

**В. В. ГРАБКО, О. В. ДІДУШОК**

### **МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИЯВЛЕННЯ ЗНОСУ КОНТАКТНОЇ СИСТЕМИ ПРИ КОМУТАЦІЇ ВАКУУМНОГО ВИМИКАЧА**

У роботі розглянуто переваги застосування вакуумних комутаційних апаратів та особливості використання електромагнітної зачіпки у якості приводного механізму. Описано вплив замикання (ввімкнення) та розмикання (вимкнення) силових контактів на зношення контактної системи вимикача. Розглянуто фізичні процеси у контактних з'єднаннях, які виникають при комутації вакуумного вимикача та їх вплив на зношення контактної системи. При коротких замиканнях можливе зварювання контактів у замкнутому положенні та вигорання і оплавлення при їх відключенні. Розроблена математична модель дозволяє визначати знос комутаційної системи при ввімкненні та вимкненні вакуумного вимикача. При замиканні силових контактів вимикача враховується загальна електродинамічна сила відкиду контактів по кожному із полюсів силового агрегату. При ввімкненні знос силових контактів визначається на основі порівняння діючого тягового зусилля ввімкнення із загальною електродинамічною силою відкиду по усіх полюсах контактної системи. При вимкненні знос силових контактів визначається на основі порівняння діючого приводного тягового зусилля вимкнення із мінімально допустимим тяговим зусиллям для процесу вимкнення вакуумного вимикача. Якщо різниці зусилля при ввімкненні відрізняється менше, ніж на задане значення  $\delta$  від загального електродинамічного зусилля відкиду контактів або величина діючого тягового зусилля при вимкненні відрізняється менше ніж на задане значення  $\sigma$  від мінімально допустимого тягового зусилля вимкнення формується сигнал зносу контактної системи вакуумного вимикача. Застосування запропонованої математичної моделі дозволить своєчасно попереджувати обслуговуючий персонал про зношення контактної системи із-за дугових процесів, які виникають у дугогасильній камері вакуумного вимикача.

**Ключові слова:** математична модель, контакт, знос, комутація, діагностування, вакуумний вимикач.

**В. В. ГРАБКО, О. В. ДИДУШОК**

### **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЫЯВЛЕНИЯ ИЗНОСА КОНТАКТНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ КОММУТАЦИИ ВАКУУМНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ**

В работе рассмотрена роль вакуумных выключателей среди коммутационных аппаратов среднего напряжения. В работе рассмотрены преимущества применения вакуумных коммутационных аппаратов, и особенности использования электромагнитной зацепки в качестве приводного механизма. Описано влияние замыкания (включение) и размыкания (выключения) силовых контактов на износ контактной системы выключателя. Рассмотрены физические процессы в контактных соединениях, которые возникают при коммутации вакуумного выключателя и их влияние на износ контактной системы. При коротких замыканиях возможно сварка контактов в замкнутом положении и выгорания и оплавления при их отключении. Разработанная математическая модель позволяет определять износ коммутационной системы при включении и выключении вакуумного выключателя. При замыкании силовых контактов выключателя учитывается общая электродинамическая сила откида контактов по каждому из полюсов силового агрегата. При включении износ силовых контактов определяется на основе сравнения действующего тягового усилия включения с общей электродинамической силой откида по всем полюсам контактной системы. При отключении износ силовых контактов определяется на основе сравнения действующего приводного тягового усилия выключения с минимально допустимым тяговым усилием для процесса отключения вакуумного выключателя. Если разницы усилия при включении отличается менее чем на заданное значение  $\delta$  от общего электродинамического усилия откида контактов или величина действующего тягового усилия при выключении отличается менее чем на заданное значение  $\sigma$  минимально допустимого тягового усилия выключения формируется сигнал износа контактной системы вакуумного выключателя. Применение предложенной математической модели позволит своевременно предупредить обслуживающий персонал об износе контактной системы из-за дуговых процессов, которые возникают в дугогасительной камере вакуумного выключателя.

**Ключевые слова:** математическая модель, контакт, износ, коммутация, диагностирования, вакуумный выключатель.

**V. V. HRABKO, O. V. DIDUSHOK**

### **MATHEMATICAL MODEL OF DETECTION OF WEAR OF A CONTACT SYSTEMS WHEN SWITCHING A VACUUM SWITCH**

The paper considers the role of vacuum circuit breakers among medium voltage switching devices. The paper discusses the advantages of using vacuum switching devices and the features of the use of an electromagnetic latch as a drive mechanism. The influence of the circuit (on) and the opening (off) of the power contacts is described in the wear of the contact system of the switch. Consider the physical processes in contact contacts that occur during switching of the vacuum switch and their influence on contact system wear. In the short-circuit mode, the contacts can be welded in the closed position and there may be burning and melting the contacts when they are disconnected. The developed mathematical model makes it possible to determine the wear of the switching system when the vacuum switch is turned on and off. When the circuit breakers are closed, the total electrodynamic force of the contacts for each of the poles of the power unit is taken into account. When enabled, the wear of the power contacts is determined on the basis of a comparison of the current traction effort of inclusion with the total electrodynamic force of the rejection over all contact system poles. When disconnected, the wear of the power contacts is determined on the basis of a comparison of the driving traction effort with the offset with the minimum allowable traction effort for the process of switching off the vacuum switch. If the difference in force when the switching is differs by less than the specified value  $\delta$  from the total electrodynamic force of the contact rejection or the current tractive power when switched off differs by less than the specified value  $\sigma$  of the minimum permissible traction effort, switch contact system wear signal. The application of the proposed mathematical model will allow the service staff to be warned in a timely manner about the wear of the contact system due to the arc processes that arise in the arc-vacuum chamber of the vacuum circuit breaker.

