

# Modele beziskiernikowych ograniczników przepięć

**Coraz więcej prac projektowych i badawczych wykonuje się wykorzystując symulacje numeryczne działania nowych urządzeń. W skład wielu z nich wchodzi ograniczniki przepięć. W artykule przedstawiono sposób modelowania i wyznaczania parametrów modeli beziskiernikowych ograniczników przepięć.**

Beziskiernikowe ograniczniki przepięć są przeznaczone do ochrony urządzeń zasilania, taboru elektrycznego i innych od przepięć piorunowych i łączeniowych. W ostatnich latach wypierają one odgromniki zaworowe zawierające stos iskiernikowy. Jedynym, czynnym pod względem elektrycznym, elementem beziskiernikowych ograniczników przepięć jest stos szeregowo połączonych warystorów. Warystory te są wykonane technologią ceramiczną z tlenku cynku (ZnO) z domieszkami innych metali.

Nieliniowa charakterystyka napięciowo-prądowa warystorów powoduje, że przez ogranicznik włączony pod napięcie płynie prąd upływu rzędu kilkuset mikroamperów. Natomiast, gdy na zaciskach ogranicznika wystąpi przepięcie, prąd upływu gwałtownie wzrasta, przechodząc w prąd wyładowczy, nie dopuszczając do nadmiernego wzrostu napięcia na zaciskach chronionego urządzenia. Ogranicznik absorbuje energię przepięcia w stosie warystorowym, zamieniając ją na energię ciepłą. Energię tę, po przeminięciu przepięcia, ogranicznik odprowadza do otoczenia, stając się gotowym do dalszej pracy.

Tablica 1

**Podstawowe dane techniczne beziskiernikowych ograniczników przepięć**

Typ ogranicznika	Napięcie trwałej pracy [kV]	Znamionowy prąd wyładowczy 8/20 $\mu$ s [kA]	Wytrzymałość na długotrwałe udary prądowe [A/2 ms]	Zdolność pochłaniania energii [kJ/1 kV]
GXS 5,6	4,0	10	1000	8,0
POLIM H	4,0	20	1350	13,3
POLIM H 4,2 ND	4,2	10	1000	6,0
POLIM 4,5 ID	4,5	40	2000	21,0

Opisane modele beziskiernikowych ograniczników przepięć są odwzorowaniem czterech typów ograniczników: GXS 5,6; POLIM H 4; POLIM H 4,2 ND i POLIM 4,5 ID. Parametry modeli tych aparatów określono na podstawie katalogów i wyników badań laboratoryjnych [3], [4], [5], [6], [7]. Podstawowe dane techniczne odwzorowanych ograniczników zestawiono w tablicy 1.

Model ogranicznika przepięć składa się z rezystora o charakterystyce nieliniowej i połączonej szeregowo indukcyjności. Charakterystykę elementu nieliniowego można opisać równaniem [1]:

$$U_{ob} = k I_{wob}^{\alpha} \quad (1)$$

gdzie:

$U_{ob}$  – napięcie na zaciskach ogranicznika, napięcie obniżone,

$k$  – stała dla określonego ogranicznika,

$I_{wob}$  – prąd wyładowczy przepływający przez ogranicznik,

$\alpha$  – współczynnik nieliniowości.

Równanie to określa charakterystykę statyczną ogranicznika.

Wartość parametrów  $k$  i  $\alpha$  dla poszczególnych typów ograniczników wyznaczono poprzez dobór funkcji (1) tak, aby jej wykres pokrywał się z punktami o współrzędnych ( $I_{wob}$ ,  $U_{ob}$ ) podanych we wspomnianych materiałach. Punkty ( $I_{wob}$ ,  $U_{ob}$ ) wyznacza się przykładając do ogranicznika udar prądowy o wartości  $I_{wob}$  i mierzy się maksymalną wartość napięcia na zaciskach ogranicznika. Napięcie to nosi również nazwę napięcia obniżonego.

