

WYKORZYSTANIE METOD STATYSTYCZNYCH DO OKREŚLENIA OPTYMALNEGO PRZEKROJU ŻYŁY POWROTNEJ W SIECIACH KABLOWYCH ŚREDNIEGO NAPIĘCIA

Mariusz BENESZ, Rafał TARKO

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki

tel: (12) 617-36-53

e-mail: mariusz.benesz@agh.edu.pl; rafal.tarko@agh.edu.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono problematykę statystycznej analizy optymalnego przekroju żyły powrotnej w sieciach kablowych, przy uwzględnieniu danych rzeczywistych sieci rozdzielczych o znamionowym napięciu: 6 kV, 15 kV, 20 kV i 30kV. Przedstawiona analiza ma na celu określenie poziomu zagrożenia żył powrotnych kabli średniego napięcia wskutek przekroczenia ich obciążalności prądem zwarciovych. Analizy przekroczeń obciążalności zwarciowej żył powrotnych dokonano przy wykorzystaniu programów: *Electromagnetic Transients Program - Alternative Transients Program (EMTP-ATP)* oraz *Statgraphics*, wykorzystanych odpowiednio przy modelowaniu komputerowym zwarć podwójnych oraz przy analizie optymalizacji statystycznej doboru przekroju żyły powrotnej.

Słowa kluczowe: optymalizacja, żyła powrotna, zwarcia podwójne, modelowanie komputerowe.

1. WPROWADZENIE

Żyła powrotna jest elementem konstrukcyjnym jednożyłowych kabli elektroenergetycznych średniego napięcia, przewodzącym prąd elektryczny m.in. w stanach zakłóceń. Zasadnicze narażenie żył powrotnych kabli elektroenergetycznych wynika ze zwarć podwójnych. Praktyka eksploatacyjna wykazuje, że zwarcia podwójne prawie zawsze rozpoczynają się od pojedynczego doziemienia, które jest przyczyną wzrostu napięcia na fazach nieuszkodzonych i w konsekwencji wystąpienia drugiego doziemienia. Podczas zwarć podwójnych płyną prądy zwarciove o wartościach zależnych od parametrów obwodu zwarciovego, a więc od wartości napięcia znamionowego, mocy zwarciovej sieci, parametrów zwarciowych transformatorów (przede wszystkim napięcia zwarcia), jednostkowych impedancji zwarciowych linii elektroenergetycznych oraz odległości miejsca zwarcia od szyn rozdzielni SN.

Wystąpienia zakłócenia zwarciovego w układzie elektroenergetycznych jest zdarzeniem losowym. Z tego powodu w analizie przekroczeń obciążalności zwarciovej żył powrotnych celowe jest podejście statystyczne, pozwalające określić prawdopodobieństwo przekroczenia obciążalności znamionowej żył powrotnych, a w dalszym

efekcie – liczbę przekroczeń na jednostkę długości linii kablowej w określonym czasie eksploatacji.

Dla określenia poziomu zagrożenia żył powrotnych kabli średniego napięcia wskutek przekroczenia obciążalności prądem zwarciowych, niezbędna jest znajomość struktury sieci elektroenergetycznej oraz charakterystycznych wielkości decydujących o wartości prądu zwarciovego.

