

УДК 621.316

## ОСОБЛИВОСТІ ГОРІННЯ І ГАСІННЯ ДУГИ ЗМІННОГО СТРУМУ

Коханівський С.П., к.т.н.,

Радько І.П., к.т.н.

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Тел. (044) 527-87-36

**Анотація** - розглянуто фізіологічні процеси, що відбуваються в електричних контактах під час їх розмикання та замикання. Проведено розрахунок потужності та енергії, яка виділяється в дузі.

**Ключові слова** - дуга, контакти, напруга, електричний струм.

*Постановка проблеми.* Вивчення фізичних процесів, які відбуваються при горінні і гасінні дуги має велике прикладне значення. Від повноти їх розуміння залежить ефективна робота контактів – основи більшості електричних апаратів.

*Аналіз останніх досліджень.* Існуючі наукові дослідження недостатньо розкривають механізм горіння і гасіння дуги. Фактори які впливають на данні процеси розглядаються окремо [1-4].

*Метою дослідження* є визначення енергії дуги в контактах, особливості її горіння та гасіння.

*Основна частина.* Опір дуги  $R_d$  незалежно від роду струму можна вважати чисто активним. Він є величиною змінною, яка зменшується з ростом струму, і може бути визначений з вольт-амперної характеристики дуги. Опір дуги

$$R_d = \frac{U_d}{i} \quad (1)$$

Потужність електричної дуги

$$P_d = U_d \cdot I \quad (2)$$

Енергія, що виділяється в дузі за час  $t_g$  її горіння

$$W_d = \int_0^{t_g} U_d \cdot i \cdot dt \quad (3)$$

Для комутаційних електричних апаратів суттєве значення має визначення значення цієї енергії за один цикл вимикання. Підставивши в (3) значення  $U_0$ , одержимо для дуги постійного струму

$$W_a = \int_0^{t_2} R(I_0 - i)dt + \int_{I_0}^0 L \cdot i \cdot dt = L \frac{I_0^2}{2} + \int_0^{t_2} R(I_0 - i)dt = W_m + W_z, \quad (4)$$

де  $W_m = L \frac{I_0^2}{2}$  - згенерована енергія магнітного поля кола, що вимикається;

$W_z = \int_0^{t_2} R(I_0 - i)dt$  - енергія, що надходить від генератора в дугу за

час її горіння;  $I_0 = \frac{U}{R}$  - початкове значення струму.

Таким чином, незалежно від способу гасіння дуги постійного струму в ній виділяється енергія, яка була згенерована в магнітному полі кола, що вимикається, плюс ще якась частинка енергії, що надійде від генератора за час горіння дуги (у дузі, що горить стало, вся енергія, яка виділяється в ній, надходить від генератора).

Зміна струму в дузі при вимиканні кола може бути охарактеризована таким емпіричним виразом

$$i = \left[ 1 - \left( \frac{t}{t_g} \right)^n \right],$$

де  $t_g$  - час гасіння;  $t$  - поточна координата;  $n$  - деяка стала для даних умов величина. Графічно рівняння (5) подано множиною кривих на рис. 1,а. Для дугогасильних пристроїв із вузькими щілинами і для закритих дугогасильних пристроїв, а також при значних індуктивностях  $n > 1$  (порядку 2 - 4). Для відкритих дугогасильних пристроїв і при активному навантаженні  $n < 1$ .

Підставивши (5) у вираз для  $W_T$ , отримаємо

$$W_a = K \cdot R \cdot I_0^2 \cdot t_g = L \cdot I_0^2 \cdot K \frac{t_g}{T}, \quad (6)$$

де  $K = \frac{n}{2n^2 + 3n + 1}$ ,  $T = L/R$  - стала часу кола, яке вимикається.

Криву, яка характеризує залежність  $K=f(n)$ , наведено на рис. 1, б. Енергія, що надходить у дугу від генератора, пропорційна часу горіння і залежить від коефіцієнта  $K$ , який характеризує певною мірою дугогасильний пристрій. Максимальна кількість енергії виділиться в дузі при зміні струму за законом, який близький до лінійного. При цьому

$K = 0,167$ , а струм у колі за час вимикання змінюється за лінійним законом:

$$i = I_0 \left(1 - \frac{t}{t_a}\right).$$

Таким чином, енергія, яка виділяється в дузі при вимиканні електричного кола постійного струму

$$W_a = W_i + W_a = L \cdot I_0^2 \left(1 + 2K \frac{t_a}{T}\right). \tag{7}$$

У дузі змінного струму, якщо гасіння відбувається в момент переходу струму через нуль, виділиться енергія

$$W_a = \left(\frac{1}{\pi f} I_m U_d\right)^m,$$

де  $f$ — частота;  $I_m$ — струм;  $U_d$  - падіння напруги на дузі;  $t$  - кількість напівперіодів горіння дуги.

