

# РОЗРАХУНОК ВТРАТ НАПРУГИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ЩО ЖИВЛЯТЬ УСТАНОВКИ ДЛЯ КОНТАКТНОГО ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ

*Денисенко М.А., докт. техн. наук ФРН,  
Національний технічний університет України „КПІ”*

## ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Завдяки малим значенням коефіцієнтів увімкнення  $K_{y,i}$  і значним навантаженням  $S_i$  і-х установок для контактного електрозварювання (УКЕ) ці установки у разі одночасного їх увімкнення створюють в електричних мережах значні пікові навантаження  $S_{\Pi}$  і коливання напруги. Тому електричні мережі, що живлять УКЕ, підлягають обов'язковій перевірці на допустиму втрату напруги. Цю перевірку здійснюють за відомим виразом

$$\Delta U_{\alpha} \leq \Delta U_{\text{д}} \quad (1)$$

де  $\Delta U_{\alpha}$  — розрахункова втрата напруги за імовірністю її перевищення  $\alpha$  ;  
 $\Delta U_{\text{д}}$  — допустима втрата напруги, яку розраховують за виразом

$$\Delta U_{\text{д}} = \pm U_{y,1} + \sum E_i \mp \delta U_{y,\text{УКЕ}} \cdot \quad (2)$$

У виразі (2):  $U_{y,1}$  — усталене відхилення напруги в центрі живлення (ЦЖ), наприклад, на вторинній стороні ГПП;  $\sum E_i$  — сума надбавок напруги, створюваних цеховим трансформатором, послідовно включеними конденсаторами (за їх наявністю);

$\delta U_{y,\text{УКЕ}}$  — допустиме усталене відхилення напруги на затискачах УКЕ.

Величини  $\delta U_{y,\text{УКЕ}}$  Для різних видів УКЕ, типів металів і сплавів, що зварюють, наведено в [1 ...3].

В даній статті надається метод розрахунку величин  $\Delta U_{\alpha}$  групи УКЕ, розроблений в [4...7]. Одержання вихідних даних для розрахунку — повної потужності  $S_i$  і коефіцієнта увімкнення  $K_{y,i}$  кожної і-ї УКЕ наведено в [3]. Для УКЕ величина  $K_{y,i}$  тотожна тривалості увімкнення  $TB_i$ .

Під час розрахунків імовірнісних втрат напруги, як і навантажень за нагріванням [8] та пікових [9], в мережі, що живить УКЕ, окрім ступінчастості графіка електричних навантажень (ЕН) (одноступінчасті і багато ступінчасті) УКЕ необхідно враховувати наступне. Зварювальні трансформатори (ЗТ) звичайно виготовляють на напругу 380 В. У кожній багато точковій УКЕ одна або декілька груп ЗТ своїми контакторами можуть вмикатись одночасно на одну, дві або три лінійні напруги (однофазні, двофазні і трифазні УКЕ відповідно).

Як правило, УКЕ працюють незалежно. Однак, в автоматизованих зварювальних лініях може передбачатись одночасне увімкнення декількох УКЕ. Крім того, з метою зниження пікових навантажень потужні УКЕ блокувальними пристроями вмикають за схемою чекання, тобто вони можуть працювати за

чергою. Також кожному багатьох точковим УКЕ, групи ЗТ якої вмикаються за чергою, також можна розглядати як групу однофазних УКЕ, що вмикаються за чергою.

## ПРОПОНУЄМИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ

### Втрати напруги, створювані однією УКЕ

Повна потужність  $S_i$  трифазної УКЕ з симетричним навантаженням трьох пліч (лінійних навантажень) викликає в розрахунковій точці електричної мережі падіння напруги  $\Delta U_i$  абсолютне значення якого  $|\Delta U_i|$  розраховують за формулою

$$|\Delta U_i| = \frac{S_i z_i}{U_n^2} 100, \% \quad (3)$$

де  $z_i$  — повний опір фази мережі до даної точки, Ом;

$U_n$  — номінальна напруга мережі, В.