2. ANALIZA STATYSTYCZNA PRZEKROCZEŃ OBCIĄŻALNOŚCI PRĄDOWEJ ŻYŁY POWROTNEJ

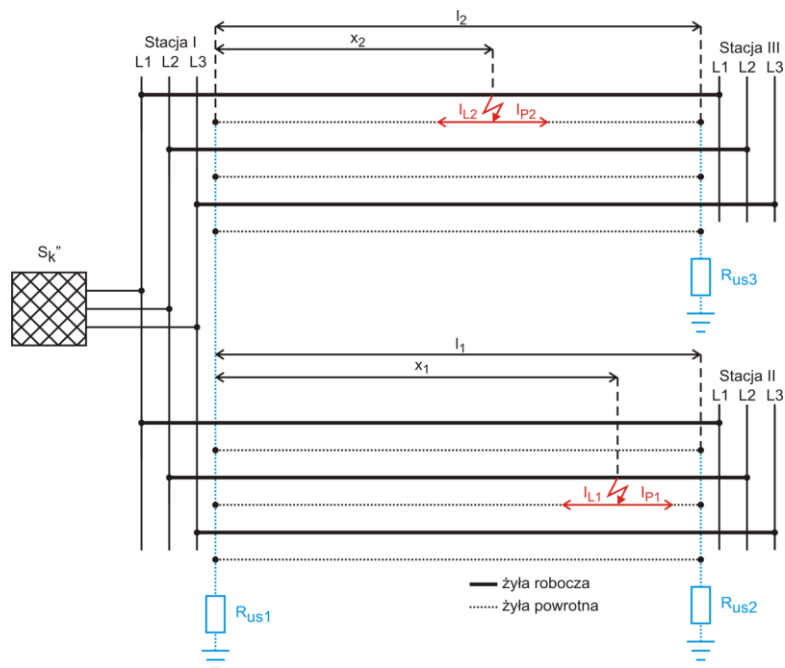
Analizę przekroczeń obciążalności zwarciovej żyły powrotnej przeprowadzono na modelu sieci średniego napięcia przedstawionym na rysunku 1. Rozważany model sieci średniego napięcia składa się z następujących elementów:

- trzech stacji elektroenergetycznych średniego napięcia (oznaczone jako Stacja I, Stacja II i Stacja III);
- systemu elektroenergetycznego o mocy zwarciovej S_k'' , przyłączonego do szyn Stacji I;
- linii kablowej z kablami jednożyłowymi pomiędzy Stacją I i Stacją II o długości l_1 ;
- linii kablowej z kablami jednożyłowymi pomiędzy Stacją I i Stacją III o długości l_2 ;
- żył powrotnych przyłączonych do uziołów poszczególnych stacji (oznaczonych jako R_{us1} , R_{us2} i R_{us3}).

2.1. Założenia analizy

Analizy statystycznej, opisywanego zagadnienia, dokonano przy uwzględnieniu:

- czterech wartości znamionowego napięcia sieci rozdzielczej: 6 kV, 15 kV, 20 kV i 30 kV;
- trzech przekrojów żyły powrotnej: 50 mm², 35 mm² i 25 mm²;
- wartości moc zwarciovej S_k'' jako zmienną losową z rozkładu o parametrach zestawionych w tabelicy 1;
- długości poszczególnych linii kablowych l_1 i l_2 jako zmienne losowe z rozkładów o parametrach zestawionych w tabelicy 2;
- odległości miejsca 1-go doziemienia x_1 (liczonej od szyn



Rys. 1. Rozważany model sieci średniego napięcia

Objaśnienia zastosowanych oznaczeń:

x_1, x_2 – odległości do miejsca zwarcia,

l_1, l_2 – długości linii kablowych,
 S_k'' – moc zwarciova na szynach średniego napięcia,

R_{us1} – rezystancja uziemienia w stacji I,

R_{us2} – rezystancja uziemienia w stacji II,

R_{us3} – rezystancja uziemienia w stacji III

Tablica 1. Parametry wykorzystanych w analizie rozkładów zmiennej losowej - mocy zwarciovej S_k''

U_N	6 kV	15 kV	20 kV	30 kV
Dopasowanie	Weibull	Weibull	Lognormal	Weibull
δ	2,0564	2,5698	---	2,2096
τ	119,04	147,95	---	192,49
μ	---	---	161,474	---
σ	---	---	47,201	---
Kwantyl rz. 0,98	231,08	251,56	279,11	356,87
Kwantyl rz. 0,50	99,61	128,28	154,98	163,07

Tablica 2. Parametry zastosowanych w analizie rozkładów zmiennej losowej – długości linii kablowej 1-żyłowej

U_N	6 kV	15 kV	20 kV	30 kV
Dopasowanie	Weibull	Lognormal	Weibull	Weibull
δ	1,2945	---	1,18562	1,19962
τ	1691,5	---	1881,53	1232,76
μ	---	1691,90	---	---
σ	---	1762,58	---	---
Kwantyl rz. 0,98	4851,8	6814,3	5945,2	3843,3
Kwantyl rz. 0,50	1274,4	1171,6	1381,2	908,2

Stacji I w kierunku Stacji II) jako zmienną losową z rozkładu jednostajnego na przedziale $(0, l_1]$;