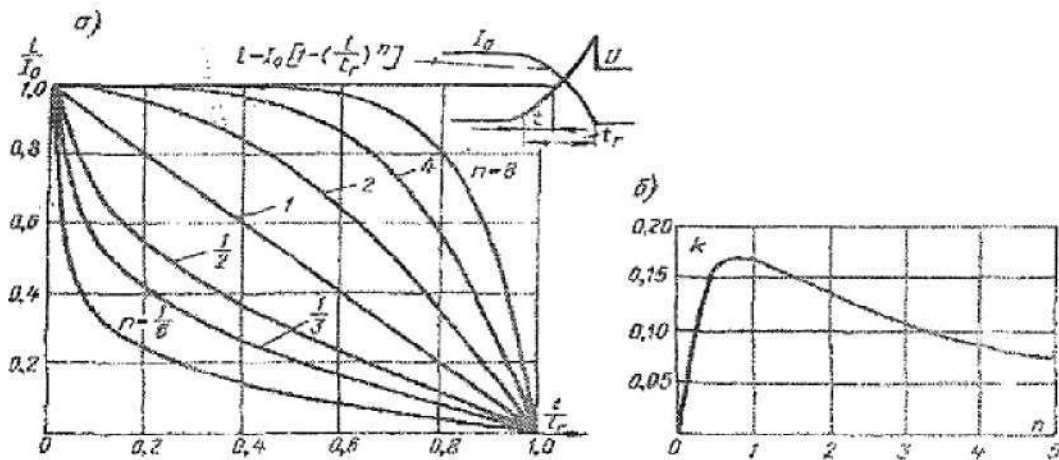


Рис. 1. Зміна струму у дузі: а – графічна інтерполяція горіння; б – залежність  $k=f(n)$ .

Енергія  $L \frac{I_0^2}{2}$  магнітного поля електричного кола, яке вимикається, повертається в генератор. Мінімальна кількість енергії у дузі виділиться, якщо дуга погасне при першому проходженні струму через нуль ( $m=1$ ). Якщо дуга почне гаснути раніше природного переходу струму через нуль, то частина енергії  $L \frac{I_0^2}{2}$  не встигне повернутися в генератор і виділиться в дузі.

Особливості горіння і гасіння дуги змінного струму. Якщо для

гасіння дуги постійного струму необхідно створити такі умови, при яких струм впав би до нуля, то при змінному струмові незалежно від ступеня іонізації дугового проміжку струм у дузі переходить через нуль кожний напівперіод. Тобто, кожний напівперіод дуга гасне і запалюється знову. Задача гасіння дуги дещо полегшується. Тому для ефективного гасіння дуги необхідно створити умови, при яких струм не відновився б після проходження через природний нуль.

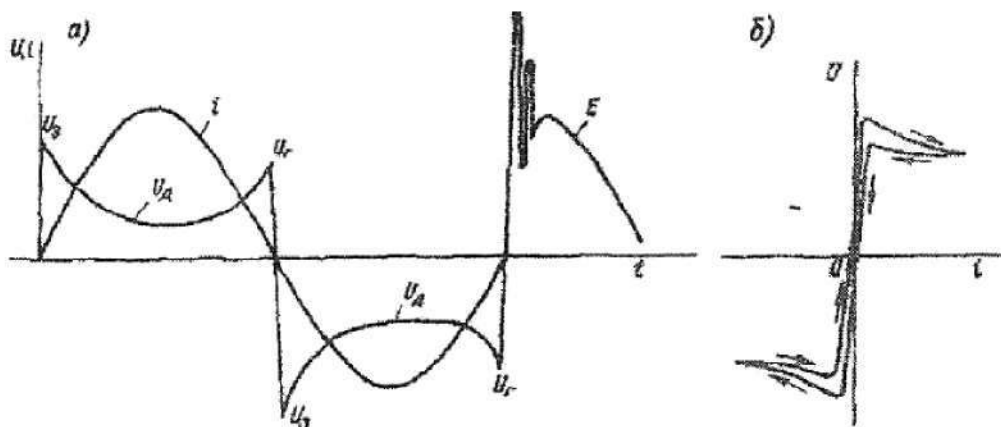


Рис. 2. Характеристики дуги змінного струму.