Величина  $|\Delta U_i|$  однакова як для фазних, так і для міжфазних напруг мережі і рівна втраті відповідної напруги  $\Delta U_i$ , якщо фазовий кут ЕН  $\varphi_n$  дорівнює фазовому куту мережі  $\varphi_m$ .

Якщо  $\varphi_n \neq \varphi_m$ , відому формулу для підрахунку втрати напруги

$$\Delta U_i = \frac{P_i r_i + Q_i x_s}{U_n^2} \cdot 100, \% \quad (4)$$

можна перетворити до виду

$$\Delta U_i = \frac{c_i S_i z_i}{U_n^2} \cdot 100, \% \quad (5)$$

де  $c_i$  — коефіцієнт, розраховується за формулою

$$c_i = \cos(\varphi_m - \varphi_n). \quad (6)$$

Якщо, наприклад, однофазна УКЕ потужністю  $S_i$  увімкнена на напругу  $U_{BC}$ , за цією формулою можна розрахувати втрату будь-якої міжфазної або фазної напруги, скориставшись наступними коефіцієнтами [4]:

$$c_{i.AB} = \sin(\varphi_c - \varphi_n + 150^\circ); \quad (7)$$

$$c_{i.BC} = 2 \sin(\varphi_c - \varphi_n + 90^\circ); \quad (8)$$

$$c_{i.CA} = \sin(\varphi_c - \varphi_n + 30^\circ); \quad (9)$$

$$c_{i.A} = 0; \quad (10)$$

$$c_{i.B} = \sqrt{3} \sin(\varphi_c - \varphi_n + 60^\circ); \quad (11)$$

$$c_{i.C} = \sqrt{3} \sin(\varphi_c - \varphi_n + 120^\circ). \quad (12)$$

Якщо однофазну УКЕ увімкнено на одну з двох інших міжфазних напруг, то для знаходження коефіцієнтів  $c_i$  можна також скористатися формулами (7)...(12), замінивши відповідні індекси фаз з урахуванням випереджаючої або відстаючої фази. Наприклад, якщо однофазну УКЕ увімкнено на напругу  $\Delta U_{AB}$ , величину  $\Delta U_{AB}$  можна підрахувати за виразом (8), величину  $\Delta U_{BC}$  — за виразом (10) і т.д.

Розповсюдивши цей підхід на загальний випадок несиметричного трифазного навантаження з модулями  $S_{AB}$ ,  $S_{BC}$  і  $S_{CA}$  та кутами зсуву фаз  $\varphi_{AB}$ ,  $\varphi_{BC}$ ,  $\varphi_{CA}$  у відповідних плечах трифазної мережі, втрати фазних і міжфазних напруг у відсотках можна визначити за загальними виразами:

$$\Delta U_{AB} = k[S_{AB} \cdot 2 \sin(\varphi_m - \varphi_{AB} + 90^\circ) + S_{BC} \cdot \sin(\varphi_m - \varphi_{BC} + 150^\circ) + S_{CA} \cdot \sin(\varphi_m - \varphi_{CA} + 30^\circ)]; \quad (13)$$

$$\Delta U_{BC} = k[S_{AB} \cdot \sin(\varphi_m - \varphi_{AB} + 30^\circ) + S_{BC} \cdot 2 \sin(\varphi_m - \varphi_{BC} + 90^\circ) + S_{CA} \cdot \sin(\varphi_m - \varphi_{CA} + 150^\circ)]; \quad (14)$$

$$\Delta U_{CA} = k[S_{AB} \cdot 2 \sin(\varphi_m - \varphi_{AB} + 150^\circ) + S_{BC} \cdot \sin(\varphi_m - \varphi_{BC} + 30^\circ) + S_{CA} \cdot 2 \sin(\varphi_m - \varphi_{CA} + 90^\circ)]; \quad (15)$$

$$\Delta U_A = k[S_{AB} \cdot \sqrt{3} \sin(\varphi_m - \varphi_{AB} + 60^\circ) + S_{CA} \cdot \sqrt{3} \sin(\varphi_m - \varphi_{CA} + 120^\circ)]; \quad (16)$$