**Key words:** mathematical model, contact, wear, switching, diagnosing, vacuum circuit breaker.

**Вступ.** В останні роки відзначається інтенсивне використання вакуумних вимикачів середньої напруги в електропостачанні промислових підприємств України. Вакуумна комутаційна техніка має ряд переваг: висока швидкодія, вибухо- і пожежобезпечність, екологічна чистота, широкий температурний діапазон експлуатації, мінімальні експлуатаційні витрати, висока зносостійкість при комутації струмів навантаження та номінальних струмів порівняно із іншими типами комутаційної техніки, підвищена стійкість до ударних і вібраційних навантажень, мінімальні габаритні розміри. У вакуумних вимикачах застосовують переважно електромагнітний привід, який надійніший від пружинного. Пружинний привід має складну конструкцію і, як наслідок, необхідність більш частого і кваліфікованого обслуговування. Конструкція електромагнітних приводів така, що застосування безпосереднього з'єднання силового елемента приводу з рухомими контактами дугогасильної камери через тяговий ізолятор є простою та ефективною кінематичною схемою, підвищується надійність роботи приводу, але в той же час це призводить до зниження ремонтпридатності. За рахунок заміни механічної зачіпки на магнітну зменшується тертя рухомих частин, які не вимагають періодичного застосування мастила. Застосування у приводах вакуумних вимикачів невеликої кількості деталей дозволяє протягом всього терміну експлуатації і без проведення експлуатаційних, ремонтних та профілактичних робіт підвищити надійність роботи вимикача в цілому і збільшити ресурс механічної стійкості.

Контактна система вакуумних вимикачів поміщена у вакуум, електрична міцність якого у багато разів вище, ніж повітря при атмосферному тиску. Гасіння дуги відбувається при першому переході струму через нуль за рахунок дифузії заряджених частинок із області дуги в навколишній простір. Запалюється дуга внаслідок іонізації парів металевих контактів [1]. При розмиканні контактів перетин контактних майданчиків зменшується, опір і температура збільшуються, відбувається розплавлення і випаровування металу. Для зменшення зносу розробники вакуумних вимикачів прагнуть в контактній системі вимикача застосовувати тугоплавкі метали. Оскільки оптимального матеріалу для контактів не знайдено їх виготовляють із різних сплавів. Для зменшення зносу при комутації вимикача контакти виготовляють у вигляді спеціальних конструкцій. Перелічені заходи не завжди призводять до зменшення зносу силових контактів, тому дослідження ступеня зносу силових контактів є актуальною задачею.

У роботі [2] розроблена модель розрахунку граничного струму зварювання контактів вакуумного вимикача. Дана модель зручна для аналізу теплових процесів та розрахунку граничного струму зварювання, але не може бути застосована у задачах діагностування ступеню зносу контактної системи. Запропонований спосіб випробування вакуумних вимикачів на стійкість при струмах короткого замикання, що представлено у роботі [3], дозволяє підвищувати надійність роботи вакуумного вимикача.

Представлений спосіб складний у реалізації і має низьку точність вимірювання. У роботі [4] авторами описано вплив зміщення розташування елементів контактної пари на комутацію вакуумного вимикача. У роботі [5] запропоновано використовувати силу утримання приводу, як критерій оцінки основних характеристик вакуумних вимикачів. Даний спосіб не може бути застосований для електромагнітного приводу вакуумних вимикачів із магнітною зачіпкою, оскільки привод утримується у крайніх положеннях магнітною зачіпкою із фіксованою силою утримання. Автори у роботах [6,7] пропонують здійснювати аналіз механічних процесів у вакуумних вимикачах із врахуванням електродинамічної сили, але лише для процесу ввімкнення вакуумного вимикача. У роботі [8] представлено розрахунок динамічних характеристик вимикача із врахування електродинамічних сил відкиду силових контактів. Автор у роботі [9] детально описує дуговий процес, який протікає при комутації вакуумного вимикача, але не оцінює його вплив на подальшу експлуатацію контактної пари. У роботі [10] представлено методи обчислення напруги відновлення перехідних процесів при комутаціях вакуумних вимикачів, але не враховано первинні дугові процеси, які мають більший вплив на роботу контактної системи.

**Метою роботи** є розробка математичної моделі для виявлення та попередження зношення контактної системи вакуумного вимикача під час комутації, що дозволить підвищити надійність роботи вакуумного вимикача в цілому.