Charakterystyki statyczne modeli wyznaczono na podstawie siedmiu punktów ( $I_{wob}$ ,  $U_{ob}$ ) dla prądu  $1 \text{ kA} \leq I_{wob} \leq 40 \text{ kA}$  dla ograniczników serii POLIM i pięciu punktów dla prądu  $500 \text{ A} \leq I_{wob} \leq 20 \text{ kA}$  dla ogranicznika typu GXS. Wyznaczone w ten sposób wartości współczynników funkcji (1) zestawiono w tablicy 2, a przebiegi charakterystyk statycznych na rysunku 1.

Tablica 2

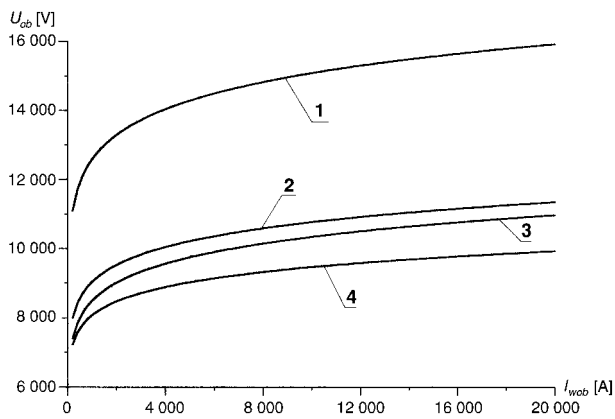
**Parametry funkcji  $U_{ob} = k I_{wob}^{\alpha}$  dla modelowanych ograniczników przepięć**

Typ ogranicznika	$k$	$\alpha$	$\Delta U_{obmax}$
GXS 5,6	5008,6	0,0692	1,19%
POLIM H 4	7301,6	0,0789	1,83%
POLIM H 4,2 ND	4701,0	0,0857	3,90%
POLIM 4,5 ID	5338,6	0,0763	4,23%

$\Delta U_{obmax}$  – maksymalna różnica między punktami otrzymanymi z badań a aproksymacją.

Otrzymane charakterystyki różnią się w niewielkim stopniu od wyników badań, lecz różnice te nie przekraczają 5% i można je pominąć. Aby zmniejszyć te rozbieżności, można charakterystyki aproksymować dwiema lub trzema funkcjami, jak to proponuje się w [2], lecz komplikowałoby to w znacznym stopniu strukturę modelu i wydłużało czas obliczeń.

Jak wspomniano wcześniej, elementem modelu ogranicznika jest rezystor, dlatego do określenia jego wartości,



Rys. 1. Charakterystyki statyczne modeli ograniczników przepięć  
1 - POLIM H 4; 2 - POLIM 4,5 ID; 3 - POLIM H 4,2 ND;  
4 - GXS 5,6

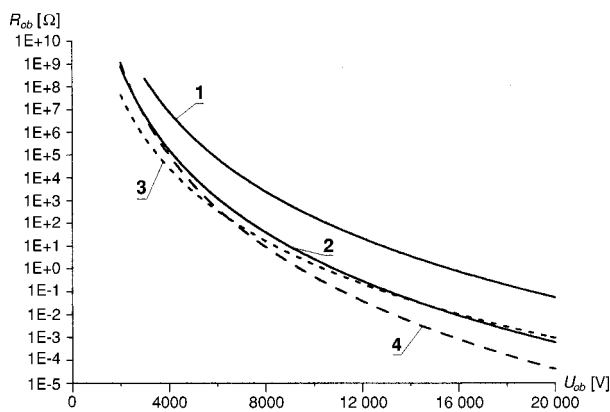
która zależna jest od napięcia przyłożonego na jego zaciski, równanie (1) należy przekształcić do postaci:

$$R_{ob} = \frac{U_{ob}}{I_{ob}} = U_{ob} \frac{k^{1/\alpha}}{U_{ob}^{1/\alpha}} = k^{1/\alpha} U_{ob}^{(1-1/\alpha)} \quad (2)$$