$$\Delta U_B = k[S_{AB} \cdot \sqrt{3} \sin(\varphi_m - \varphi_{AB} + 120^\circ) + S_{BC} \cdot \sqrt{3} \sin(\varphi_m - \varphi_{BC} + 60^\circ)]; \quad (17)$$

$$\Delta U_C = k[S_{AB} \cdot \sqrt{3} \sin(\varphi_m - \varphi_{AB} + 120^\circ) + S_{CA} \cdot \sin(\varphi_m - \varphi_{BC} + 60^\circ)], \quad (18)$$

де

$$k = \frac{100z_i}{U_n^2} \quad (19)$$

Вирази (13)...(19) можна також використовувати для підрахунку втрат напруги, створених однофазними і двофазними УКЕ, прийнявши відсутні потужності рівними нулю. Наприклад, якщо двофазну УКЕ потужністю  $S_i^{(2)}$  увімкнено на напруги  $U_{AB}$  і  $U_{BC}$  за  $S_{AB} = S_{BC} = S_i^{(2)}$  і  $\varphi_{AB} = \varphi_{BC} = \varphi_n$ , то втрати лінійних напруг можна розрахувати за виразом (5), прийнявши:

$$c_{i.AB} = [2 \sin(\varphi_m - \varphi_n + 90^\circ) + \sin(\varphi_m - \varphi_n + 90^\circ)] / 2; \quad (20)$$

$$c_{i.BC} = [\sin(\varphi_m - \varphi_n + 30^\circ) + 2 \sin(\varphi_m - \varphi_n + 90^\circ)] / 2; \quad (21)$$

$$c_{i.CA} = [\sin(\varphi_m - \varphi_n + 150^\circ) + \sin(\varphi_m - \varphi_n + 30^\circ)] / 2 = \sin(\varphi_m - \varphi_n + 90^\circ) / 2. \quad (22)$$

Модулі падінь напруги можна також розрахувати за виразами (13)...(19), прийнявши  $\varphi_m = \varphi_n$ . Можна також скористатися виразом, аналогічним (5):

$$|\underline{\Delta U}_i| = ka_i S_i, \%, \quad (23)$$

де  $a_i$  — коефіцієнт, що розраховують аналогічно коефіцієнту  $c_i$  за  $\varphi_m = \varphi_n$ .

Так, якщо однофазна УКЕ включена на  $U_{BC}$ , то отримуємо:

$$a_{i.AB} = \sin 150^\circ = 0,5; \quad a_{i.BC} = 2 \sin 90^\circ = 2; \quad a_{i.CA} = \sin 30^\circ = 0,5; \quad a_{i.A} = 0;$$

$$a_{i.B} = 1,73 \sin 60^\circ = 1,5; \quad a_{i.C} = 1,73 \sin 120^\circ = 1,5;$$

Значення коефіцієнтів  $a_i$  для однофазних, а також дво- і трифазних УКЕ з однаковим навантаженням плечей мережі наведено в таблиці 1.

Таблиця 1. Значення коефіцієнта  $a_i$  у виразі (23)

Фазність УКЕ	Напруга увімкнення	Значення коефіцієнта $a_i$ для розрахунку втрат напруги		
		$\Delta U_{AB}$	$\Delta U_{BC}$	$\Delta U_{CA}$
Однофазні	$U_{AB}$	2	0,5	0,5
	$U_{BC}$	0,5	2	0,5
	$U_{CA}$	0,5	0,5	2
Двофазні	$U_{AB}, U_{BC}$	1,25	1,25	0,5
	$U_{AB}, U_{CA}$	1,25	0,5	1,25
	$U_{BC}, U_{CA}$	0,5	1,25	1,25
Трифазні	$U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$	1	1	1

### Втрати напруги, створювані групою УКЕ

Оскільки втрати напруги під час пікових навантажень  $S_{II}$  пропорційні величинам цих навантажень, методи розрахунку імовірнісних втрат напруги аналогічні методам розрахунку імовірнісних пікових навантажень, наведених в [9]. Розрахунку передують розподіл одно- і двофазних УКЕ в трифазній мережі. Умову і порядок такого розподілу наведено в [8].