**Результати дослідження.** Роботоздатність комуючих контактів характеризується процесами при їх замиканні (ввімкнення) та розмиканні (вимкнення). При комутації вимикача відбувається знос силових контактів. Під зносом контактів розуміють руйнування робочих поверхонь силових контактів, що приводить до зміни їх форми, розміру, маси і до зменшення провалу. У більшості випадків електричний знос контактів (електрична ерозія) більший від зносу, який спричинений механічними факторами. Знос має місце як при розмиканні, так і при замиканні.

При розмиканні сила, що стискає контакти, знижується до нуля, різко зростають перехідний опір контакту і щільність струму в місці контакту. В місці контакту збільшується температура, і між розмикаючими контактами утворюється контактний перешийок із розплавленого металу, який в подальшому розривається. При цьому в проміжку між контактами можуть виникнути різні форми електричного розряду. При напрузі і струмі, більших мінімально необхідних виникає дуговий розряд. Якщо струм менший мінімально необхідного, а напруга вище напруги запалювання дуги, то виникає іскровий розряд. Вплив електричної дуги в процесі відключення контактів призводить до ерозійного руйнування контактів. Інтенсивність руйнування контактів залежить від багатьох факторів – струм відключення, час горіння дуги, властивості контактного матеріалу.

При замиканні вимикача відстань між контактними поверхнями поступово зменшується.

При деякій відстані між ними відбувається пробій, виникає дуга, яка гасне при замиканні контактів. Знос від цього явища слід враховувати в апаратах на середню та високу напругу. Він викликаний вібрацією контактів, що виникає при замиканні. Рухомий контакт підходить до нерухомого з певною швидкістю. При зіткненні відбувається пружна деформація матеріалу обох контактів. Вібрація при замиканні можлива унаслідок удару при втягуванні якоря. Знос при цьому може бути більшим, ніж від удару самих контактів, оскільки вібрація контактів відбувається при набагато більших миттєвих значеннях струму.

Важливою є робота контактної системи вимикача при короткому замиканні. При коротких замиканнях виникають важкі умови роботи як для замкнутих, так і для комутуючих контактів. При коротких замиканнях присуття небезпека зварювання контактів при знаходженні їх у замкнутому положенні (у випадку наскрізного струму короткого замикання) і тим більше в момент замикання (включення на коротке замикання). При короткому замиканні має місце не тільки різке збільшення струму, але й збільшення перехідного опору контакту через ослаблення контактного натиснення, що викликається електродинамічними силами. Теплова енергія, що виділяється в місці контакту різко зростає і може викликати зварювання контактів. Зварювання замкнутих контактів відбувається за рахунок електродинамічного відкиду, коли електродинамічні сили дорівнюють або перевищують контактне натискання. Дуга, що виникає при відкиді контактів, викликає значне оплавлення робочих поверхонь і їх зварювання при замиканні. При вмиканні на коротке замикання вірогідність зварювання контактів зростає як за рахунок можливої вібрації, так і меншого приводного зусилля. При відключенні струмів короткого замикання контакти вигоряють і оплавляються.

Дуга у вакуумі існує за рахунок іонізації парів контактного матеріалу і її характеристики визначають перш за все властивості матеріалів електродів. Характер протікання процесів залежить від властивостей матеріалу електродів і їх конструктивних особливостей. Дуга у вакуумі горить поки на електродах виділяється енергія, достатня для підтримання в міжконтактному проміжку концентрації парів металу, при якому може існувати дуговий розряд. При підході струму до нульового значення енергія, яка виділяється на електродах різко зменшується і дуга згасає до переходу струму через нульове значення. В роботі [11] наведено залежність енергії дуги від струму відключення для різних матеріалів контактів, рисунок 1.

Для мідних торцевих контактів (крива 1) та сплаву мідь-вольфрам (крива 2) дифузна форма дуги зберігається при струмі до 5 кА. Енергія, що виділяється при горінні дуги, зростає плавно. При збільшенні струму більше 5,5 ÷ 6 кА виникає стрибкоподібно стисла дуга, яка характеризується різким збільшенням енергії дуги та ерозією контактів. Граничний струм переходу дуги з одного стану в інший залежить від матеріалу, геометричної форми і розмірів контактів, а також від швидкості зміни струму.

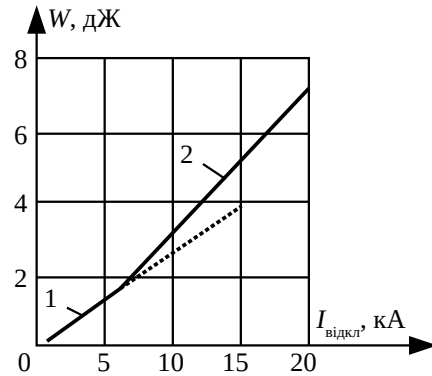


Рис. 1. Залежність енергії яка виділяється в дузі від відключаючого струму у вакуумі

Дифузна дуга у вакуумі існує у вигляді декількох паралельних дуг одночасно, через кожну з яких може протікати струм від декількох десятків до декількох сотень ампер. При цьому катодні плями відштовхуються одна від одної і прагнуть охопити всю контактну поверхню.

