

АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ БУДОВИ ТА УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВАКУУМНИХ ВИМИКАЧІВ

Вінницький національний технічний університет

Анотація: В роботі показано умови експлуатації та застосування сучасних вакуумних вимикачів. Досліджено їх конструктивні особливості та переваги застосування в електричних мережах.

Ключові слова: вакуумний вимикач, електрична дуга, дугогасильна камера, гасіння дуги, електрична міцність, перенапруги, надійність, номінальна напруга.

Abstract: The paper shows the conditions of use and application of modern vacuum circuit breakers. Their design features and advantages of use in electrical networks are investigated.

Keywords: vacuum circuit breaker, electric arc, arc extinguishing chamber, arc extinguishing, electrical strength, overvoltages, reliability, rated voltage.

Вступ

Сучасні вакуумні вимикачі є важливим елементом в енергетичних об'єктах нашої країни, а особливо в електричних мережах середньої напруги до 35 кВ. Їхня популярність зумовлена компактністю, надійністю та екологічністю, що робить їх кращими за традиційні масляні чи газові вимикачі. Основою роботи такого пристрою є вакуумна дугогасильна камера, де відбувається швидке гасіння електричної дуги завдяки унікальним властивостям вакууму. Ця технологія забезпечує високу швидкодію, мінімальний знос контактів і тривалий термін служби, що особливо цінно в умовах інтенсивної експлуатації електромереж. У даній роботі розглядається принцип дії вакуумного вимикача, його конструкція та процеси, що протікають у ВДК під час комутації [1].

Метою роботи є проаналізувати конструктивні особливості та умови експлуатації сучасних вакуумних вимикачів у електричних мережах, а також розглянути переваги їх застосування.

Результати дослідження

Вакуумні вимикачі стали важливою частиною інфраструктури електричних мереж завдяки своїй високій надійності, довговічності та безпеці, що робить їх незамінними у сучасних електричних системах [2]. Старіші моделі вакуумних вимикачів забезпечували відключення порівняно невеликих навантажень через конструктивні недосконалості вакуумної камери та певні технічні характеристики контактів. Проте сучасні моделі вимикачів мають більш термостійкий та міцний матеріал поверхні. Це обумовлює можливість встановлення таких комутаційних апаратів практично у всіх галузях промисловості.

На сьогодні вакуумні вимикачі використовуються в багатьох сферах промисловості країни, а саме: в розподільних електроустановках електричних станцій та розподільних підстанцій, в металургії для живлення трансформаторів, в нафтогазовій та хімічній галузях на пунктах перекачування, перемикання та трансформаторних підстанціях, для роботи первинних і вторинних ланцюгів тягових підстанцій на залізничному транспорті, на гірничодобувних підприємствах для забезпечення електропостачання комбайнів, екскаваторів та інших видів важкої техніки від комплектних трансформаторних підстанцій. На сьогодні, в будь-яких з перерахованих вище галузей промисловості, вакуумні вимикачі замінюють застарілі оливні та повітряні вимикачі.

Вакуумні вимикачі поділяються на кілька типів, в залежності від класу напруги, для якого призначений електричний апарат. Тому умовно їх можна поділити на наступні категорії [1]:

- пристрої на 6 - 10 кВ;
- пристрої на 35 кВ;
- пристрої на 110 - 220 кВ.

Вакуумний вимикач є сучасним комутаційним пристроєм, який використовується для вмикання, вимикання та захисту електричних кіл у мережах середньої напруги. Його ключовою особливістю є використання вакууму як середовища для гасіння електричної дуги, що виникає при розмиканні контактів. Основним елементом конструкції вимикача є вакуумна дугогасильна камера (ВДК), яка забезпечує швидке

і надійне припинення струму завдяки унікальним фізичним властивостям вакууму. Принцип роботи цього пристрою базується на створенні високого вакууму всередині камери, де тиск підтримується на рівні 10^{-6} мм рт. ст., що мінімізує кількість частинок, здатних підтримувати горіння дуги [1].

Конструкція ВДК складається з ізоляційної оболонки, виготовленої зі скла або газошільної кераміки, металевих фланців на кінцях і двох контактів - рухомого і нерухомого. Нерухомий контакт жорстко закріплений до одного з фланців, тоді як рухомий з'єднаний з іншим фланцем через сильфон із нержавіючої сталі. Цей сильфон дозволяє контакту переміщатися, зберігаючи герметичність камери. Всередині також розташовані електростатичні екрани, які захищають оболонку від металевих парів, що утворюються при горінні дуги, і вирівнюють розподіл електричного поля (рисунк 1). Така конструкція забезпечує стабільність роботи вимикача навіть при високих струмах.