Знаходження імовірнісних втрат напруги  $\Delta U_\alpha$  пропонується вести для найбільш навантаженого плеча (міжфазної напруги) трифазної мережі на затискачах електрично найбільш віддаленої УКЕ. Визначення найбільш навантаженого плеча наведено в [8]. Під електричною віддаленістю розуміють добуток приведеної до трифазної потужності УКЕ на довжину мережі від ЦЖ до затискачів УКЕ. Така УКЕ буде створювати найбільшу втрату напруги  $\Delta U_{i,m}$ .

Якщо найбільш навантажене плече мережі і розрахункова УКЕ не очевидні, то величину  $\Delta U_\alpha$  розраховують для 2..3-х вірогідних УКЕ за кожною з трьох між фазних напруг. Найбільше з отриманих значень  $\Delta U_\alpha$  приймають за розрахункове  $\Delta U_p$ .

Порядок визначення  $\Delta U_\alpha$  наступний [5...7].

1. Для кожної  $i$ -ї УКЕ за виразом [5] підраховують величину втрати напруги  $\Delta U_i$ , створюваної їй на тих ділянках мережі до розрахункової УКЕ, якими протікає потужність  $S_i$   $i$ -ї УКЕ.

2. Підраховують умовну величину групового коефіцієнта увімкнення  $K_{y,y}$ , яку приймають рівною середньому значенню індивідуальних коефіцієнтів увімкнення  $K_{y,i}$ .

3. Вибирають розрахункову УКЕ з максимальною втратою напруги  $\Delta U_{i,m}$ . Інші  $(n-1)$  УКЕ з різними  $K_{y,i}$  і  $\Delta U_i$  замінюють умовною кількістю  $n_y$  УКЕ з однаковими  $K_{y,y}$  і  $\Delta U_{i,y}$ ; величини  $K_{y,i}$  і  $\Delta U_i$  розраховують за формулами, антологічними наведеним в [9], в яких повні потужності змінено на відповідні втрати напруги:

$$n_y = \frac{[\sum_{i=1}^n \Delta U_i K_{y,i} - \Delta U_{i,m} K_{y,y}]^2}{(\sum_{i=1}^n \Delta U_i^2 K_{y,i} - \Delta U_{i,m}^2 K_{y,y}) K_{y,y}}; \quad (24)$$

$$\Delta U_y = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta U_i K_{y,i} - \Delta U_{i,m} K_{y,y}}{n_y K_{y,y}}. \quad (25)$$

При цьому групу УКЕ, що вмикають за схемою «чекання» або одночасно, враховують як одну УКЕ аналогічно розрахунку пікових навантажень [9].

4. Знаходять величину еквівалентних перекриттів  $x$  на інтервалі часу  $\Theta = 0,4t_{36.c}$  де  $t_{36.c}$  - середнє значення часу зварювання для всіх УКЕ, за імовірнісними кривими  $x = f(n_y + 1, K_{y,y}, \alpha)$ . При цьому величину імовірності  $\alpha$  небажаної події  $\Delta U_\alpha > \Delta U_D$  вибирають аналогічно розрахунку пікових навантажень [9]. Обґрунтування вибору інтервалу  $\Theta = 0,4t_{36.c}$  та імовірнісні криві за  $\alpha = 0,001$  наведено в [9]. На рис. 1, 2 наведено імовірнісні криві за двома іншими величинами  $\alpha$ . Аналогічні криві  $\Theta = 0,4t_{36.c}$  наведено в [10,11].

5. Знаходять величину  $\Delta U_\alpha$  за виразом

$$\Delta U_\alpha = \Delta U_p + (x-1)\Delta U_y. \quad (26)$$

Викладений метод оцінки імовірнісних втрат напруги пройшов апробацію під час проектування електропостачання великих зварювальних виробництв машинобудівельних та вагонобудівельних заводів як у СРСР, так і в Україні.