- odległości miejsca 2-go doziemienia x_2 (liczonej od szyn Stacji I w kierunku Stacji III) jako zmienną losową z rozkładu jednostajnego na przedziale $(0, l_2]$;
- rezystancji uziemień poszczególnych stacji elektroenergetycznych o wartościach wynoszących: $R_{us1} = 0,5 \Omega, R_{us2} = R_{us3} = 10 \Omega$;
- dopuszczalnych wartości 1-sekundowych prądów zwarciovej wynoszących 5,3 kA, 7,1 kA i 9,8 kA-odpowiednio dla przekroju żyły powrotnej 25 mm², 35 mm² i 50 mm²;
- liczby zwarć przypadającej na km długości linii kablowej w ciągu roku równej 0,0316 [zwarć/km/rok];

- przekroju żył roboczych kabli 1-żyłowych o wartości 240 mm².

2.2. Tok postępowania

Badania polegały na przeprowadzeniu, dla założonego napięcia znamionowego i danego przekroju żyły powrotnej, pięciuset symulacji zwarć dwufazowych, przy czym w każdej z symulacji losowano z odpowiedniego rozkładu parametry zmiennych losowych tj.: S_k'' , l_1 , l_2 , x_1 i x_2 . Dla i-tej symulacji ($i = 1, \dots, 500$) otrzymywano wartości prądów płynących w żyłach powrotnych kabli, z których do dalszej analizy wybierano wartość największą.

Analizę zwarć dwufazowych przeprowadzono z wykorzystaniem programu komputerowego sterującego automatycznie przebiegami symulacji w programie EMTP-ATP. Jego końcowym efektem działania było między innymi pięćset wartości największych spodziewanych prądów zwarciovej, stanowiących zmienną losową, którą poddano dalszej analizie statystycznej z wykorzystaniem programu STATGRAPHICS. Wynikiem analizy statystycznej są histogramy i dystrybuanty największych spodziewanych prądów w żyłach powrotnych kabli 1- żyłowych.

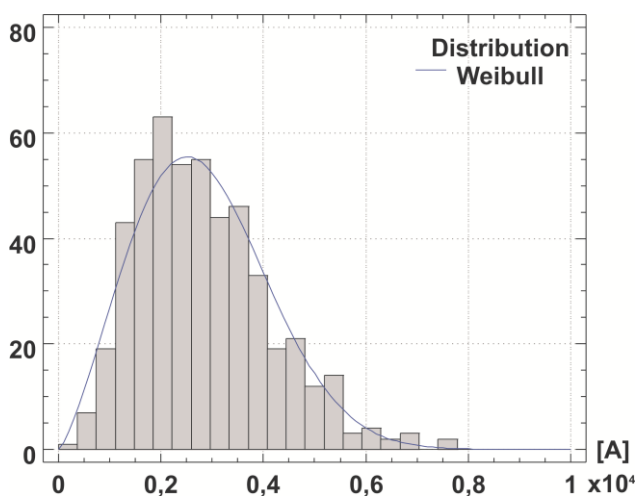
Przykładowe wyniki analizy statystycznej, dla znamionowego napięcia sieci $U_N = 15$ kV oraz wszystkich przekrojów żyły powrotnej, przedstawiono na rysunkach 4 – 9.

2.3. Wyniki analizy przekroczeń obciążalności zwarciovej żyły powrotnej

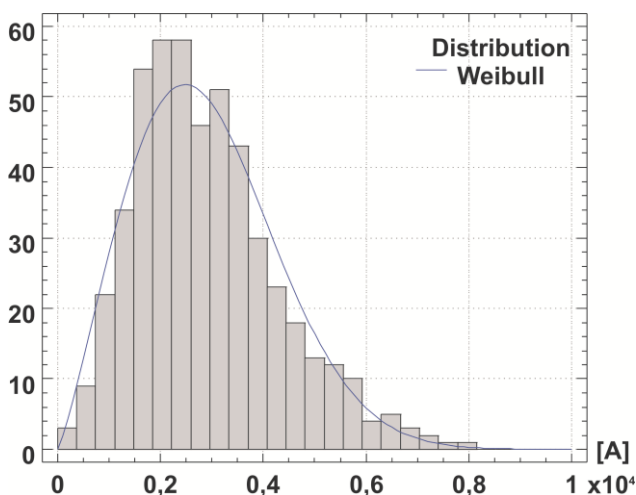
Dla każdego poziomu napięcia i uwzględnianego przekroju żyły powrotnej odczytano z otrzymanych dystrybuant prawdopodobieństwo przekroczenia prądu n-sek., przy czym brano pod uwagę trzy warianty czasu zwarć: 0,5s, 1 i 2 sekundy. Wyniki dla rozpatrywanych wariantów wartości napięcia znamionowego i przekroju żyły powrotnej zestawiono w tablicy 3.