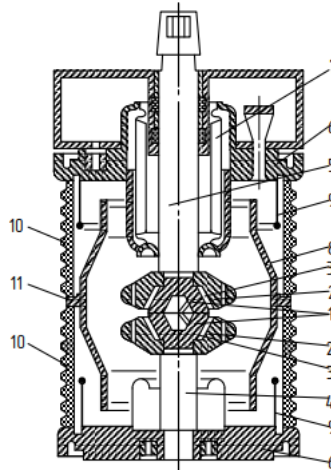


Рисунок 1 – Конструктивні особливості вакуумної дугогасильної камери

Процес гасіння дуги у вакуумі є головним у принципі роботи вакуумного вимикача. Коли контакти розмикаються, між ними виникає електрична дуга через іонізацію парів металу, що випаровуються з поверхні контактів під дією високої температури. У вакуумі, де практично відсутні молекули газу, дуга не може довго існувати: плазма швидко розсіюється, а іони втрачають енергію. Тривалість горіння дуги зазвичай не перевищує 0,02 секунди, що значно швидше, ніж у газових чи масляних вимикачах. Висока діелектрична міцність вакууму (до 20–30 кВ/мм) дозволяє швидко відновити ізоляцію між контактами після гасіння дуги, що робить вимикач надзвичайно ефективним (рис. 2). Залежність пробивної напруги від відстані між контактами показує, що навіть при малих проміжках вакуум зберігає свої ізоляційні властивості.

Характер дуги залежить від величини струму. При малих струмах (до 10 кА) дуга має дифузну форму з численними катодними плямами, розсіяними по поверхні катода, а напруга дуги не перевищує 30 В. При великих струмах дуга стає стислою, з'являються анодні плями, а напруга може зростати до 100–200 В із значними сплесками. Це призводить до посиленого зносу контактів і збільшення кількості металевих парів у проміжку, що може ускладнити гасіння. Однак поздовжнє магнітне поле допомагає стабілізувати процес, зменшуючи концентрацію плазми і зберігаючи ефективність вимикача [3].

Одним із ключових аспектів роботи вакуумного вимикача є механізм вмикання та вимикання, який залежить від конструкції привода та енергії, накопиченої в рухомих частинах. У вимикачах серії ВР, наприклад ВР1, використовується електромагнітний привод, який розміщений у корпусі пристрою. При вмиканні струм від блока управління проходить через котушку вмикання, створюючи магнітне поле, яке втягує осердя. Це осердя через проміжний вал і тягу повертає основний вал вимикача, піднімаючи ізоляційну тягу з рухомих контактом ВДК.

Контакти замикаються, а пружини підтискання забезпечують необхідний тиск (1000–4000 Н), що гарантує надійний контакт і запобігає зварюванню (рис. 3). Після цього осердя фіксується за допомогою постійного магніту, утворюючи так звану "магнітну защіпку", яка утримує контакти у ввімкненому стані без додаткового живлення котушки.

Вимикання відбувається за схожим принципом, але у зворотному напрямку. За командою "ВІДКЛ" струм проходить через котушку вимикання, створюючи сильніше магнітне поле, яке долає утримуючу силу постійного магніту. Осердя рухається вниз, тягнучи за собою вал і ізоляційну тягу. Енергія, накопичена в пружинах підтискання під час вмикання, сприяє швидкому розмиканню контактів зі

швидкістю 1,7–2,3 м/с. Цей процес забезпечує миттєве гасіння дуги у вакуумі та повернення привода в початкове положення. Така конструкція дозволяє вимикачу витримувати значні механічні навантаження і забезпечує високу швидкодію, що критично важливо для аварійних режимів у мережах [1, 3].

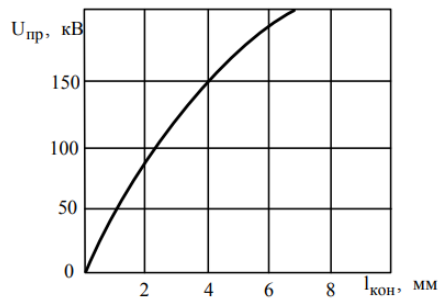


Рисунок 2 – Відношення пробивної напруги від відстані

Фізичні принципи роботи вакуумного вимикача тісно пов'язані з його практичними перевагами. Завдяки відсутності дугогасильного середовища, яке потребує заміни (як олива чи SF_6), вимикач не потребує складного обслуговування. Швидке відновлення електричної міцності між контактами (до 50 кВ/мкс) дозволяє йому ефективно працювати в умовах частих комутацій і аварійних коротких замикань. Крім того, компактність ВДК і мала маса вимикача дають змогу встановлювати його в стандартних шафах КРУ в кілька ярусів, що економить простір на підстанціях.