## ІНШІ МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ

### Другий метод

Величину розрахункової втрати напруги  $\Delta U_p$  знаходять як суму трьох складників [1]:

$$\Delta U_p = \Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3, \quad \% \quad (27)$$

де  $\Delta U_1, \Delta U_2, \Delta U_3$  — втрати напруги відповідно в мережі напругою вище 1000 В від ЦЖ до трансформатора, що живить УКЕ, в трансформаторі і мережі напругою до 1000 В.

Величини  $\Delta U_1, \Delta U_2$  знаходять за загальновідомим виразом

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} I_{п.\Theta} (r \cos \varphi + x \sin \varphi)}{U_n} \cdot 100, \quad \% \quad (28)$$

де  $I_{п.\Theta}$  — піковий струм тривалістю  $\Theta \geq 2t_{3B} / 3$ .

Величину  $\Delta U_3$  розраховують за виразом

$$\Delta U_3 = \Delta U_{p,i} + u_e \Delta U_{п}, \quad (29)$$

де  $\Delta U_{p,i}$  — втрата напруги, створювана УКЕ, до затискачів якої розраховують величину  $\Delta U_p$ ;

$\Delta U_{\Pi}$  — усереднена втрата напруги від інших УКЕ, що співпали в часі роботи розрахункової УКЕ;

$u_e$  — еквівалентне число повних перекриттів.

Величина  $\Delta U_{p,i}$  розраховують за виразом (28) з використанням пікового струму  $I_{\Pi,p}$  розрахункової УКЕ, а  $\Delta U_{\Pi}$  знаходять за виразом

$$\Delta U_{\Pi} = \frac{2}{3} \frac{\Delta U_C^2 + \sigma^2[\Delta U]}{\Delta U_C}, \quad (30)$$

де  $\Delta U_C$  — величина середньої втрати напруги;

$\sigma^2[\Delta U]$  — квадрат середньоквадратичного відхилення втрати напруги.

Величини  $\Delta U_C$  і  $\sigma^2[\Delta U]$  в виразі (30) розраховують за формулами:

$$\Delta U_C = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} TB_i \Delta U_i}{n-1}; \quad (31)$$

$$\sigma^2[\Delta U] = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} TB_i \left(\frac{2}{3} - TB_i\right) \Delta U_i^2}{n-1}, \quad (32)$$

в яких втрата напруги  $\Delta U_i$ , створена кожною  $i$ -ю УКЕ, окрім розрахункової, розраховують за виразом

