

## БЕЗПЕЧНЕ ВИМКНЕННЯ ЕЛЕГАЗОВИХ ВИМИКАЧІВ У ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЯХ ЕЛЕКТРОПЕРЕСИЛАННЯ

О.Г. Шполянський\*, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки Національної академії наук України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна, e-mail: [shpolyanskyy@ied.org.ua](mailto:shpolyanskyy@ied.org.ua)

*Проведено аналіз перехідних процесів, що виникають під час вмикання повітряної лінії електропересилання (ЛЕП) 750 кВ під напругу. Обґрунтовано безпеку режимів ЛЕП після симетричного і несиметричного увімкнення вимикачів і технічна можливість вимкнення елегазових вимикачів із затримкою часу після їхнього увімкнення. Показана необхідність здійснення моделювання перехідних процесів для аналізу характеристик періодичних і аперіодичних складових струмів. Розроблено метод визначення єдиної затримки вимкнення елегазових вимикачів для множини режимів, які можуть виникнути після постановки ЛЕП під напругу. Бібл. 13, табл. 2, рис. 5.*

**Ключові слова:** елегазовий вимикач, безпечне вимкнення, затримка у часі, аперіодичний струм, шунтувальний реактор.

**Вступ.** Елегазові вимикачі (ЕВ) набувають в електроенергетичних системах все більшого розповсюдження завдяки своїм перевагам над традиційними вимикачами (вакуумними, повітряними, масляними). До таких переваг можна віднести:

- кращі діелектричні властивості сульфиду сірки у порівнянні з повітрям;
- малий час горіння дуги і, відповідно, зменшення ерозії контактів;
- під час горіння дуги не виділяється діоксид вуглецю, тому його діелектрична міць не зменшується;
- вимикач має компактні розміри.

В той же час, ЕВ мають певну особливість: у разі відключення ЕВ згасання електричної дуги між його контактами відбувається за проходження миттєвого значення струму через нуль. Присутність аперіодичної складової в струмі вимикача, яке обумовлене наявністю індуктивних і ємнісних елементів в електричній мережі, може завадити успішному гасінню дуги. Повільне згасання аперіодичної складової струму не дозволяє згаснути електричній дузі тривалий час і призводить до руйнування дугогасильної камери через підвищені температуру і тиск. Нерідко аперіодичні струми, що повільно згасають, виникають у разі постановки компенсованої ненавантаженої повітряної лінії електропересилання (ЛЕП) під напругу. В цих випадках тривалість не переходу струму в ЕВ через нуль може досягати сотень мілісекунд. Однак, положеннями ІЕС 62271-100 [1] визначається, що вимикач має бути здатним виконати певні номінальні послідовності замикань і розмикань контактів. В цих послідовностях присутня операція увімкнення з наступним миттєвим (без навмисної затримки) вимкненням вимикача. Така ситуація може виникнути у разі увімкнення ЛЕП на коротке замикання, несиметричного увімкнення вимикачів ЛЕП або помилок спрацювання релейного захисту на вимикачі. Але вимкнення лінійного ЕВ одразу після увімкнення може призвести до аварії, що супроводжується його руйнуванням [2-5].

Існують заходи, які дають змогу знизити величину і тривалість протікання аперіодичного струму через ЕВ після його увімкнення. До них, зокрема, відносяться:

- застосування резисторів, що попередньо вмикаються під час увімкнення ЕВ;
- тимчасове увімкнення у нейтраль резистору з подальшим його шунтуванням;
- використання пристроїв керованої комутації.

Перші два заходи спрямовані, головним чином, на зменшення тривалості протікання аперіодичного струму. До їхніх недоліків можна віднести те, що у разі увімкнення ЕВ на коротке замикання (КЗ) через резистор буде протікати великий струм. Отже, резистор повинен бути здатним розсіяти велику кількість енергії. Останній захід дає змогу знизити як амплітуду, так і тривалість протікання аперіодичного струму [6]. Однак за певних сполученнях елементів електричної мережі і параметрів режиму можуть виникнути такі перехідні процеси, за яких заходи, що було описано вище,

не зможуть забезпечити бажані рівні напруги і/або аперіодичних струмів. З огляду на це, розробка заходів, що дають змогу підвищити надійність здійснення комутацій ЕВ, є актуальною.

**Метою роботи** є обґрунтування можливості застосування затримки часу для безпечного вимкнення лінійного ЕВ після його увімкнення і розробка методу визначення величини цієї затримки.