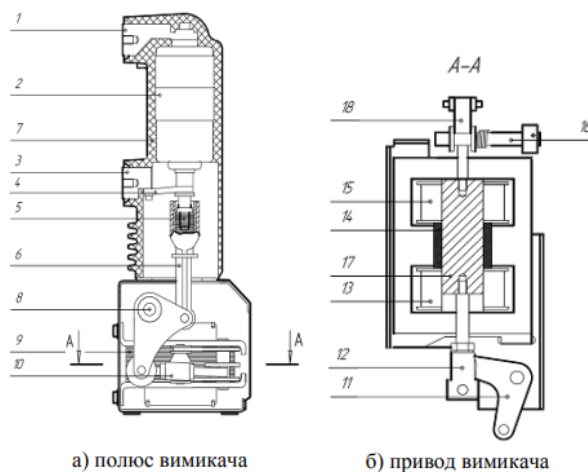


Рисунок 3 – Конструкція полюса та привода вимикача ВР1: 1 – верхній контакт; 2 – вакуумна дугогасильна камера (ВДК); 3 – нижній контакт; 5 – пружини підтискання; 6 – ізоляційна тяга; 7 – ізоляційний каркас полюса; 8 – основний вал; 9 – електромагніт; 10 – регульовальна тяга; 11 – проміжний вал; 12 – вставка увімкнення; 13 – котушка увімкнення; 14 – постійний магніт; 15 – котушка вимкнення; 16 – вал ручного вимкнення; 17 – осердя; 18 – вставка вимкнення

Порівняння з іншими типами вимикачів, наприклад малооб'ємними масляними, показує суттєві переваги вакуумної технології. Масляні вимикачі потребують регулярної заміни масла, мають більші габарити і масу, а також становлять ризик вибуху чи пожежі через використання горючих матеріалів. У вакуумних вимикачах таких недоліків немає: відсутність дугогасильного середовища виключає потребу в компресорах чи масляному господарстві, а вибухобезпечність і екологічність роблять їх ідеальними для густонаселених районів чи промислових об'єктів. Хоча початкова вартість вакуумних вимикачів на 10–15% вища, ніж у малооб'ємних, їхні експлуатаційні витрати за 25 років удвічі менші, а перерви в електропостачанні через ремонти скорочуються в 20 разів. Це пояснює, чому до 1990 року частка вакуумних вимикачів у світі перевищила 55%, а в Японії — 70%.

Практичне застосування вакуумних вимикачів охоплює широкий спектр задач: від комутації нормальних струмів до захисту мереж у аварійних режимах. Серія ВР, наприклад, розроблена для мереж трифазного змінного струму частотою 50–60 Гц із напругою 6–10 кВ і використовується як у нових КРУ, так і для модернізації існуючих шаф. Їхня висока швидкодія (час відключення — частки секунди) і стійкість до ударних навантажень дозволяють застосовувати ці пристрої навіть у складних умовах, таких як теплові чи атомні станції. Водночас розробка ВДК пов'язана з певними труднощами, зокрема

створенням спеціальних контактних матеріалів і складністю вакуумного виробництва, що вимагає значних початкових інвестицій. Проте ці недоліки компенсуються довгостроковими перевагами [3].

Принцип роботи вакуумного вимикача також впливає на його здатність протистояти зовнішнім факторам. Широкий діапазон робочих температур (від -70°C до $+200^{\circ}\text{C}$ для ВДК) і можливість монтажу в будь-якому положенні роблять його універсальним рішенням. Наприклад, конструкція ВР1 включає три полюси з ВДК, залитими на спільній основі, що зменшує габарити до висоти 960–1160 мм (рис. 3). Це дозволяє розміщувати вимикачі в компактних шафах КРУ в 2–4 яруси, оптимізуючи простір і знижуючи динамічні навантаження на фундамент.

Висновок

Принцип роботи вакуумного вимикача базується на використанні вакууму як високоефективного дугогасильного середовища, що забезпечує швидке припинення електричної дуги і відновлення ізоляції між контактами. Завдяки цьому вимикач вирізняється високою надійністю, компактністю та екологічністю, що робить його незамінним у сучасних електромережах середньої напруги. Конструкція ВДК, ретельно підібрані матеріали контактів і продуманий механізм привода дозволяють пристрою витримувати значні струми і механічні навантаження, зберігаючи стабільність роботи протягом десятиліть. Порівняно з традиційними масляними чи газовими вимикачами, вакуумні аналоги мають суттєві переваги: менші експлуатаційні витрати, безпеку і тривалий термін служби. Усе це підтверджує, що вакуумні вимикачі залишаться ключовим елементом енергетики в найближчому майбутньому, а їхній принцип дії є основою для подальших інновацій у цій сфері.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Лежнюк П.Д., Зелінський В. Ц. Електричні апарати. Фізичні основи електричних апаратів. Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2012. – 184 с.
2. <https://ukrelektro.com.ua/ua/a365509-vysokovoltnye-vakuumnye-vyklyuchateli.html>
3. Електрична частина станцій та підстанцій : лабораторний практикум / В. В. Нетребський, Ю. В. Малогулко. – Вінниця: ВНТУ, 2017. – 99 с.

Андрій Іванович Яценко – студент групи ЕС-21б, Факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: andriyyacenko6@gmail.com

Науковий керівник: **Наталія Вікторівна Остра** – канд. техн. наук, доцент кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: natalyaostra@ukr.net

Andriy I. Yatsenko - student of group ES-21b, Faculty of Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: andriyyacenko6@gmail.com

Supervisor: **Natalia V. Ostra** - Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor of the Department of Electrical Power Plants and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: natalyaostra@ukr.net