$$\Delta U_i = \Delta U_{p,i} I_{\Pi,i} / I_{\Pi,p}. \quad (33)$$

Для знаходження величини  $u_e$  екомендується крива залежності

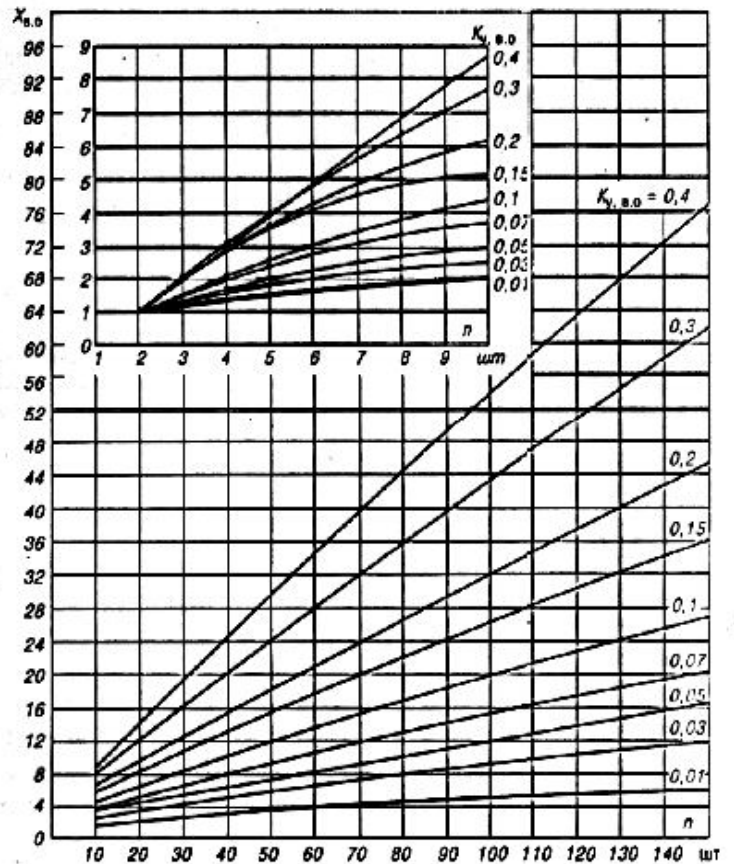


Рис. 1 Криві  $x = f(n, K)$  за  $\alpha = 0,0005$

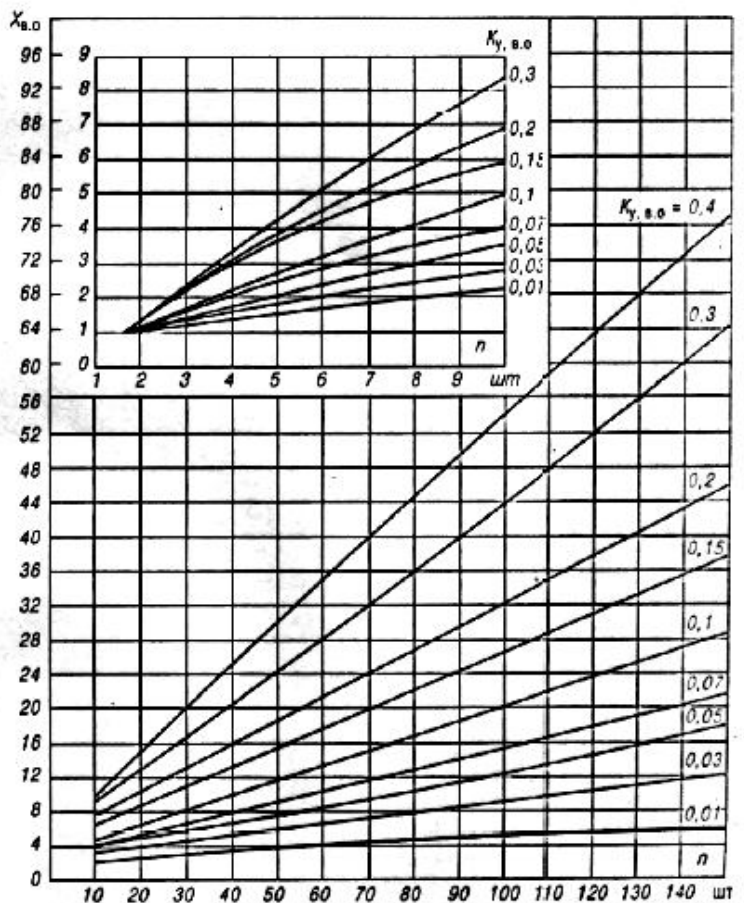


Рис. 2 Криві  $x = f(n, K_B)$  за  $\alpha = 0,0001$

$u_e = f(\alpha, \lambda)$ , де  $\lambda = n \cdot 2TB$ , якщо  $TB \leq 0,1$ , або криві [10], якщо  $TB > 0,1$ .

Величина  $\alpha$  рекомендується рівною 0,001.

Ряд суперечностей цього методу є очевидними:

- величина  $\Delta U_{p,i}$  включає складника втрати напруги у відгалуженні до розрахункової УКЕ, який не повинен враховуватися для інших  $i$ -х УКЕ у виразі (33);

- величина  $\Delta U_i$ , що підраховувана за виразом (33), не відображає фактичного вкладу  $i$ -ї УКЕ в розрахункову втрату напруги, так як випливає з припущення, що всі УКЕ підключено до мережі в одній точці (точці підключення розрахункової УКЕ);

- складники втрати напруги  $\Delta U_1, \Delta U_2$  розраховують за  $I_{\Pi, \Theta}$  тривалістю  $\Theta \geq 2t_{3B} / 3$ , а  $\Delta U_3$  — з використанням імовірнісних кривих, перші з яких (за  $TB > 0,1$ ) не враховують співпадання у часі роботи УКЕ, а другі (за  $TB > 0,1$ ) розраховано за умови  $\Theta = t_{3B,C}$ .

