довжина дуги. Зважаючи, що у вимикачі AFB, який працює з напругою до 1000 В немає потреби використовувати повний хід вакуумної камери, розрахованої для напруги 35 кВ, зазор між її електродами обмежений лише 4 мм. При цьому падінням напруги на стовпі дуги знехтуємо, а порогову напругу TRIAC1 прийнято 30 В. Навантаження прийнято рівним 0,24 Ом, що відповідає протіканню номінального струму 2,5 кА. Ключем SS2 навантаження в момент часу 20 мс шунтується, що імітує виникнення короткого замикання. Також паралельно навантаженню підключено зворотний діод. Система управління являє собою компаратор, який порівнює значення робочого струму з уставкою (7500 А), сигнал з якого формує стійкий імпульс вимикання за допомогою одновібратора MONO3. Лінія затримки 250 мкс моделює затримку часу, пов'язану з вимірюванням струму, фільтрацією та обробкою інформації у мікроконтролері. Її вихідний сигнал вмикає вакуумну камеру SS1. Робочий струм при цьому перехоплюється симістором TRIAC1 із запізненням 10 мкс, що імітує процес формування дуги. Після зменшення струму до нуля симістор закривається, що моделює обрив дуги. Відповідно до імпульсу вимикання з MONO3 із затримкою часу, відповідно, 500 мкс та 870 мкс формуються імпульси управління для тиристорів гасіння.

На рис. 3 наведено результати моделювання струмів у схемі в процесі відключення вимикача AFB-25.

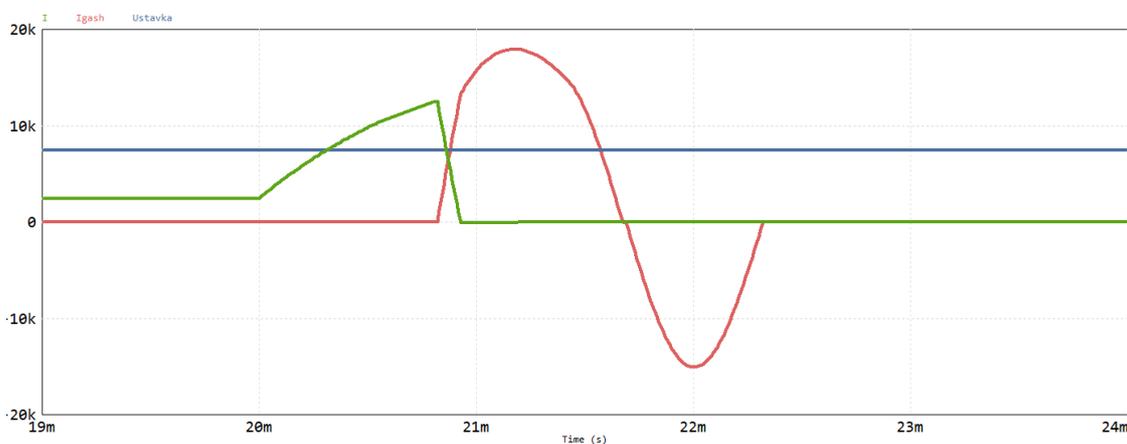


Рис. 3. Результат моделювання вимикача AFB-25

Джерело: розроблено автором.

Після перевищення значення уставки (синій тренд) 7500 А робочий струм (зелений) деякий час продовжує наростати, після чого формується імпульс гасіння (червоний), який швидко гасить дугу, після чого, перезаряджає конденсатор через навантаження та джерело живлення. Власний час вимикання AFB-25 становить менш як 1 мс.

Порівняння результатів моделювання з процесами вимикання реального вимикача підтверджує ідентичність кривих струмів, що протікають у ньому.

Подальша робота планується в уточненні моделі в частині вимикання зворотних струмів та струмів із великою швидкістю наростання, а також оптимізації параметрів схеми гасіння для зменшення ефективного часу вимикання та величини струму гасіння.

**Висновки.** У статті презентовано імітаційну модель надшвидкодіючого вимикача постійного струму в середовищі PSIM, за допомогою якої розраховано струми, які виникають при вимиканні короткого замикання у навантажені тягової підстанції. Модель підтвердила високу швидкість вимикання пристрою (власний час переривання струму становив менше за 1 мс), підтвердила свою адекватність реальним значенням та може бути використаною у подальшій оптимізації продукту.