Dysponując wyznaczonymi wartościami prawdopodobieństwa przekroczenia wartości zwarciovej prądu n-sekundowego oraz przyjętą liczbą zwarć w analizowanej sieci, określono współczynnik przekroczeń znamionowej obciążalności zwarciovej żył powrotnych wyrażonych w [przekroczeń/km/rok] (tab. 4). Dane zestawiono w tablicy 4

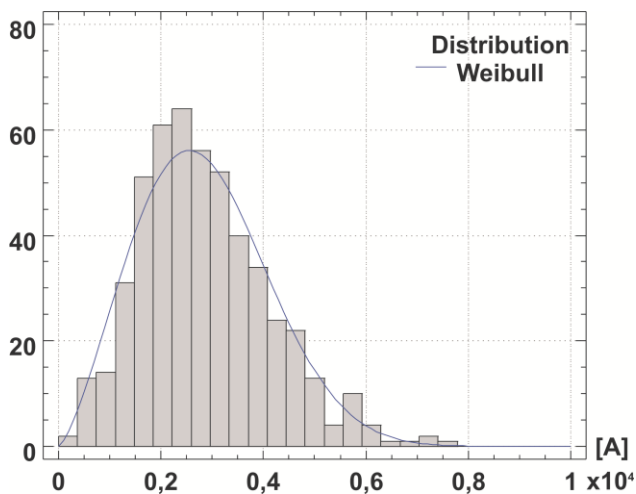
zostały wykorzystane do otrzymania ostatecznych wyników analizy statystycznej, a mianowicie do określenia liczby przekroczeń obciążalności zwarciowej żył powrotnych kabli 1-żyłowych. Liczba przekroczeń została określona na 100 km długości linii kablowej w pięćdziesięcioletnim czasie eksploatacji, a otrzymane wartości przedstawiono na rysunku 10.



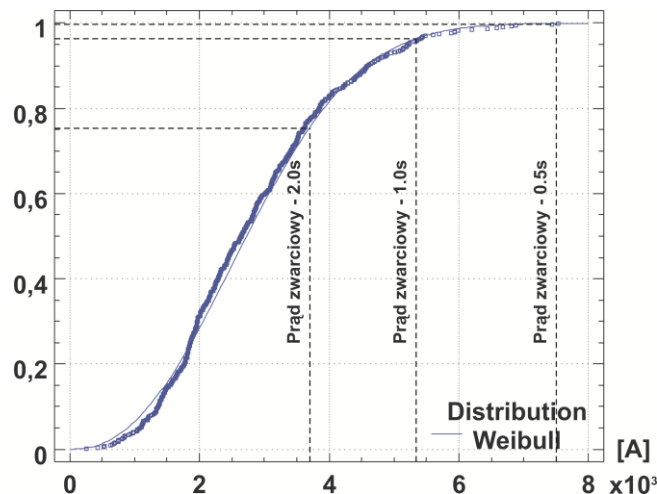
Rys. 4. Histogram spodziewanych wartości prądów zwarciowych dla przypadku $S = 25 \text{ mm}^2$ i $U_N = 15 \text{ kV}$



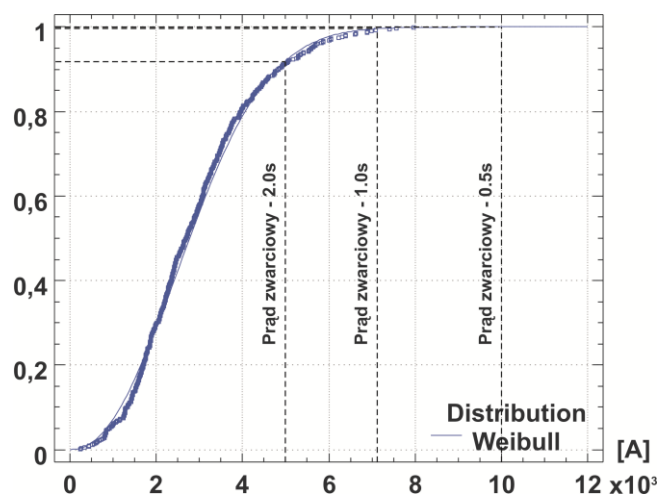
Rys. 5. Histogram spodziewanych wartości prądów zwarciowych dla przypadku $S = 35 \text{ mm}^2$ i $U_N = 15 \text{ kV}$