### Моделювання перехідних комутаційних процесів в компенсованих повітряних ЛЕП.

Моделювання перехідних комутаційних процесів здійснювалося у пакеті Matlab/Simulink. Як об'єкт для моделювання був обраний фрагмент реальної електричної мережі 750 кВ. Її імітаційну модель показано на рис. 1. Модель включала в себе трифазне джерело живлення номінальною

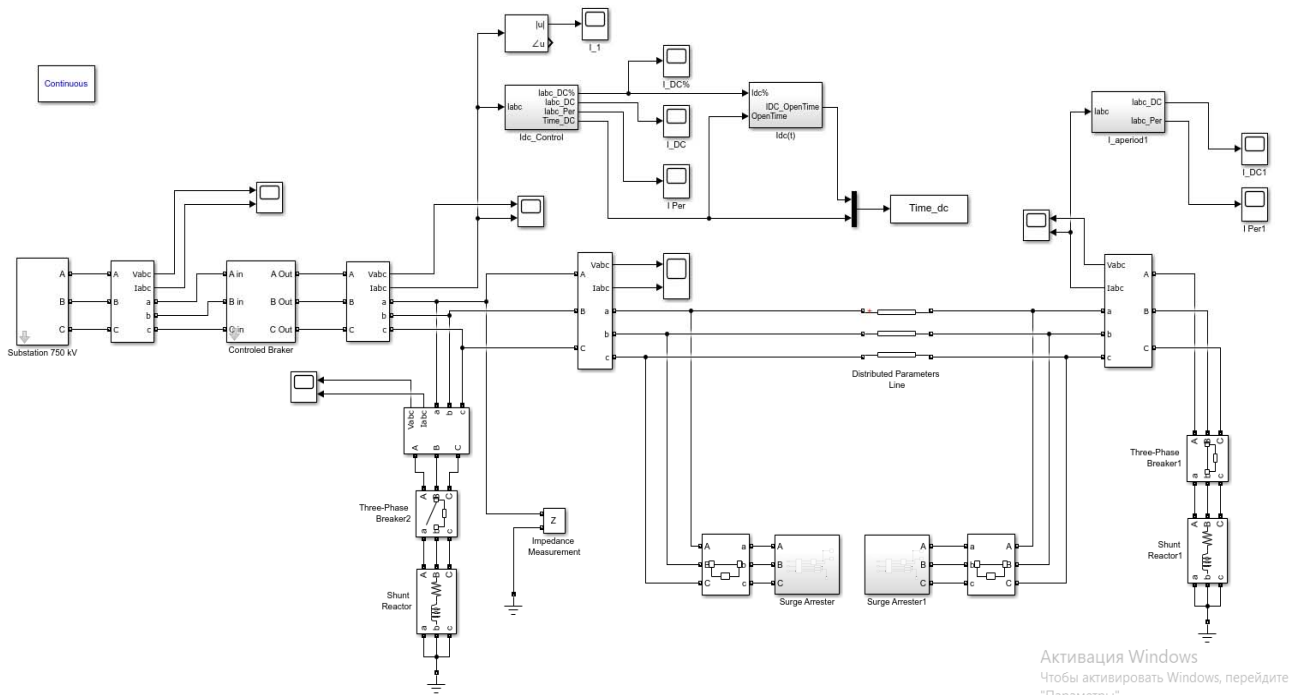


Рис. 1

напругою 750 кВ, лінію з розподіленими параметрами довжиною 186,2 км, дві групи шунтувальних реакторів (ШР) і обмежувачі перенапруг (ОПН) по її кінцям, блоки визначення аперіодичних складових струмів та параметрів їхнього згасання, блок керованої комутації вимикачів. ЛЕП мала такі параметри прямої і нульової послідовностей:  $Z_{Л11}=21,098+j205,429$  Ом,  $Z_{Л10}=2,46+j143,199$  Ом,  $V_{Л11}=763,05$  См,  $V_{Л10}=578,39$  См. Індуктивність шунтувального реактору  $L_{Ш}=5,974$  Гн, а активний опір  $R_{Ш}=3,409$  Ом. Параметри моделі ОПН було уточнено по технічним характеристикам Siemens 3EQ3 612 [7] у відповідності до [8]. Під час постановки під напругу ненавантаженої ЛЕП підключення кожної фази відбувалося під час переходу відповідної фазної напруги через нуль. На рис. 2 показано струм у фазі А на початку лінії. Він має чітко окреслену аперіодичну складову. Крім того, на проміжку часу 0-0,2 с спостерігаються гармонійні спотворення синусоїдальної кривої струму ( $THD_I=46,4\%$ ). Спектр частот на цьому проміжку часу представлено на рис. 3. Амплітудне значення струму фундаментальної частоти складає 174,7 А, аперіодична складова струму – 204,7 А або 117,22%. Значні спотворення у синусоїду струму вносять субгармонійні коливання. Амплітуда коливань на частоті 2,5 Гц складає 76,63% від фундаментальної. Досить велику амплітуду, приблизно 20%, мають коливання на частотах 145 і 147,5 Гц. З рис. 2 бачимо, що з часом змінюється не лише аперіодична складова струму, а й амплітуда періодичної складової.