На рис. 2 а наведено криві зміни струму і напруги на дуговому проміжку при змінному струмові. В момент появи струму в електричній ланці має місце різке наростання напруги  $U_3$ , (напруга запалювання). Із збільшенням струму падіння напруги на дузі зменшується і досягає мінімуму при максимальному струмові (при амплітудному значенні). Згодом напруга на дузі знову зростає і досягає значення напруги згасання  $U_r$  в момент, коли струм в колі досягає свого нульового значення.

Вольт-амперну характеристику дуги змінного струму за період наведено на. рис.2, б. Напруга запалювання дуги залежить від амплітуди струму і при великих струмах вона є величиною незначною.

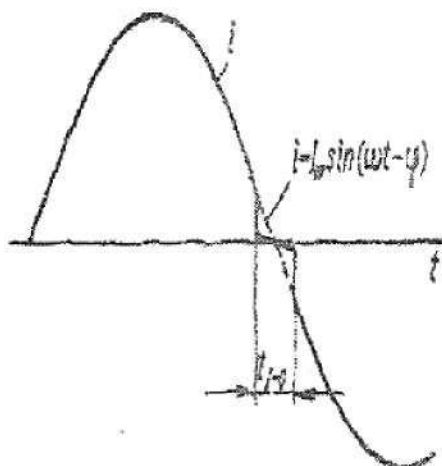


Рис. 3. Перехід струму через нуль переході через нуль.

При змінному струмові температура дуги є величиною змінною. Але теплова інерція газу є досить значною і в момент переходу струму через нуль температура дуги не падає до нуля і залишається достатньо високою. Зниження температури дуги, яке все таки має місце при переході струму через нуль, сприяє деіонізації проміжку гасіння дуги. В дійсності при переході через нуль струм у дузі змінюється за законом, який відрізняється від синусоїдального раніше  $i = I_m \sin(\omega t - \varphi)$  Трохи раніше моменту природного переходу струму через нуль, струм у дузі падає майже до нуля, а згодом, після переходу через нуль стрибком знову досягає відповідного значення. Схематично процес переходу струму через нуль показано на рис. 3 (суцільною лінією).

Таким чином, при переході струму через нуль має місце безструмова пауза  $t=0$ , під час якої відбувається інтенсивна деіонізація дугового проміжку. При малоіндуктивному навантаженні ця пауза більша, при більшій індуктивності ця пауза менша або дуже мала (порядку  $0,1$  мкс).

Інтенсивна деіонізація дугового проміжку при переході струму через нуль призводить до зменшення його провідності. Чим більше часу проміжок буде деіонізований, тим більша напруга буде потрібна для його пробією і повторного запалювання дуги. Умова гасіння дуги змінного струму може бути сформульована таким чином: якщо наростання опору проміжку, представленого його пробивною напругою  $U_{пр}$  (крива 1 на рис. 4), буде випереджати наростання напруги на проміжку (крива 2), то дуга погасне при переході струму через нуль. Якщо ж наростання опору проміжку піде повільніше (крива 3), то в момент часу, що відповідає точці О, відбудеться повторне запалювання дуги, у ланцюзі з'явиться струм і відповідне йому падіння напруги на дузі (крива 4).

Дуже важливе значення для гасіння дуги змінного струму при напругах до  $1000$  В мають явища, що відбуваються біля катода при переході струму через нуль. Існувало уявлення, що в момент переходу струму через нуль в прикатодній області практично миттєво (за час  $t < 1$  мкс) ізоляційна стійкість проміжку відновляється до значення пробивної напруги (початкова ділянка кривої 1 на рис. 4). Більшу величину напруги відносили до менших струмів і холодного катода, меншу - до великих струмів і гарячого катода.

На принципі використання зазначеного явища біля катода виконана велика частина дугогасильних пристроїв низьковольтних вимикальних апаратів. Практика, проте, не завади підтверджувала значення миттєвого відновлення міцності дугового проміжку  $150-250$  В, особливо при значних струмах та частих циклах вимкнення-вмикання.

Дослідження, проведені в останні роки [1], показують, що таке значення міцності має місце при холодних або дуже швидко охолоджуваних електродах ( $0 < 800 \text{ K}$ ).