### Список використаних джерел

1. Hu, H., Liu, Y., Li, Y., et al. (2024). Traction power systems for electrified railways: Evolution, state of the art, and future trends. *Railway Engineering Science*, 32, 1–19. <https://doi.org/10.1007/s40534-023-00320-6>.
2. Павленко, Т. П., Петренко, О. М., & Лукашова, Н. П. (2018). *Електропостачання транспорту: конспект лекцій (для студентів усіх форм навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)*. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова.
3. Lindmayer, M., Marzahn, E., Mutzke, A., Ruther, T., & Springstubbe, M. (2004). The process of arc-splitting between metal plates in low voltage arc chutes. In *Proceedings of the 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts and the 22nd International Conference on Electrical Contacts* (pp. 28–34). Seattle, WA: IEEE. <https://doi.org/10.1109/HOLM.2004.1353090>.
4. Dai, S., Xia, K., Shi, L., & Xie, M. (2020). Design on universal circuit breaker via improved gray wolf optimization algorithm. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 1–12. <http://dx.doi.org/10.1155/2020/8071057>.
5. Zhao, X., Wang, J., Wang, Y., Kang, Q., Long, C., & Shen, J. (2022). A novel DC circuit breaker with fast breaking capability in full current range. *Journal of Physics: Conference Series*, 2213(1), 012028. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2213/1/012028>.
6. Andersen, J. M., & Carroll, J. J. (1978). Applicability of a vacuum interrupter as the basic switch element in HVDC breakers. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 97(5), 1893–1900.
7. Fuji Electric. (n.d.). *DC high-speed vacuum circuit breaker*. [https://www.fujielectric.com/products/transmission\\_distribution/box/doc/23B1-E-0007.pdf](https://www.fujielectric.com/products/transmission_distribution/box/doc/23B1-E-0007.pdf).
8. Овсянникер, Д. Е., Стрункин, Г. Н., Шмаровоз, С. В., Станишевский, Д. С., & Михневич, М. И. (2019). Инновационное решение компании «Плутон» для распределения постоянного тока – бездуговой сверхбыстродействующий выключатель AFB. *METRO INFO International*, 1, 14–19.
9. Pluton. (n.d.). *AFB arc-free ultra high-speed DC circuit breaker*. <https://pluton.ua/en/products/innovative-solutions-for-dc-current-switching/afb-arc-free-ultra-high-speed-dc-circuit-breaker->
10. Secheron. (n.d.). *High-speed DC circuit breakers for fixed installations*. [https://www.secheron.com/wp-content/uploads/2024/12/SG104309BEN\\_B14\\_Brochure\\_Circuit-breaker-DC\\_UR26-80S-IEEE-\\_03.24.pdf](https://www.secheron.com/wp-content/uploads/2024/12/SG104309BEN_B14_Brochure_Circuit-breaker-DC_UR26-80S-IEEE-_03.24.pdf).
11. Powersim. (n.d.). *PSIM user's guide*. <https://powersimtech.com/wp-content/uploads/2021/01/PSIM-User-Manual.pdf>.
12. Lafferty, J. M. (1980). *Vacuum arcs: Theory and application*. New York, NY: Wiley.

### References

1. Hu, H., Liu, Y., Li, Y., et al. (2024). Traction power systems for electrified railways: Evolution, state of the art, and future trends. *Railway Engineering Science*, 32, 1–19. <https://doi.org/10.1007/s40534-023-00320-6>.
2. Pavlenko, T. P., Petrenko, O. M., & Lukashova, N. P. (2018). *Elektropostachannia transportu: konспект lektsii (dlia studentiv usikh form navchannia za spetsialnistiu 141 – Elektroenerhetyka, elektrotekhnika ta elektromekhanika) [Power supply for transport: lecture notes (for students of all forms of study in the speciality 141 – Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics)]*. O. M. Beketov National University of Urban Economy.
3. Lindmayer, M., Marzahn, E., Mutzke, A., Ruther, T., & Springstubbe, M. (2004). The process of arc-splitting between metal plates in low voltage arc chutes. In *Proceedings of the 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts and the 22nd International Conference on Electrical Contacts* (pp. 28–34). Seattle, WA: IEEE. <https://doi.org/10.1109/HOLM.2004.1353090>.