Po podstawieniu do równania (2) wartości współczynników z tablicy 1 otrzymano:

- dla GXS 5,6  $R_{ob} = 2,80986 \cdot 10^{53} U_{ob}^{-13,4466}$
- dla POLIM H 4  $R_{ob} = 8,73324 \cdot 10^{48} U_{ob}^{-11,6678}$
- dla POLIM H 4,2 ND  $R_{ob} = 7,39142 \cdot 10^{42} U_{ob}^{-10,6686}$
- dla POLIM 4,5 ID  $R_{ob} = 6,70958 \cdot 10^{48} U_{ob}^{-12,0993}$

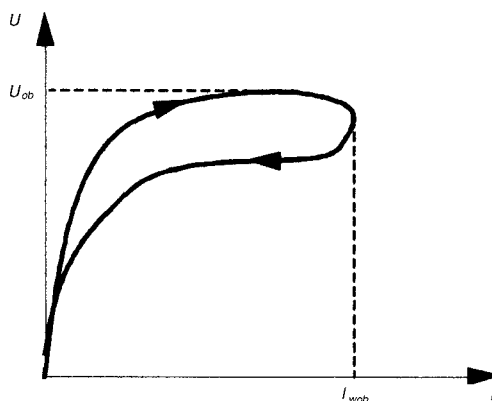
Przebiegi zmienności rezystancji ogranicznika w funkcji napięcia panującego na jego zaciskach przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Charakterystyki  $R_{ob} = f(U_{ob})$  modeli ograniczników przepięć  
1 - POLIM H 4; 2 - POLIM 4,5 ID; 3 - POLIM H 4,2 ND;  
4 - GXS 5,6

Ze względu na to, że równania określające  $R_{ob}$  dla małych napięć osiągają bardzo wysokie wartości (np. w przypadku GXS 5,6 dla  $U_{ob} = 0,1$  V;  $R_{ob} \approx 8,88 \cdot 10^{66}$ ), zmienność  $R_{og}$  odwzorowano funkcją tabelaryczną. Dla  $0 \leq U_{ob} \leq 3000$  V rezystancja ogranicznika ma wartość stałą na poziomie  $R_{ob} = f(3000$  V), a dla  $U_{ob} > 3000$  V,  $R_{ob}$  określona jest punktami wyznaczonymi z obranym krokiem  $\Delta U_{ob}$  na podstawie równania (2), połączonymi odcinkami prostymi.

Ograniczniki przepięć mają, oprócz statycznej, charakterystykę dynamiczną, zwaną także pętlą napięciowo-prądową (rys. 3). Część tej charakterystyki, odpowiadająca wzro-



Rys. 3. Przykładowy przebieg charakterystyki dynamicznej bezskierunkowego ogranicznika przepięć

stowi prądu przepływającego przez ogranicznik, przebiega wyżej, niż część, dla której prąd wyładowczy maleje. Odległość między tymi częściami zależna jest od wartości indukcyjności ogranicznika ( $L_{og}$ ). Dla części charakterystyki dynamicznej, dla której:

$$\frac{dI_{wob}}{dt} > 0$$

wartość napięcia odkładającego się na indukcyjności dodaje się do napięcia na rezystancji nieliniowej, natomiast przy