### Третій метод

На відміну від перших двох методів тут розрахункову УКЕ не вибирають. Розрахунок проводять по чергово для кожної міжфазної напруги в наступному порядку [12].

Для кожної  $i$ -ї УКЕ знаходять:

- величину  $z_i'$  за формулою

$$z_i' = r_i \cos \varphi_n + x_i \sin \varphi_n, \quad (35)$$

де  $r_i, x_i$  — сумарні опори мережі від ЦЖ до відгалуження до  $i$ -ї УКЕ;

- струм  $I_i$ , створюваний в плечі УКЕ, включеним на будь-яку міжфазну напругу;

- величину створеної втрати напруги  $\Delta U_i$ , за виразом

$$\Delta U_i = a_i z_i' I_i, \quad (36)$$

де  $a_i$  — коефіцієнт, величину якого вибирають за таблицею 2.

Таблиця 2. Значення коефіцієнта  $a_i$  у виразі (36)

Фазність УКЕ	Напруга увімкнення	Значення коефіцієнта $a_i$ для розрахунку втрат напруги		
		$\Delta U_{AB}$	$\Delta U_{BC}$	$\Delta U_{CA}$
Однофазні	$U_{AB}$	2	0,5	0,5
	$U_{BC}$	0,5	2	0,5
	$U_{CA}$	0,5	0,5	2
Двофазні	$U_{AB}, U_{BC}$	2,5	2,5	1
	$U_{AB}, U_{CA}$	2,5	1	2,5
	$U_{BC}, U_{CA}$	1	2,5	2,5
Трифазні	$U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$	$\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$

- середнє значення втрати напруги за виразом

$$\Delta \bar{U}_i = K_{y,i} \Delta U_i, \quad (37)$$

де  $K_{y,i}$  — коефіцієнт увімкнення  $i$ -ї УКЕ;

Для групи  $n$  УКЕ знаходять:

- середній коефіцієнт увімкнення  $\bar{K}_y$ , який приймають однаковим для всіх між фазних напруг і рівним середньому значенню індивідуальних коефіцієнтів увімкнення  $K_{y,i}$  всіх УКЕ;

- середню втрату даної міжфазної напруги  $\Delta \bar{U}$  із співвідношення

$$\Delta \bar{U} = \sum_{i=1}^n K_{y,i} \Delta U_i; \quad (38)$$

- величину максимальної втрати напруги  $\Delta U_M$  і мінімальної  $\Delta U_m$ , створюваної одиничними УКЕ;

- кількість  $n_1$  УКЕ з максимальною втратою напруги, що беруть участь у розрахунковій втраті напруги, за виразом

$$n_1 = \frac{\frac{\Delta \bar{U}}{\bar{K}_y} - n \Delta U_m}{\Delta U_M - \Delta U_m}; \quad (39)$$

- середній коефіцієнт увімкнення  $\bar{K}'_y$  для  $n_1$  УКЕ, що мають  $\Delta U_M$

- кількість  $m$  УКЕ, що беруть участь в розрахунковій втраті напруги, за кривими  $m = f(n, \bar{K}_y)$  за  $\alpha = 0,001$ ;

- кількість  $m_1$  УКЕ, кожна з яких створює максимальну втрату напруги, за тими ж кривими як функцію  $m_1 = f(n_1, \bar{K}'_y)$  за  $\alpha = 0,001$ ;

- величину міжфазної втрати напруги за виразом

$$\Delta U = 0,94[m_1 \Delta U_M + (m - m_1) \Delta U_m]. \quad (40)$$

Як розрахункове приймають максимальне з трьох значень втрат міжфазних напруг.