Аперіодичні струми у фазах показано на рис. 4. Максимальні величини цих струмів у фазах А, В і С відповідно складають 507,8 А, 550,28 А, 471,93 А. Різні значення аперіодичних струмів у фазах, наявність гармонічних спотворень, зміна амплітуди періодичного струму на початку перехідного процесу вимагає моделювання перехідних процесів задля визначення часу згасання аперіодичних струмів до припустимої величини і перших переходів миттєвих значень струму через нуль, в які можуть бути здійснені вимкнення ЕВ.

**Визначення часу затримки для безпечного вимкнення елегазового вимикача.** Необхідність вимкнення ЕВ одразу після його увімкнення під час постановки ЛЕП під напругу може бути

обумовлена різними факторами. У разі включення вимикачів у всіх трьох фазах це може бути помилкове спрацювання засобів релейного захисту і автоматики (РЗА). Ще одним фактором є спрацювання РЗА від неповнофазного режиму, який став наслідком не увімкнення вимикача в одній із фаз.

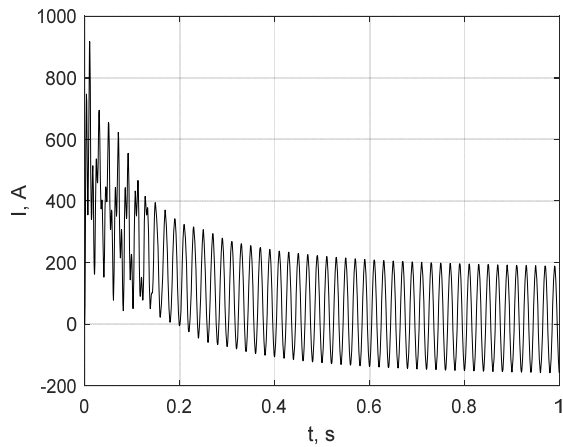


Рис. 2

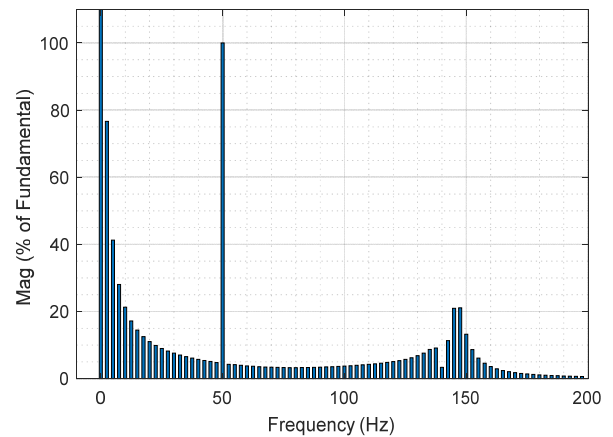


Рис. 3

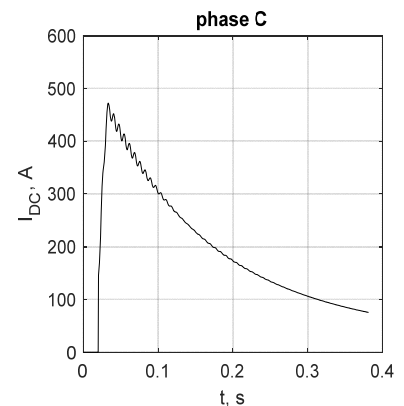
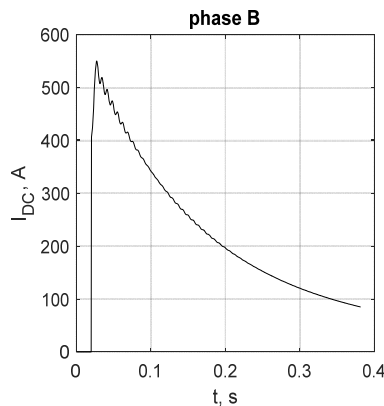
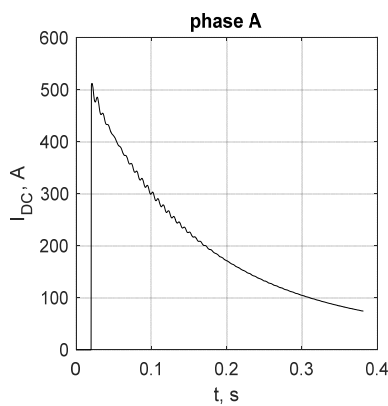