$$\frac{dI_{wob}}{dt} < 0$$

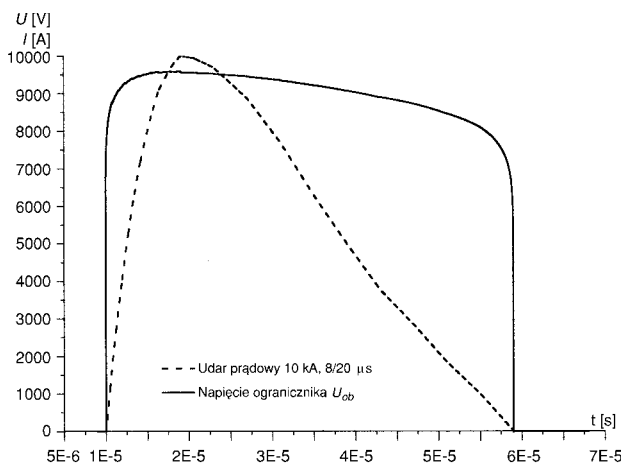
napięcie na  $L_{ob}$  odejmuje się od napięcia na  $R_{ob}$ .

Przy wyznaczaniu indukcyjności modelu ogranicznika przepięć danego typu posłużono się wynikami pomiarów napięcia obniżonego aparatów rzeczywistych. Pomiaru te wykonane były dla udarów prądowych o takiej samej wartości prądu, lecz różnych czasach trwania czoła i czasach do półszczytu, z krokiem wspomnianej wcześniej funkcji tabelarycznej  $\Delta U_{ob} = 50$  V. Przykładowo, dla ogranicznika typu GXS 5,6  $U_{ob} = 9,6$  kV przy udarze 10 kA, 8/20  $\mu$ s (rys. 4), a przy udarze 10 kA, 1/2,5  $\mu$ s  $U_{ob} = 10,6$  kV (rys. 5).

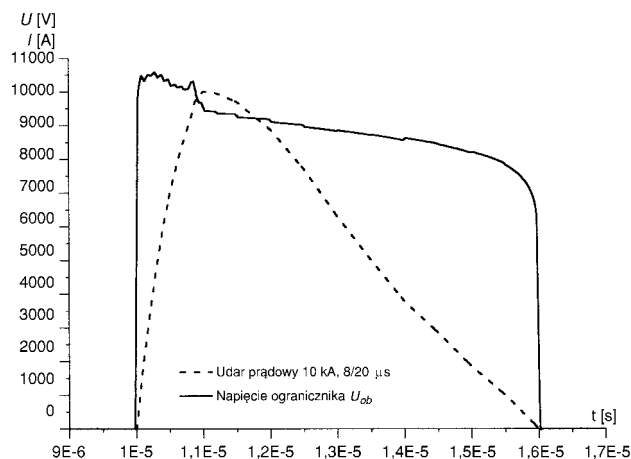
Indukcyjność modelu ogranicznika wyznaczono doświadczalnie (symulacje numeryczne). Do ogranicznika przykładowo udar prądowy o wartości i czasie trwania takich, jak podczas badań rzeczywistych i obliczano napięcie obniżone. Wartość  $L_{ob}$  dobierano tak, aby wyniki badań symulacyjnych były możliwie bliskie wynikom pomiarów rzeczywistych. Wyznaczone tą metodą wartości indukcyjności modeli ograniczników przepięć są następujące:

- dla GXS 5,6  $L_{ob} = 0,117$   $\mu$ H;
- dla POLIM H 4  $L_{ob} = 0,071$   $\mu$ H;
- dla POLIM 4,5 ID  $L_{ob} = 0,055$   $\mu$ H;
- dla POLIM H 4,2 ID  $L_{ob} = 0,111$   $\mu$ H.

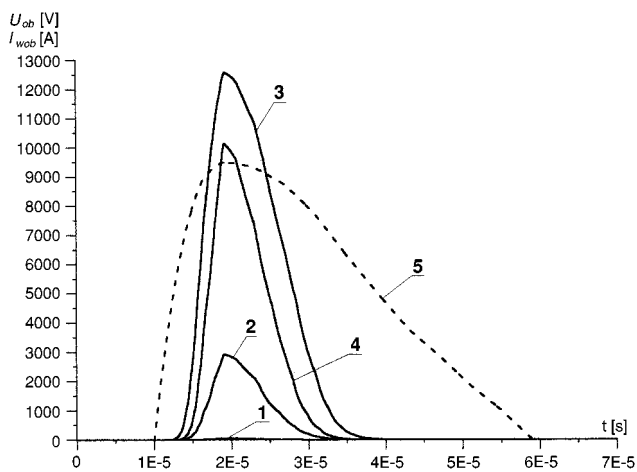
Wszystkie odwzorowane ograniczniki przepięć mają zbliżoną wartość trwałego napięcia pracy – około 4 kV DC, jed-