При збільшенні струму сили електромагнітної взаємодії долають сили відштовхування і відбувається злиття окремих дуг в один канал, що призводить до різкого збільшення розмірів катодної плями. Внаслідок цього з'являються значні труднощі гасіння дуги або відбувається повна відмова камери. Тому виробники створюють конструкцію камери такою, щоб дуга існувала у дифузній формі або час дії стислої дуги був мінімальний. Це досягається створенням радіальних і аксіальних магнітних полів, які забезпечують переміщення опорних точок дуги із високою швидкістю по електродах.

Для отримання поперечних радіальних і поздовжніх аксіальних магнітних полів розроблені різні конструкції контактних систем. У вакуумних камерах на номінальну напругу 10 кВ та номінальні струми відключення до 50 кА застосовують контактні системи із поперечним радіальним магнітним полем (рис. 2,б). Контактні системи із спіральними «пелюстками» мають форму дисків із розрізаними спіральними пазами на сегменти, які з'єднані у центральній частині контакту. При розмиканні контактів дуга під дією електродинамічних сил, що виникають із викривленням контуру струму, переміщується на периферійні ділянки контактів. При цьому у металевих прорізах створюється радіальне магнітне поле під впливом якого дуга переміщується по периферійних ділянках контактів. У дисках із розрізами виникає радіальне магнітне поле під впливом якого дуга переміщується по периферійних ділянках із високою швидкістю, що не викликає появи великих розплавлених зон на електродах. Зі збільшенням струму більше 50 кА дуга розпочинає розплавляти крайні частини спіральних дисків. Тому даний тип контактної системи застосовують на струми до 50 кА.

Контактні системи із поздовжнім магнітним полем (рис. 2,а) дозволяють комутувати струми до 200 кА. Створення аксіального паралельного магнітного поля не дає можливості дугам з'єднатися, що дозволяє зберегти дугу у дифузному стані.

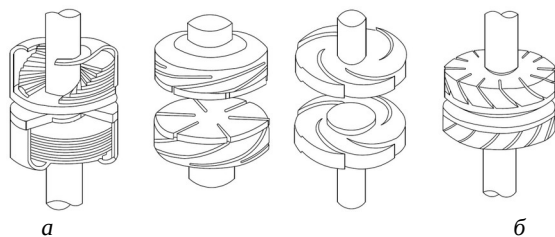


Рис. 2. Типи контактної системи вакуумного вимикача:  
а – контактна система із поздовжнім магнітним полем;  
б – контактна система із поперечним магнітним полем

Струм від центрального струмопроводу розтікається по радіально розташованим струмопровідним пластинам, що закінчуються на периферії провідниками кільцевої форми. Це створює один виток, через який протікає струм відключення. Кінці цих кільцевих дуг з'єднуються безпосередньо з електродами, на якому і відбувається процес виникнення і гасіння дуги. Контактуючі поверхні електродів мають радіальні прорізи, які перешкоджають злиттю дуг.

На рисунку 3 представлено залежність струму відключення від діаметрів контактів вакуумного вимикача для різних типів контактної системи. Рисунок підтверджує область застосування контактної системи із поперечним магнітним полем на відключаючі струми до 50 кА, а для контактної системи із поздовжнім магнітним полем на відключаючі струми до 200 кА.

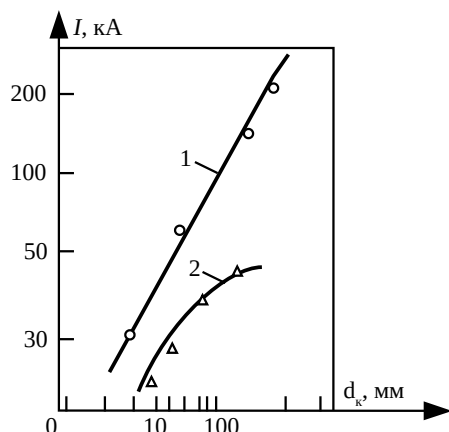


Рис. 3. Залежність відключаючої спроможності вакуумної камери вимикача від діаметра контактів:  
1 – контакти із поздовжнім магнітним полем;  
2 – контакти із поперечним магнітним полем

Незважаючи на технічні рішення виробників вакуумних комутаційних апаратів при конструюванні контактної системи, торцеві контакти мають недостатню динамічну стійкість. При великих струмах виникає відкид контактів, викликаний силами звуження ліній струму у контактах та вибух контактної містки. При протіканні великого струму контактний місток нагрівається до високої температури і переходить у пароподібний стан. Цей пар створює тиск, який відкидає контакти. Процеси плавлення і зварювання контактів досліджуються переважно експериментальним шляхом і за результатами вимірювань кінцевих значень досліджуваних параметрів.

Зауважимо при аналітичному розрахунку важко

врахувати вплив ряду факторів на процес зварювання контактів – роль поверхневих плівок контактів, зміна властивостей матеріалу при швидкій зміні струму та інші [12].

Отже, постає завдання розробки математичної моделі виявлення рівня зносу комутаційної системи при комутації вакуумного вимикача із електромагнітним приводом.