Рис. 4

Очевидно, що через певний час після увімкнення аперіодична складова струму згасне, і ЕВ може бути безпечно відключений. Та можливість затримки вимкнення ЛЕП у неповнофазному режимі потребує обґрунтування. Зазначимо, що затримка вимкнення фаз до 10 с передбачається самими релейним захистом від неповнофазного режиму [9]. Крім того, у повітряних ЛЕП напругою 110 кВ і вище для усунення однофазних замикань на землю широко застосовується однофазне автоматичне повторне увімкнення (ОАПУ). Під час ОАПУ фаза, в якій відбулося КЗ, відмикається, а інші — продовжують працювати. Безструмова пауза ОАПУ в залежності від величини струму підживлення дуги може тривати до 2,5 – 3 с. Більш тривале вимкнення може впливати на стійкість системи. Якщо тривалість паузи ОАПУ перевищує 2 – 2,5 с, то вживають заходи, які дозволяють скоротити цей час [10, 11]. По ЛЕП, що ставиться під напругу, передача електроенергії не здійснюється. Тому вона не впливає на стійкість системи. Можна зробити висновок, що затримка часу під час вимкнення лінійних вимикачів ЛЕП може тривати до 2 с. За цей час аперіодична складова струму може зменшитися до припустимої величини. Зазвичай вона знаходиться в межах 50-55% від амплітудного значення періодичної складової струму. В наших розрахунках будемо вважати, що максимально припустиме значення аперіодичної складової струму складає 50%. Було б логічним відключати ЕВ через мінімальний проміжок часу після того, як аперіодичні струми у фазах спадуть до припустимого рівня.

Необхідним фактором для вимкнення ЕВ є проходження миттєвого значення струму через нуль. Виробники ЕВ наводять час роз'єднання контактів вимикача  $t_{Open}$  і час його повного вимкнення  $t_{Break}$ . Для вимикачів 750 кВ вони складають відповідно 20 і 40 мс [12, 13]. Тобто, після роз'єднання контактів вимикача впродовж 20 мс між ними має згаснути дуга. За цей час струм з припустимою величиною аперіодичної складової перетне нуль і відбудеться гасіння дуги.

Було проведено серію моделювань перехідних процесів під час постановки ЛЕП під напругу для повнофазного і неповнофазного увімкнення вимикача. Вважалося, що вимикачі замикаються при проходженні миттєвого значення напруги через нуль (моменти часу 0, 0,0067 і 0,0133 с для фаз *A*, *B* і *C* відповідно). За нульовий момент часу було прийнято момент подачі напруги на фазу *A*. Моделювання перехідного процесу здійснювалося за умови, що по кінцях ЛЕП підключено по одній групі ШР. Воно показало, що спадання аперіодичних складових струмів до значення 50% відбувається через 0,3434 с, 0,3765 с і 0,3467 с для фаз *A*, *B* і *C* відповідно. Час спадання аперіодичної складової струму до припустимого значення у фазах *A* і *C* дуже близький (різниця складає 0,0033 с). Тривалість спадання аперіодичної складової струму в фазі *B* помітно більша. Різниця часу спадання між фазами *A* і *B* складає приблизно 0,033 с, що суттєво перевищує різницю у часі подачі напруги на фази *A* і *B* – 0,0067 с. Перше проходження струму через нуль після згасання аперіодичної складової до 50% у фазах *A*, *B* і *C* відбувається у моменти часу 0,3564 с, 0,3831 с, 0,3567 с відповідно. Для фаз *A* і *C* різниця між цими моментами складає 0,0003 с, а для фаз *A* і *B* – 0,0267 с (більше одного періоду). Якщо команду на вимкнення вимикачів у трьох фазах подати у моменти часу 0,3364 с, то протікання струму у фазі *A* через нуль (умова вимкнення ЕВ) відбудеться одразу після повного розведення контактів (20 мс). Але тоді час повного вимкнення у фазі *B* складе щонайменше 46,7 мс. А це більше ніж час, який гарантує виробник вимикача. Якщо час проходження через нуль фазних струмів відраховувати після згасання аперіодичної складової до 50% в усіх фазах, то цей час складе 0,3835, 0,3831 і 0,3768 с відповідно. У цьому випадку максимальна різниця у часі буде між фазами *A* і *C*. Вона складе 0,0067 с. Отже, після розмикання контактів упродовж 0,0067 с миттєві значення струмів в усіх фазах пройдуть через нуль, що має забезпечити успішне гасіння дуги за час менший ніж 40 мс. Було виконано моделювання перехідного процесу для схеми рис. 1, у якому вимикачі замикаються, а потім розмикаються у моменти часу 0,3835, 0,3831 і 0,3768 с для фаз *A*, *B* і *C*. На рис. 5, *a* зображено аперіодичні складові струмів. Після вимкнення вимикача у фазі *C* струми у фазах *A* і *B* почали зростати. Після вимкнення вимикача у фазі *B* зростання аперіодичного струму у фазі *B* пришвидшилося, і він досягнув приблизно 71,5%, а потім почав спадати. Повторне перевищення припустимої величини аперіодичного струму тривало приблизно до 0,3947 с, а час від подачі команди на вимкнення склав приблизно 0,0379 с або 37,9 мс. Причиною збурення у фазі *B* стала відмінність між порядком проходження фазних струмів через нуль, починаючи з моменту часу 0,3768 с, і порядком слідування фаз. Задля зменшення збурень модифікуємо блок визначення моментів перетину фазними струмами нуля з урахуванням порядку слідування фаз і отримуємо такі значення 0,3836, 0,3901 і 0,3969 с для фаз *A*, *B* і *C*. Результати моделювання аперіодичної складової струму для цього режиму показано на рис. 5, *б*. В аперіодичному струмі фази *B* присутнє незначне збурення, яке не буде мати впливу на процес вимкнення вимикача.