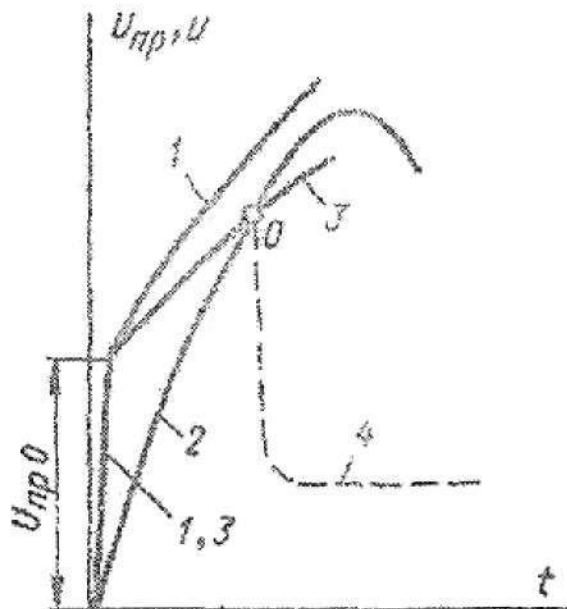


Рис. 4. Умови гасіння біля основи дуги при переході струму через нуль.

Якщо ж дуга швидко пробігає по електродах і зупиняється на їх краях протягом відносно великого часу (соті частинки секунди), то електроди в основі дуги сильно розігріваються і за переходом струму через нульове значення емітують електрони в міжконтактний проміжок. Останнє істотно знижує значення відновлювальної міцності дугового проміжку біля катода, яке досягає величини всього декількох десятків вольт.

Таким чином, в залежності від теплового режиму в дуговому проміжку комутаційних електричних апаратів можуть спостерігатися практично будь-які значення відновлювальної міцності, в тому випадку і білякатодній області порядку 150-250 В. Останнє значення відповідає умовам, коли в міжконтактному проміжку створюється режим, близький до стадії нормального тліючого розряду. Ці умови можуть зустрічатися в раціонально сконструйованих дугогасильних пристроях.

При згасанні дуги напруга на дуговому проміжку зростає від напруги гасіння дуги до відповідної миттєвої напруги мережі або е.р. с.  $U_{max}$  джерела струму. Цей процес носить назву процесу відновлення напруги на дуговому проміжку, який схематично подано на рис. 5.

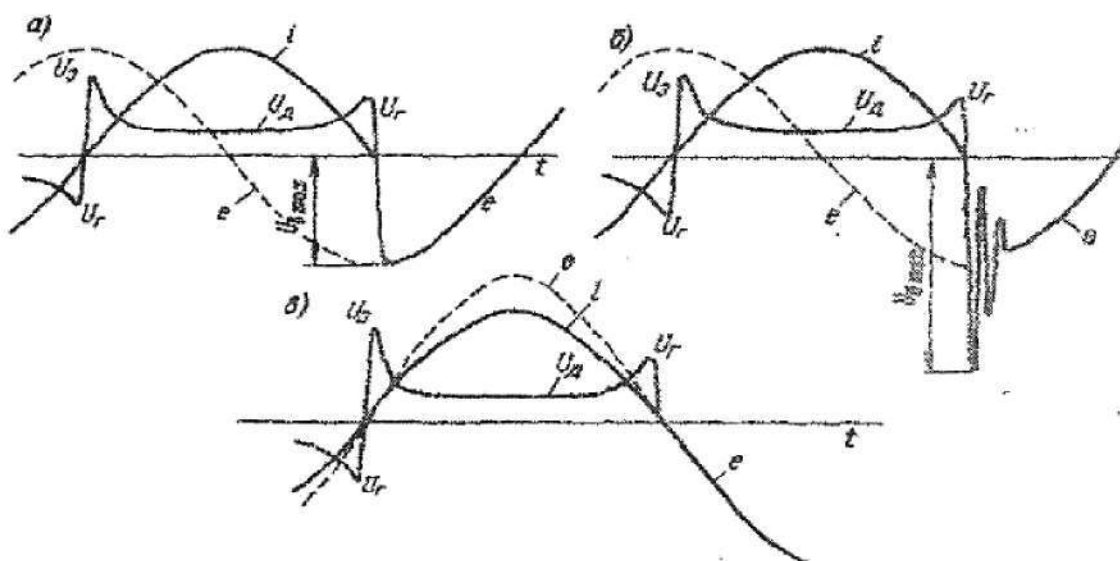


Рис. 5. Процес при відновлюванні напруги на дуговому відрізьку.

На рис. 5, а і б взято струм, який відстає від е.р.с. на  $90^\circ$ , що звичайно має місце при коротких замиканнях в промислових мережах змінного струму. Процес відновлення напруги відбувається за короткий проміжок часу - порядку десятків або сотень мікросекунд. Е.р.с. джерела струму, що змінюється з частотою 50 Гц, можна вважати за цей час сталою. Миттєва е.р.с. джерела  $U_{max}$  яка відповідає перехідному процесу напруги на дуговому проміжку, носить назву відновлювальної напруги промислової частоти. Відновлення напруги на дуговому проміжку може відбуватися аперіодично (рис. 5, а) або через коливальний процес (рис. 5, б).