Rys. 4. Przebieg napięcia występującego na zaciskach ogranicznika typu GXS 5,6 przy udarze prądowym 10 kA, 8/20  $\mu$ s



Rys. 5. Przebieg napięcia występującego na zaciskach ogranicznika typu GXS 5,6 przy udarze prądowym 10 kA, 1/2,5  $\mu$ s



Rys. 6. Prąd  $I_{wob}$  przy podaniu udaru napięciowego  
1 - POLIM H 4; 2 - POLIM 4,5 ID; 3 - POLIM H 4,2 ND;  
4 - GXS 5,6; 5 - udar napięciowy 8/20  $\mu$ s, 10 kV

nak różną zdolność pochłaniania energii i znamionowego prądu wyladowczego (tab. 1). W związku z tym prąd ( $I_{wob}$ ) przez nie płynący po doprowadzeniu do ich zacisków udaru napięciowego również jest różny. Rysunek 6 ilustruje, że przy udarze napięciowym 8/20  $\mu$ s o wartości 10 kV, największą wartość osiąga prąd dla ogranicznika typu POLIM H 4,2 ND, a najmniejszą dla POLIM 4,5 ID. Im wartość prądu  $I_{wob}$  jest większa przy określonym napięciu, tym ogranicznik ograniczy to przepięcie do niższego poziomu (pochłonie większą wartość energii w określonym czasie). Maksymalne wartości przebiegów prądu wyladowczego, przedstawionych na rysunku 6, zestawiono w tablicy 3.

Tablica 3

**Maksymalne wartości prądu wyladowczego otrzymane za pomocą symulacji z wykorzystaniem modeli bezskiernikowych ograniczników przepięć**

Oznaczenie na rysunku 6	Typ ogranicznika	$I_{wob}$ [A]
1	POLIM H	55
2	POLIM 4,5 ID	1 920
3	POLIM H 4,2 ND	12 590
4	GXS 5,6	10 135

Podsumowując, przedstawione w artykule modele bezskiernikowych ograniczników przepięć są modelami prostymi. Choć nie uwzględniają one pewnych wielkości (np. pojemności szcztkowych), to dokładność odwzorowania tych aparatów jest na tyle dokładna, że z powodzeniem można je wykorzystywać do symulacji większości zjawisk zachodzących w układach trakcji elektrycznej.

□

#### Literatura

- [1] Auleytner K.: *Odgromniki*. WNT, Warszawa 1980.
- [2] Bernas S., Ciok Z.: *Modele matematyczne elementów systemu elektroenergetycznego*. WNT, Warszawa 1977.
- [3] Metal-Oxide Surge Arresters – POLIM®-I, POLIM®-S, POLIM®-H. ABB High Voltage Technologies Ltd, 1998 – katalog
- [4] Ograniczniki przepięć prądu stałego typu GXS 1,3÷5,6 w osłonie silikonowej. ABB Zwar S.A., 1998 – katalog.
- [5] Surge Arresters. ABB High Voltage Technologies Ltd, 1998 – katalog.
- [6] Test Report Nr. HAAR 490 709. ABB High Voltage Technologies Ltd, Wettinden 1997.
- [7] Test Report Nr. HAAR 490 779. ABB High Voltage Technologies Ltd, Wettinden 1997.

Autor  
dr inż. Artur Rojek  
Zakład Trakcji Centrum Naukowo-Techniczne Kolejnictwa