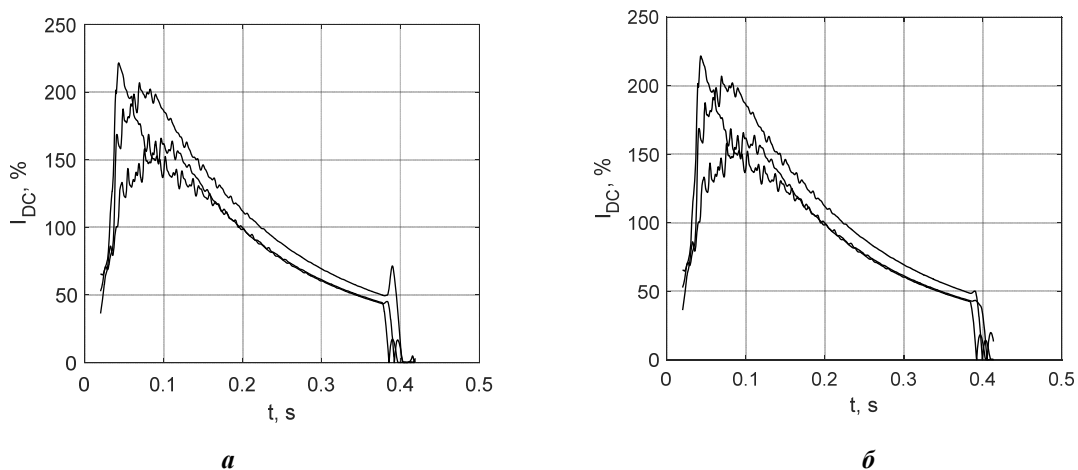


Рис. 5

Результати розрахунків моментів перетину фазними струмами нуля в різних режимах постановки ЛЕП під напругу представлено у табл. 1. В ній наведено:

- режим увімкнення вимикача (трифазний або несиметричний двофазний із зазначенням послідовності увімкнення фаз);
- стан вимикача ШР (“+” – включений, “-” – відключений) на початку (П) і в кінці (К) ЛЕП;

- $\text{Max } I_{DC}$  – максимальна величина аперіодичної складової струму;
- $t_{50}$  – час спадання аперіодичної складової струму до 50% ;
- $t_{CZ}$  – момент переходу миттєвого значення струму через нуль після спадання аперіодичних складових струму в усіх фазах до 50%.

**Таблиця 1**

Увімкнення	ШР		Max $I_{DC}$ , %			$t_{50}$ , с			$t_{CZ}$ , с		
	П	К	А	В	С	А	В	С	А	В	С
3ф (abc)	+	+	221,68	206,91	165,73	0,3434	0,3763	0,3469	0,3836	0,3901	0,3969
	+	-	170,26	172,75	130,36	0,4935	0,5326	0,4908	0,5337	0,5402	0,5471
	-	+	127,76	133,70	103,51	0,1876	0,2318	0,2071	0,2340	0,2403	0,2471
2ф (ab)	+	+	187,28	175,11	2,54	0,3424	0,3698	-	0,3766	0,3827	-
	+	-	184,83	174,74	4,84	0,5448	0,5770	-	0,5856	0,5942	-
	-	+	122,14	137,43	5,39	0,2489	0,2972	-	0,3053	0,3141	-
2ф (ac)	+	+	207,26	9,22	150,49	0,3390	-	0,3354	0,3430	-	0,3574
	+	-	176,12	2,45	132,49	0,5296	-	0,5081	0,5345	-	0,5460
	-	+	163,51	3,33	107,18	0,2678	-	0,2442	0,2746	-	0,2863
2ф (bc)	+	+	2,52	189,77	177,76	-	0,3497	0,3721	-	0,3906	0,3964
	+	-	4,88	186,33	179,61	-	0,5529	0,5825	-	0,5995	0,6080
	-	+	5,40	124,38	139,76	-	0,2562	0,3032	-	0,3198	0,3282

З табл. 1 бачимо, що у варіантах із увімкненням двох фаз струм протікає і по невиключеній фазі. Це може бути пояснено тим, що у розімкненому стані контакти вимикача і діелектрик поміж ними утворюють ємність, через яку і протікає струм.