Розглянемо рівняння електричного кола обмотки електромагніта вакуумного вимикача [13]:

$$u = i \cdot R_a + \frac{d\Psi}{dt}, \quad (1)$$

де  $u$  – напруга живлення обмотки електромагніту;  
 $i$  – миттєве значення струму в обмотці електромагніту;  
 $R_a$  – активний опір обмотки;  
 $\Psi$  – миттєве значення потозчеплення обмотки;  
 $t$  – час.

Рівняння (1) можна записати у вигляді:

$$\frac{d\Psi}{dt} = u - i \cdot R_a. \quad (2)$$

Домноживши рівняння (1) на вираз  $idt$ , отримуємо рівняння енергетичного балансу:

$$u \cdot idt = i^2 \cdot R_a dt + i \cdot d\Psi. \quad (3)$$

В будь-який момент часу  $t$  справедливе рівняння:

$$\int_0^t u \cdot idt = \int_0^t i^2 \cdot R_a dt + \int_0^\Psi id\Psi, \quad (4)$$

де  $\int_0^t u \cdot idt$  – електрична енергія джерела живлення;  
 $\int_0^t i^2 \cdot R_a dt$  – втрати енергії в активному опорі обмотки електромагніту;  
 $\int_0^\Psi id\Psi$  – енергія, що затрачена на створення магнітного поля.

Відповідно до закону збереження енергії, енергія отримана магнітним полем при елементарному переміщенні якоря, визначається механічною роботою здійсненою якорем, і зміною запасу електромагнітної енергії:

$$i \cdot d\Psi = F_\tau dx + dW_m, \quad (5)$$

де  $i \cdot d\Psi$  – елементарна енергія отримана полем при переміщенні якоря;  
 $F_\tau dx$  – елементарна робота, що здійснена якорем;  
 $dW_m$  – приріст магнітної енергії;  
 $x$  – переміщення якоря;  
 $F_\tau$  – тягове зусилля якоря.

Із рівняння (5) отримуємо:

$$F_\tau = i \cdot \frac{d\Psi}{dx} - \frac{dW_m}{dx}. \quad (6)$$

Відомо [13], що енергія магнітного поля:

$$W_m = \frac{1}{2} \cdot i \cdot \Psi. \quad (7)$$

Враховуючи рівняння (7) та умови при яких втрати на гістерезис відсутні, магнітопровід магнітної системи електромагніту ненасичений, рівняння (6) можна записати:

$$F_\tau = i \cdot \frac{d\Psi}{dx} - \frac{1}{2} \cdot \Psi \cdot \frac{di}{dx} - \frac{1}{2} \cdot i \cdot \frac{d\Psi}{dx}. \quad (8)$$

Зважаючи, що струм  $i$  обмотки електромагніту при елементарному переміщенні  $dx$  не змінюється, вираз тягового зусилля (8) буде мати вигляд:

$$F_\tau = \frac{1}{2} \cdot i \cdot \frac{d\Psi}{dx}. \quad (9)$$

Швидкість руху  $V$  якоря є похідною від його переміщення  $x$ , яка залежить від часу:

$$V = \frac{dx}{dt}. \quad (10)$$

Рівняння (10) можна записати у вигляді:

$$dx = V \cdot dt. \quad (11)$$

Із врахуванням (11) рівняння тягового зусилля (9) запишеться:

$$F_\tau = \frac{i}{2 \cdot V} \cdot \frac{d\Psi}{dt}. \quad (12)$$

Проходження струмів короткого замикання та близьких до них через замкнуті контакти або ті, що замикаються супроводжується різким збільшенням температури в контактній площадці і виникненням електродинамічного зусилля відкиду, що може привести до зварювання контактів або самовільного розмикання контактів вимикача. Електродинамічна сила відкиду має найбільший вплив на процес ввімкнення та стійкість при проходженні струмів близьких до короткого замикання у замкнутому положенні. Збільшення цієї сили порівняно із тяговим зусиллям при ввімкненні характеризується сильним зносом контактної системи та оплавленням контактів. Тому для надійної роботи контроль електродинамічної сили відкиду при замиканні вакуумного вимикача є важливою задачею. Електродинамічне зусилля відкиду визначається [13]:

$$F_{ед} = 10^{-7} \ln \frac{r_k}{r_o} \quad (13)$$

де  $i$  – струм, що протікає через комутуючі контакти;  
 $r_k$  – радіус комутуючого контакту;  
 $r_o$  – радіус металевого перешийка в контакті вимикача.

На рисунку 4 зображено напрямки електродинамічного зусилля протидії замкнутим контактам, при протіканні струмів через контакту систему вимикача.

При зміні перерізу провідника лінії струму змінюються і виникає поздовжня сила  $F_{ед}$ , що може розірвати місце переходу вздовж осі двох контактів.