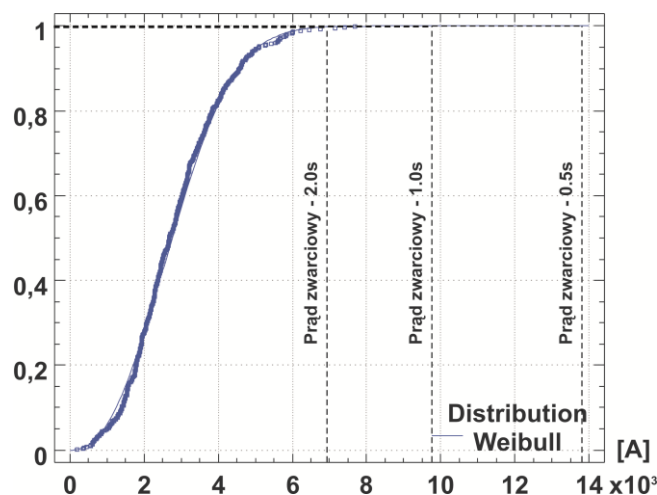
Rys. 6. Histogram spodziewanych wartości prądów zwarciowych dla przypadku $S = 50 \text{ mm}^2$ i $U_N = 15 \text{ kV}$



Rys. 7. Funkcja dystrybuanty spodziewanych wartości prądów zwarciowych dla przypadku $S = 25 \text{ mm}^2$ i $U_N = 15 \text{ kV}$



Rys. 8. Funkcja dystrybuanty spodziewanych wartości prądów zwarciowych dla przypadku $S = 35 \text{ mm}^2$ i $U_N = 15 \text{ kV}$



Rys. 9. Funkcja dystrybuanty spodziewanych wartości prądów zwarciowych dla przypadku $S = 50 \text{ mm}^2$ i $U_N = 15 \text{ kV}$

3. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

Podsumowując otrzymane wyniki liczby przekroczeń obciążalności zwarciowej żył powrotnych kabli 1-żyłowych, eksploatowanych w sieciach dystrybucyjnych, można wysunąć następujące spostrzeżenia:

Tablica 3. Prawdopodobieństwo przekroczenia przez prąd płynący w żyłce powrotnej wartości znamionowego prądu n-sekundowego

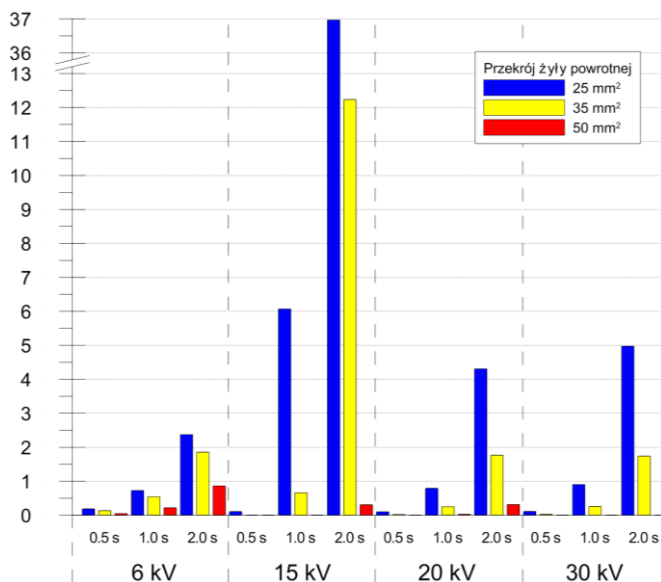
Czas zwarcia	Przekrój żyły powrotnej		
	25 mm ²	35 mm ²	50 mm ²
Znamionowe napięcie sieci rozdzielczej 6 kV			
0,5 s	0,00117630	0,00084526	0,00028743
1,0 s	0,00458820	0,00344189	0,00137294
2,0 s	0,01503640	0,01175640	0,00544110
Znamionowe napięcie sieci rozdzielczej 15 kV			
0,5 s	0,00066717	8,0318E-06	6,7724E-15
1,0 s	0,03847800	0,00417986	0,00000063
2,0 s	0,23427100	0,07751180	0,00193103
Znamionowe napięcie sieci rozdzielczej 20 kV			
0,5 s	0,00061823	0,00014306	0,00000870
1,0 s	0,00499565	0,00155960	0,00016657
2,0 s	0,02730880	0,01118920	0,00198678
Znamionowe napięcie sieci rozdzielczej 30 kV			
0,5 s	0,00068125	0,00015839	0,00000000
1,0 s	0,00569273	0,00161245	1,1102E-16
2,0 s	0,03152930	0,01102000	4,2847E-08