Для даної ЛЕП найбільш сприятливим режимом компенсації зарядної потужності є підключення ШР в кінці лінії. В цьому режимі отримуємо менші значення аперіодичної складової струму і час її згасання до 50%. Різниця у часі між моментами проходження миттєвого значення фазного струму через нуль для кожного з варіантів знаходиться в межах 0,0058-0,0144 с. Тобто, вимкнення усіх фаз ЕВ має бути успішним. В розглянутих режимах в усіх фазах момент проходження струму через нуль (момент повного вимкнення вимикача) не перевищує 0,61 с після його увімкнення.

Визначим моменти проходження миттєвого значення фазного струму через нуль і величини аперіодичної складової струму  $I_{DC}$  після повного розведення контактів у момент часу 0,59 с (табл. 2).

Для кожної фази затримку видачі команди на вимкнення ЕВ після подачі команди на його увімкнення пропонується визначати за формулою

$$t_{Delay} = 0,5 \left[ \left( \text{Min}\{t_{CZ}\} + \text{Max}\{t_{CZ}\} \right) - \left( t_{Open} + t_{Break} \right) \right], \quad (1)$$

де  $\text{Min}\{t_{CZ}\}$  – мінімальний момент часу проходження миттєвого значення струму через нуль;  $\text{Max}\{t_{CZ}\}$  – максимальний момент часу проходження миттєвого значення фазного струму через нуль;  $t_{Open}$  – час від подачі команди на вимкнення вимикача до повного розведення його контактів,  $t_{Break}$  – час від подачі команди на вимкнення вимикача до повного гасіння дуги між його контактами. Умовою використання рівняння (1) є виконання нерівності

$$\text{Max}\{t_{CZ}\} - \text{Min}\{t_{CZ}\} < t_{Break} - t_{Open} . \quad (2)$$

За результатами з табл. 2  $\text{Max}\{t_{CZ}\}=0,6092$  с і  $\text{Min}\{t_{CZ}\}=0,5928$  с виконали перевірку за (2):  $0,6092 - 0,5928 = 0,0164 < 0,02$ . У відповідності до (1) час затримки склав  $t_{Delay}=0,5644$  с.

Нерівність (2) може не виконуватися, якщо для визначених  $t_{CZ}$  не існує єдиного часу затримки для всіх обраних режимів, які можуть виникнути при включенні вимикача. Розв'язання цієї проблеми може бути здійснене двома способами:

1) розбиттям вихідної множини режимів увімкнення ЕВ на підмножини і розрахунком для кожної підмножини значення  $t_{Delay}$ . Для нашого прикладу доцільно було б формувати підмножини за режимом компенсації реактивної потужності;

2) проведенням додаткового моделювання перехідних процесів для всіх режимів з визначенням нових моментів часу переходу миттєвого струму через нуль після моменту  $t = \text{Max}\{t_{CZ}\} - t_{\text{Open}}$  і перевіркою результатів на сумісність за нерівністю (2). Якщо для нових значень  $t_{CZ}$  нерівність (2) виконується, розраховуємо  $t_{\text{Delay}}$ . Можливо, цю процедуру потрібно буде повторити декілька раз.

**Таблиця 2**

Увімкнення	ШР		$I_{DC}, \%$			$t_{CZ}, c$		
	П	К	A	B	C	A	B	C
3ф (abc)	+	+	21,36	24,04	21,59	0,5956	0,6023	0,6089
	+	-	37,86	42,21	36,87	0,5939	0,6004	0,6073
	-	+	1,02	5,68	3,57	0,5951	0,6016	0,6083
2ф (ab)	+	+	19,25	21,71	0,70	0,5959	0,6018	-
	+	-	43,15	47,50	0,05	0,5928	0,6013	-
	-	+	5,51	10,83	1,02	0,5940	0,6025	-
2ф (ac)	+	+	19,62	1,62	18,19	0,5952	-	0,5981
	+	-	41,97	0,22	37,83	0,5948	-	0,6063
	-	+	7,68	0,21	6,06	0,5959	-	0,6072
2ф (bc)	+	+	0,21	20,21	21,57	-	0,6026	0,6085
	+	-	1,20	43,40	47,21	-	0,5995	0,6080
	-	+	0,85	5,66	10,52	-	0,6006	0,6092

Перевагою першого способу є мінімальні затримки при відключенні ЕВ, а недоліком – необхідність коригувати уставки РЗА у відповідності до режиму компенсації реактивної потужності. Перевагою другого способу є єдина для всіх розглянутих режимів уставка  $t_{\text{Delay}}$ , а недоліком – можливе збільшення величини  $t_{\text{Delay}}$  для певних режимів.