4. Dai, S., Xia, K., Shi, L., & Xie, M. (2020). Design on universal circuit breaker via improved gray wolf optimization algorithm. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 1–12. <http://dx.doi.org/10.1155/2020/8071057>.
5. Zhao, X., Wang, J., Wang, Y., Kang, Q., Long, C., & Shen, J. (2022). A novel DC circuit breaker with fast breaking capability in full current range. *Journal of Physics: Conference Series*, 2213(1), 012028. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2213/1/012028>.
6. Andersen, J. M., & Carroll, J. J. (1978). Applicability of a vacuum interrupter as the basic switch element in HVDC breakers. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 97(5), 1893–1900.
7. Fuji Electric. (n.d.). *DC high-speed vacuum circuit breaker*. [https://www.fujielectric.com/products/transmission\\_distribution/box/doc/23B1-E-0007.pdf](https://www.fujielectric.com/products/transmission_distribution/box/doc/23B1-E-0007.pdf).
8. Ovsianyker, D. E., Strunkin, H. N., Shmarovoz, S. B., Stanyshkevskiy, D. S., & Mykhnevych, M. I. (2019). Ynnovatsyonnoe reshennye kompanyy «Pluton» dlia raspredeleniya postoiannoho toka – bezduhovoivo sverkhbystrodeistvuiushchyy vykliuchatel AFB [Pluto's innovative solution for direct current distribution – the AFB arc-free ultra-fast circuit breaker]. *METRO INFO International*, 1, 14–19.
9. Pluton. (n.d.). *AFB arc-free ultra high-speed DC circuit breaker*. <https://pluton.ua/en/products/innovative-solutions-for-dc-current-switching/afb-arc-free-ultra-high-speed-dc-circuit-breaker->.
10. Secheron. (n.d.). *High-speed DC circuit breakers for fixed installations*. [https://www.secheron.com/wp-content/uploads/2024/12/SG104309BEN\\_B14\\_Brochure\\_Circuit-breaker-DC\\_UR26-80S-IEEE-\\_03.24.pdf](https://www.secheron.com/wp-content/uploads/2024/12/SG104309BEN_B14_Brochure_Circuit-breaker-DC_UR26-80S-IEEE-_03.24.pdf).
11. Powersim. (n.d.). *PSIM user's guide*. <https://powersimtech.com/wp-content/uploads/2021/01/PSIM-User-Manual.pdf>.
12. Lafferty, J. M. (1980). *Vacuum arcs: Theory and application*. New York, NY: Wiley.

Дата першого надходження статті до видання: 22.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 08.11.2025

UDC 621.316.9

### *Hlib Strunkin<sup>1</sup>, Andrii Shamrai<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>M.Eng., engineer

“Pluton IC” LLC (Zaporizhia, Ukraine)

E-mail: [strunkingleb@gmail.com](mailto:strunkingleb@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1719-4132>. ResearcherID: [LNQ-2155-2024](https://orcid.org/0009-0009-1719-4132)

<sup>2</sup>Postgraduate Student of Electrical Machine Department

National University “Zaporizhzhia Polytechnic” (Zaporizhia, Ukraine)

Deputy CEO “Pluton IC” LLC (Zaporizhia, Ukraine)

E-mail: [Andrey.Shamray@pluton.ua](mailto:Andrey.Shamray@pluton.ua). ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3516-1989>

## **SIMULATION OF ULTRA-FAST ARC-LESS DC CIRCUIT BREAKER TRIPPING**

*Information on the current state of protection of the DC contact network of urban electric transport and the subway is provided. It is shown that it is possible to increase the speed of automatic circuit breakers and their reliability when using short-circuit current tripping using a vacuum chamber. For forced arc extinguishing in a vacuum chamber, discharge methods of a pre-charged capacitor using thyristors in the antiphase of the short-circuit current are proposed. The operation of the AFB type automatic circuit breaker developed by “Pluton IC” LLC is described. For further optimization of ultra-high-speed circuit breakers, there is a need to create a simulation model. A simulation model of the AFB-2.5 ultra-high-speed DC circuit breaker has been developed in the PSIM program. A detailed description of the simulation model is provided. The vacuum chamber is modeled by an ideal switch, in parallel with which an extinguishing circuit is connected. To simulate the voltage drop across the arc in the vacuum chamber, a linear model was used, which depends on its length, which is simulated by the threshold voltage of the triac. The signal from the current sensor is compared with the setpoint using a comparator. The delay elements form the necessary delays during the signal passage. The analysis was performed using a model of the circuit breaker tripping processes. The intrinsic tripping time of the ultra-fast DC circuit breaker was less than 1 ms, which corresponds to the results obtained during the operation of a real AFB-2.5 circuit breaker at a traction substation. Further steps are planned for using and improving the model when tripping reverse currents and currents with a high rate of increase, as well as for optimizing the circuit breaker parameters.*

**Keywords:** ultra-fast circuit breaker; vacuum chamber; direct current; simulation model; PSIM; short-circuit current tripping.

Fig.: 3. References: 12.