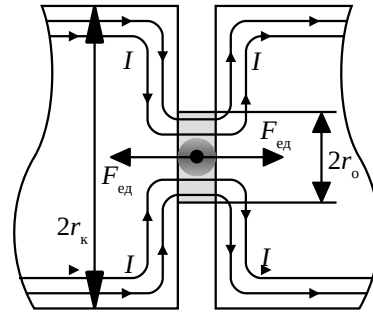


Рис. 4. Електродинамічні сили в замкнутих контактах при протіканні струму

Розглянемо математичну модель діагностування силових контактів при ввімкненні та вимкненні вакуумного вимикача. Для процесу замикання силових контактів (задіяна обмотка ввімкнення) рівняння (2) зміниться відповідно до вимірних значень при ввімкненні вимикача:

$$\frac{d\Psi_{об,ввим}}{dt} = u_{об,ввим} - i_{об,ввим} \cdot R_{об,ввим}. \quad (14)$$

Швидкість ввімкнення згідно рівняння (10) для процесу ввімкнення вакуумного вимикача буде мати вигляд:

$$V_{ввим} = \frac{dx}{dt}. \quad (15)$$

Рівняння тягового зусилля (12) при ввімкненні вакуумного вимикача:

$$F_{т,ввим} = \frac{i_{об,ввим}}{2 \cdot V_{ввим}} \cdot \frac{d\Psi_{об,ввим}}{dt}. \quad (16)$$

Розглянемо розрахунок загальної електродинамічної сили відкиду для усієї контактної системи із врахуванням кожного полюсу (полюси А, В, С):

$$F_{ед,заг} = 10^{-7} i_A^2 \ln \frac{r_{к,А}}{r_{о,А}} + 10^{-7} i_B^2 \ln \frac{r_{к,В}}{r_{о,В}} + 10^{-7} i_C^2 \ln \frac{r_{к,С}}{r_{о,С}}. \quad (17)$$

де  $i_A, i_B, i_C$  – миттєве значення струму, який протікає через полюси А, В, С вакуумного вимикача відповідно;

$r_{к,А}, r_{к,В}, r_{к,С}$  – радіус комутуючих контактів в кожному із полюсів А, В, С вакуумного вимикача відповідно;

$r_{о,А}, r_{о,В}, r_{о,С}$  – радіус металевих перешийків контакту в кожному із полюсів А, В, С вакуумного вимикача відповідно.

Аналогічні процеси можна описати для процесу розмикання силових контактів. Рівняння (2) для процесу вимкнення вакуумного вимикача буде мати вигляд:

$$\frac{d\Psi_{об,вим}}{dt} = u_{об,вим} - i_{об,вим} \cdot R_{об,вим}. \quad (18)$$

Рівняння (10) для процесу вимкнення вакуумного вимикача:

$$V_{вим} = \frac{dx}{dt}. \quad (19)$$

Рівняння тягового зусилля (12) при вимкненні вакуумного вимикача (задіяна обмотка вимкнення):

$$F_{\text{т.вим}} = \frac{i_{\text{об.вим}}}{2 \cdot V_{\text{вим}}} \cdot \frac{d\Psi_{\text{об.вим}}}{dt}. \quad (20)$$

Порівнюючи діюче тягове зусилля та загальну електродинамічну силу відкиду контактів при замиканні і діюче тягове зусилля із мінімально допустимим тяговим зусиллям для процесу розмикання, можна отримати виявлення зносу контактної системи при комутації вакуумного вимикача. Якщо величина діючого тягового зусилля при ввімкненні відрізняється менше, ніж на задане значення  $\delta$  від загального електродинамічного зусилля відкиду контактів або величина діючого тягового зусилля при вимкненні відрізняється менше, ніж на задане значення  $\sigma$  від мінімально допустимого тягового зусилля вимкнення, то формується сигнал виявлення зносу силових контактів контактної системи вимикача.

$$\begin{cases} K=0, \text{ якщо } (F_{\text{т.вим}} - F_{\text{ед.заг}} > \delta) \vee (F_{\text{т.вим}} - F_{\text{т.вим}}^{\text{доп}} > \sigma); \\ K=1, \text{ якщо } (F_{\text{т.вим}} - F_{\text{ед.заг}} \leq \delta) \vee (F_{\text{т.вим}} - F_{\text{т.вим}}^{\text{доп}} \leq \sigma). \end{cases} \quad (21)$$

де  $\delta$  – порогове значення різниці діючої сили тяги та загального електродинамічного зусилля протидії при ввімкненні вимикача;

$\sigma$  – порогове значення різниці діючої сили тяги та мінімально допустимого тягового зусилля розмикання при вимкненні вимикача;

$F_{\text{т.вим}}^{\text{доп}}$  – мінімально допустиме тягове зусилля розмикання при вимкненні вимикача (визначається експериментальним шляхом);

$K$  – логічна змінна, що характеризує виявлення зносу контактної системи вакуумного вимикача.