Розраховане значення часу затримки для розглянутого прикладу приблизно в 3,5 рази менше ніж тривалість безструмової паузи ОАПУ [10,11], що допускається в ЛЕП. Тому така затримка вимкнення лінійного ЕВ є припустимою.

#### **Висновки.**

В статті запропоновано і обґрунтовано застосування затримки у часі для безпечного вимкнення лінійного елегазового вимикача одразу після постановки ЛЕП під напругу, яке може статися через помилкову роботу пристроїв релейного захисту і автоматики або через неповнофазне увімкнення вимикача.

Запропоновано метод визначення часу затримки вимкнення ЕВ після його увімкнення, який оснований на аналізі моментів часу переходу миттєвого значення струму через нуль при досягненні аперіодичними складовими струму заданої величини із збереженням послідовності слідування фаз. Цей метод дає змогу уникнути значних збурень перехідного процесу при вимкненні ЕВ, а єдиний час затримки для всіх фаз – спростити налаштування пристроїв РЗА і керованої комутації вимикачів.

*Роботу виконано за держбюджетною темою «Розвиток теорії, розроблення методів інтелектуалізації технологічних процесів та засобів керування, моніторингу, діагностування і вимірювання в електроенергетичних та електротехнічних системах» (Інтехен 2), КПКВК 6541230.*

1. High voltage switchgear and controlgear Part 100: Alternating-current circuit-breakers. IEC 62271-100. Edition 2.2, 2017. CSV(en-fr) 621 p..
2. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.І., Шполянський О.Г. Аналіз передумов пошкодження елегазових вимикачів у електричних мережах 750 кВ. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2017. Вип. 47. С. 16–22. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2017.47.016>
3. Епифанов А.М., Пугаченко З.Е., Коновалов А.А. Возникновение аперіодической составляющей при отключении реактированных ЛЭП и методы борьбы с ней. 2016. URL: <http://www.uraldiag.ru/UPLOAD/user/novosti/09122016/5-pugachenko-ze-vozniknovenie-aperiodicheskoi-sostavlyayushei-pri-otkl-reaktirovannyh-lep.pdf> (дата звернення 10.04.2021)
4. Наумкин И.Е. Аварийные отказы элегазовых выключателей при коммутациях компенсированных ВЛ 500–1150 кВ. *Электричество*. 2012. № 10. С. 22–32.

5. Chernoskutov D., Popovtsev V., Sarapulov S.. Analysis of SF6 Circuit Breakers Failures Related to Missing Current Zero. Part II. *Proceedings of the 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC)*, Ekaterinburg, Russia, 13-15 November 2020. Pp. 55-58.
6. Шполянський О.Г. Зниження перенапруг та аперіодичних струмів при підключенні ЛЕП 750 кВ за допомогою пристроїв керованої комутації. *International Ukraine-Poland Seminar Power quality in distribution networks with distributed generation*, Київ, Україна, липень 4-5, 2019. С. 197-202.
7. High-voltage surge arresters. Product guide. Siemens AG, Erlangen, Germany, 2014. 112 p.
8. Shpolianskyi O. Adjustment of the MATLAB surge arrester model parameters. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 5. С. 49 – 53. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.05.049>
9. Приборный модуль релейной защиты и автоматики резервные защиты и автоматика ВЛ 330 кВ с ОАПВ (L020). Руководство по эксплуатации ААВГ.421453.005 – 105.01Е РЭ2. НПП ХАРТРОН-ИНКОР, 2020, 230 с. URL: [https://hartron-inkor.com/sites/default/files/pdf/105.01e\\_re2\\_1020\\_oapv\\_aaeon\\_mms\\_goose.pdf](https://hartron-inkor.com/sites/default/files/pdf/105.01e_re2_1020_oapv_aaeon_mms_goose.pdf) (дата звернення 10.04.2021)
10. Беляков Н.Н., Кадомская К.П., Левинштейн М.Л., Пятков А.В., Рашкес В.С., Хоэциан К.В., Хорошев М.И. Процессы при однофазном повторном включении линий высоких напряжений. М.: Энергоатомиздат, 1991. 256 с.
11. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.И. Підвищення надійності та ефективності магістральних електричних мереж. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2009. № 23 С. 110-118.
12. Live Tank Circuit Breakers – Buyer’s Guide. ABB AB High Voltage Products. Ludvika, Sweden, 2014. 152 p.
13. High-Voltage Circuit Breakers. Siemens AG Energy Sector. Erlangen, Germany, 2012. 28 p.