У першому випадку напруга на проміжку  $U_{max}$  не може бути вище е.р.с. джерела струму  $E_m$ . В іншому випадку напруга теоретично може бути як завгодно великою, практично вона не перевищує  $2E_m$ . Частота і амплітуда коливань перехідного процесу визначаються індуктивністю, ємністю і опором джерела струму (генератора) та кола. Частота коливального процесу лежить у межах від декількох тисяч до одного-двох десятків тисяч герц.

Розглядався випадок вимикання індуктивного кола, коли струм зсунутий на  $90^\circ$  стосовно е.р.с. Візьмемо інший крайній випадок - відключення активного кола. Тут струм збігається за фазою з е.р.с. Струм і е.р.с. переходять через нуль одночасно (рис. 5, в) - відновлювальна напруга проміжку буде дорівнювати нулю. Тобто, процес вимикання активного навантаження відбувається істотно легше, ніж індуктивного.

Електричні апарати низької напруги виготовляються для змінного струму підвищеної частоти 400-500 Гц, а також 2,5-10 кГц (гартівні установки). У останньому випадку частота коливального процесу

при відновленні напруги на дуговому проміжку має такий же порядок, як і частота струму. Тут уже не можна вважати е.р.с. джерела живлення незмінною за час перехідного процесу. Близький збіг частот джерела живлення і власних коливань істотно змінює характер перехідних процесів. Якщо при промисловій частоті вимикання індуктивного контуру ( $\varphi \rightarrow 90^\circ$ ) було важчим, ніж вимикання активного контуру ( $\varphi \rightarrow 0$ ), то вже при підвищеній частоті вимикання активного контуру здійснюється важче, ніж індуктивного.

При гасінні дуги в індуктивному контурі промислової частоти напруга на дуговому проміжку може досягти значень  $2E_{m,ind}$ . При гасінні дуги в активному контурі підвищеної частоти напруга не може перевищувати величини  $E_m$ . Цим, за інших рівних умов, полегшується гасіння високочастотної дуги в порівнянні з дугою промислової частоти.

Існують, проте, і чинники, що погіршують умови гасіння дуги підвищеної частоти. При промисловій частоті температура дугового проміжку при переході струму через нуль встигає впасти на 30-50%, що сприяє інтенсифікації процесів деіонізації. При дузі підвищеної частоти істотного зниження температури дугового проміжку при переході струму через нуль не відбувається. Якщо не враховувати явищ біля катода при переході струму через нуль, то умови гасіння дуги підвищеної частоти ( $\varphi \rightarrow 10$  кГц) наближаються до умов гасіння дуги постійного струму.

*Висновки.* Дуговий розряд виникає в контактах, коли значення струму і напруга на контактах перевищує деякі критичні значення, які залежать від матеріалів контакту, параметрів кола, навколишнього середовища та інших факторів.

Особливістю горіння дуги змінного струму є те що створюються умови коли струм у дузі спадає до нуля кожний напівперіод. Таким чином дуга гасне і запалюється кожний півперіод. Ефективне гасіння буде забезпечено при умовах, коли струм не відновиться після проходження через природний нуль.

#### Література

1. Электрические и электронные аппараты : учебник для вузов / под редакцией проф. Ю.К. Рознова. - М. : Энергоатомиздат, 1998. - 752 с.
2. Буришинський М.В. Апарати захисту та керування в електричних установках низької напруги / М.В. Буришинський, Л.С. Копчак, М.В.Хай. – Львів : Львівська політехніка, 2007. – 182 с.
3. Основы теории электрических аппаратов / под редакцией проф. И.С. Таева. - М. : Высшая школа, 1987. – 351 с.
4. Родштейн Л.А. Электрические аппараты : учебник для техни-



кумов / Л.А. Родштейн. - 4-е изд. - Л. : Энергоатомиздат, 1989. - 304 с.

## **ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ И ПОГАСАНИЯ ДУГИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Кохановський С.П., Радько І.П.

***Аннотация*** - рассмотрены физиологические процессы, которые происходят в электрических контактах во время выключения и включения. Выполнено расчет мощности та энергии, которая выделяется в дуге.

## **FEATURES OF BURNING AND GOING OUT OF ARC ALTERNATING CURRENT**

S. Kochanovsky, I. Radko

### ***Summary***

**A physiological processes in electrical in contacts during their breaking and circuit. The calculation of capacity and energy that is released into the arc.**