Зведемо рівняння (14 ÷ 21) в одну систему рівнянь, які є математичним описом роботи розробленої системи виявлення зносу контактної системи при комутації вакуумного вимикача:

$$\begin{cases} \frac{d\Psi_{\text{об.вим}}}{dt} = u_{\text{об.вим}} - i_{\text{об.вим}} \cdot R_{\text{об.вим}}; \\ V_{\text{вим}} = \frac{dx}{dt}; \\ F_{\text{т.вим}} = \frac{i_{\text{об.вим}}}{2 \cdot V_{\text{вим}}} \cdot \frac{d\Psi_{\text{об.вим}}}{dt}; \\ \frac{d\Psi_{\text{об.вим}}}{dt} = u_{\text{об.вим}} - i_{\text{об.вим}} \cdot R_{\text{об.вим}}; \\ V_{\text{вим}} = \frac{dx}{dt}; \\ F_{\text{т.вим}} = \frac{i_{\text{об.вим}}}{2 \cdot V_{\text{вим}}} \cdot \frac{d\Psi_{\text{об.вим}}}{dt}; \\ F_{\text{ед.заг}} = 10^{-7} i_A^2 \ln \frac{r_{\text{к.А}}}{r_{\text{о.А}}} + 10^{-7} i_B^2 \ln \frac{r_{\text{к.В}}}{r_{\text{о.В}}} + 10^{-7} i_C^2 \ln \frac{r_{\text{к.С}}}{r_{\text{о.С}}}; \\ K=0, \text{ якщо } (F_{\text{т.вим}} - F_{\text{ед.заг}} > \delta) \vee (F_{\text{т.вим}} - F_{\text{т.вим}}^{\text{доп}} > \sigma); \\ K=1, \text{ якщо } (F_{\text{т.вим}} - F_{\text{ед.заг}} \leq \delta) \vee (F_{\text{т.вим}} - F_{\text{т.вим}}^{\text{доп}} \leq \sigma). \end{cases} \quad (22)$$

Отже, розроблена математична модель (22) дозволяє визначити знос контактної системи в процесі роботи вакуумного вимикача. Сигнал про зношення контактів формується як при ввімкненні так і при вимкненні вимикача. Застосування розробленої математичної моделі дозволяє вчасно попереджувати оперативний персонал про критичний стан контактної системи вимикача, необхідність виведення його в ремонт та запобігання його подальшого пошкодження.

**Висновок.** Вакуумні вимикачі мають ряд переваг серед інших типів комутаційних апаратів. Найпоширенішим типом приводного механізму у вакуумних вимикачах є електромагнітна зачіпка.

Дугові процеси під час комутації вакуумних вимикачів у контактних з'єднаннях призводять до зношення контактної системи. Для зменшення негативної дії горіння дуги на контактну систему у вакуумних дугогасильних камерах виробники створюють різні конструкції силових контактів вимикачів. Важливим є контроль електродинамічної сили відкиду при ввімкненні вакуумного вимикача. Розроблена математична модель дозволяє завчасно виявляти зношення контактної системи при комутації вакуумного вимикача. Окремо розглядається процес визначення зносу силових контактів при ввімкненні і при вимкненні вимикача. При ввімкненні здійснюється порівняння тягового зусилля із загальною електродинамічною силою відкиду по усіх полюсах контактної системи. При вимкненні порівнюється діюче привідне тягове зусилля із мінімально допустимим тяговим зусиллям для процесу вимкнення.

Запропонована модель дозволяє своєчасно виявляти порушення роботи контактної системи та попереджувати відмову роботи вакуумного вимикача.

#### Список літератури

1. Раховский В.И. Физические основы коммутации электрического тока в вакууме. Москва: Наука, 1970. 536 с.
2. Байда Е.И. Мультифизическая модель расчета граничного тока сваривания контактов вакуумного выключателя. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Харків: НТУ «ХПІ», 2014, № 41. С. 3 – 9.
3. Перцев А.А., Белотелов В.П., Рыльская Л.А. Способ испытаний вакуумных выключателей на стойкость при сквозных токах короткого замыкания. Патент RU, № 2269140, 2006.
4. Деева В.С., Слободян С.М. Модель коагуляции контакта вакуумного выключателя. *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИ-ЭМ*. Москва: САМ-ПОЛИГРАФИСТ. 2013, № 4. С.39 – 42.
5. Аношин О.А., Петров П.В., Малаховский С.И. О возможности использования силы удержания привода как критерия оценки основных характеристик вакуумных выключателей. *Электрические сети и системы*. Київ: Редакція журналу Електричні мережі та системи. 2005, № 6. С.10 – 12.
6. Wang X., Rong M., Wu Y., Yang F., Jia S. Analyses of mechanical characteristics of vacuum circuit breaker during the closing process taking electrodynamic force into account. *IET Science, Measurement & Technology*. 2007. Vol. 1, issue 6. pp. 323 – 328.
7. Rong M., Wang X., Yang W., Jia S. Theoretical and experimental analyses of the mechanical characteristics of a medium-voltage circuit breaker. *IEEE Proceedings - Science, Measurement and Technology*. 2005. Vol. 152, issue 2. pp. 45 – 49.
8. Kang J., Choi S., En D., Kim H., Jung H. Development and Analysis of New Type of Switchgear for High Voltage Gas Circuit Breaker. *Proceedings of the 6th WSEAS/IASME International Conference on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines*. Tenerife, Spain, 2006. pp. 80 – 84.