УДК 621.311

## SAFE OPENING OF SF6 CIRCUIT BREAKERS IN OVERHEAD TRANSMISSION LINES

O.G. Shpolianskyi

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine,

e-mail: [shpolvanskyy@ied.org.ua](mailto:shpolvanskyy@ied.org.ua)

*The paper analyses the transient currents during the energisation of a 750 kV overhead transmission line (OTL). The safety of OTL state after symmetrical and asymmetrical closing of the circuit breakers and technical feasibility of SF6 circuit breakers opening with time delay after their closing is substantiated. The necessity of transient processes simulation for analysing the characteristics of periodic and direct components of currents is shown. A method for determining of SF6 circuit breaker opening time delay for a set of the states that may arise after the energisation of OTL is developed. References 13, tables 2, figures 5.*

**Key words:** SF6 circuit breakers, safe opening, time delay, direct current component, shunt reactor.

1. IEC 62271-100 High voltage switchgear and controlgear – Part 100: Alternating-current circuit-breakers. Edition 2.2, 2017-06 CSV(en-fr). 621 p.
2. Kuznetsov V.G., Tugai Y.I., Shpolianskyi O.G. Analysis of the preconditions of SF6 circuit breakers’ damage in 750 kV electric networks. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2017. No 47. Pp. 16–22. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2017.47.016> (Ukr)
3. Epifanov A.M., Pugachenko Z.E., Konovalov A.A. The emergence of an direct current component when disconnecting reacted power lines and methods of dealing with it. *Report at the III Scientific and Practical Conference Control of the technical condition of equipment of electric power facilities*. Moscow, 2016. URL: <http://www.uraldia.ru/UPLOAD/user/novosti/09122016/5-pugachenko-ze-vozniknovenie-aperiodicheskoi-sostavlyayushiei-pri-otkl-reaktivnykh-lep.pdf> (Rus) (accessed 10.04.2021)
4. Naumkin I.E. Emergency failures of SF6 circuit breakers during commutation of compensated overhead lines 500-1150 kV. *Electrichestvo*. 2012. No 10. Pp. 22-32. (Rus)
5. Chernoskutov D., Popovtsev V., Sarapulov S. Analysis of SF6 Circuit Breakers Failures Related to Missing Current Zero. Part II. *Proceedings of the 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC)*, Ekaterinburg, Russia, 13-15 November 2020. Pp. 55-58.
6. Shpolianskyi O.G. Reduction of overvoltages and aperiodic currents during energising of 750 kV power lines using controlled switching devices. *International Ukraine-Poland Seminar Power quality in distribution networks with distributed generation*, Kyiv, Ukraine, July 4-5, 2019. Pp. 197-202. (Ukr)
7. High-voltage surge arresters. Product guide. Siemens AG, Erlangen, Germany, 2014. 112 p.
8. Shpolianskyi O. Adjustment of the MATLAB surge arrester model parameters. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2020. No 5. Pp. 49 – 53. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.05.049>
9. Instrument module of relay protection and automation, backup protection and automation of 330 kV overhead line with SAR (L020). Operation manual ААВГ.421453.005 - 105.01Е RE2. NPP HARTRON-INCOR, 2020. 230 p. URL: [https://hartron-inkor.com/sites/default/files/pdf/105.01e\\_re2\\_1020\\_oapv\\_aaeon\\_mms\\_goose.pdf](https://hartron-inkor.com/sites/default/files/pdf/105.01e_re2_1020_oapv_aaeon_mms_goose.pdf) (Rus) (accessed 10.04.2021)
10. Belyakov N.N., Kadomskaya K.P., Levinstein M.L., Pyatkov A.V., Rashkes V.S., Hoetzian K.V., Khoroshev M.I. Processes for single-phase reclosing of high voltage lines. Moskva: Energoatomizdat. 1991. 256 p. (Rus)
11. Kuznetsov V.G., Tugai Y.I. Improving the reliability and efficiency of main electrical networks. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2009. No 23. Pp. 110–118. (Ukr)
12. Live Tank Circuit Breakers – Buyer’s Guide. ABB AB High Voltage Products, Ludvika, Sweden, Edition 6, 2014. 152 p.
13. High-Voltage Circuit Breakers. Siemens AG Energy Sector. Erlangen, Germany, 2012. 28 p.

Надійшла 20.05.2021

Остаточний варіант 06.09.2021