9. Zhan X., Liu X., Li L., Zhu G., Li P. Experimental research on arc characteristics for a 40.5-kV vacuum circuit breaker. *The 14th IET International Conference on AC and DC Power Transmission*. Chengdu, China, 2018. Vol. 2019, issue 16. pp. 2777 – 2780.
10. Soloot A., Gholami A., Niayesh K. Study on Post Arc Current and Transient Recovery Voltage in Vacuum Circuit Breaker. *International Review on Modelling and Simulations*. 2011. Vol. 4, issue 2. pp. 699 – 709.
11. Александров Г.Н., Борисов Г.С., Каплан Г.С. *Теория электрических аппаратов: учебник для вузов*. Санкт-Петербург: СПбГТУ, 2000. 540 с.
12. Холявский Г.Б. *Расчет электродинамических усилий в электрических аппаратах*. Ленинград: Энергия, 1971. 156 с.
13. Чунинин А.А. *Электрические аппараты*. Москва: Энергоатомиздат, 1988. 720 с.
6. Wang X., Rong M., Wu Y., Yang F., Jia S. Analyses of mechanical characteristics of vacuum circuit breaker during the closing process taking electrodynamic force into account. *IET Science, Measurement & Technology*. 2007, vol. 1, issue 6. pp. 323 – 328.
7. Rong M., Wang X., Yang W., Jia S. Theoretical and experimental analyses of the mechanical characteristics of a medium-voltage circuit breaker. *IEEE Proceedings - Science, Measurement and Technology*. 2005, vol. 152, issue 2. pp. 45 – 49.
8. Kang J., Choi S., En D., Kim H., Jung H. Development and Analysis of New Type of Switchgear for High Voltage Gas Circuit Breaker. *Proceedings of the 6th WSEAS/IASME International Conference on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines*. Tenerife, Spain, 2006. pp. 80 – 84.
9. Zhan X., Liu X., Li L., Zhu G., Li P. Experimental research on arc characteristics for a 40.5-kV vacuum circuit breaker. *The 14th IET International Conference on AC and DC Power Transmission*. Chengdu, China, 2018, vol. 2019, issue 16. pp. 2777 – 2780.
10. Soloot A., Gholami A., Niayesh K. Study on Post Arc Current and Transient Recovery Voltage in Vacuum Circuit Breaker. *International Review on Modelling and Simulations*. 2011, vol. 4, issue 2. pp. 699 – 709.
11. Александров Г.Н., Борисов Г.С., Каплан Г.С. *Теория электрических аппаратов: учебник для вузов* [Theory of electrical apparatus: a textbook for universities]. Санкт-Петербург: СПбГТУ, 2000. 540 p.
12. Холявский Г.Б. *Расчет электродинамических усилий в электрических аппаратах* [Calculation of electrodynamic forces in electrical apparatus]. Ленинград: Энергия, 1971. 156 p.
13. Чунинин А.А. *Электрические аппараты* [Electrical apparatus]. Москва: Энергоатомиздат, 1988. 720 p.

## References (transliterated)

1. Rahovskij V.I. *Fizicheskie osnovy kommutacii jelektricheskogo toka v vakuume* [Physical basics of switching electric current in vacuum]. Moskva: Nauka, 1970. 536 p.
2. Bajda E.I. Mul'tifizicheskaja model' rascheta granichnogo toka svarivaniya kontaktov vakuumnogo vykljuchatelja [Multiphysical model for calculating the boundary current for welding contacts of a vacuum switch]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»* [Bulletin of the National Technical University «KhPI»]. Kharkiv: NTU «KhPI», 2014, № 41. pp. 3 – 9.
3. Percev A.A., Belotelov V.P., Ryl'skaja L.A. *Sposob ispytanyj vakuumnyh vykljuchatelej na stojkost' pri skvoznyh tokah korotkogo замыкания* [Test method of vacuum circuit breakers for resistance under short-circuit currents]. Patent RU, № 2269140, 2006.
4. Deeva V.S., Slobodjan S.M. Model' koagulyacii kontakta vakuumnogo vykljuchatelja [Contact switch coagulation model]. *Voprosy jelectromehanika Trudy VNIJeM* [Electromechanical matters. VNI-IEM studies]. Moskva: SAM -POLIGRAFIST. 2013, №4. pp. 39 – 42.
5. Anoshin O.A., Petrov P.V., Malahovskij S.I. *O vozmozhnosti ispol'zovaniya sily uderzhanija privoda kak kriterija ocenki osnovnyh harakteristik vakuumnyh vykljuchatelej* [On the possibility of using the force of holding the drive as a criterion for evaluating the main characteristics of vacuum switches]. *Elektricheskie seti i sistemy* [Electricity grid and system]. Kyiv: Redaktsiia zhurnala Elektrychni merezhi ta systemy. 2005, № 6. pp. 10 – 12.

Надійшла 17.01.2020

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Грабко Володимир Віталійович (Грабко Владимир Витальевич, Hrabko Volodymyr Vitaliyovych)** – доктор технічних наук, професор, Вінницький національний технічний університет, професор кафедри електро-механічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті; м. Вінниця, Україна; e-mail: grabko@vntu.edu.ua

**Дідушок Олег Васильович (Дидушок Олег Васильевич, Didushok Oleh Vasylovych)** – інженер автоматизованих систем керування виробництвом, Вінницька філія ТОВ КСК-Автоматизація; м. Вінниця, Україна; e-mail: didushokov@gmail.com