Tablica 4. Współczynnik przekroczeń znamionowej obciążalności zwarciowej żył powrotnych [przekroczeń/km/rok]

Czas zwarcia	Przekrój żyły powrotnej		
	25 mm ²	35 mm ²	50 mm ²
Znamionowe napięcie sieci rozdzielczej 6 kV			
0,5 s	3,72E-05	2,67E-05	9,08E-06
1,0 s	0,00014	0,00011	4,34E-05
2,0 s	0,00048	0,00037	0,00017
Znamionowe napięcie sieci rozdzielczej 15 kV			
0,5 s	2,11E-05	2,54E-07	2,14E-16
1,0 s	0,00122	0,00013	1,99E-08
2,0 s	0,00740	0,00245	6,10E-05
Znamionowe napięcie sieci rozdzielczej 20 kV			
0,5 s	1,95E-05	4,52E-06	2,75E-07
1,0 s	0,00016	4,93E-05	5,26E-06
2,0 s	0,00086	0,00035	6,28E-05
Znamionowe napięcie sieci rozdzielczej 30 kV			
0,5 s	2,15E-05	5,01E-06	0,00E+00
1,0 s	0,00018	5,10E-05	3,51E-18
2,0 s	0,00100	0,00035	1,35E-09

Tablica 5. Dopuszczalne czasy trwania zwarcia

Znamionowe napięcie sieci	Przekrój żyły powrotnej		
	25 mm ²	35 mm ²	50 mm ²
6 kV	< 1,0 s	< 1,0 s	< 2,0 s
15kV	< 0,5 s	< 1,0 s	< 2,0 s
20 kV	< 1,0 s	< 1,0 s	< 2,0 s
30 kV	< 1,0 s	< 1,0 s	< 2,0 s



Rys. 10. Liczba przekroczeń znamionowej obciążalności zwarciowej żył powrotnych na 100 km linii kablowej 1-żyłowej w ciągu 50 lat

- liczba przekroczeń obciążalności zwarciowej, jest proporcjonalna do czasu zwarcia, tzn. większym wartościom tych czasów odpowiadają większe wartości liczby przekroczeń;
- liczba przekroczeń obciążalności zwarciowej jest odwrotnie proporcjonalna do przekroju żyły powrotnej, tzn. większym wartościom tych przekrojów odpowiadają mniejsze wartości liczby przekroczeń;
- w przypadku kabli, o standardowym przekroju żyły powrotnej 50 mm², przekroczenia obciążalności znamionowej żył powrotnych są zdarzeniami losowymi o małym prawdopodobieństwie. Jedynie w sieci 6 kV, dla czasów trwania zwarcia rzędu 2 sekund należy liczyć się w ciągu 50 lat na 100 km linii z liczbą przekroczeń bliską jedności. W przypadku pozostałych napięć znamionowych, niezależnie od rozpatrywanych czasów zwarcia, wartości te są zdecydowanie mniejsze od jedności;
- redukcja przekroju żył powrotnych skutkuje wzrostem ryzyka przekroczenia obciążalności zwarciowej – największy wzrost zaobserwowano w sieciach o napięciu 15 kV. Sytuację tą należy mieć na uwadze przy dobieraniu nastaw odpowiednich zabezpieczeń. Przy założeniu kryterialnej wartości liczby przekroczeń na poziomie 1 [przekroczenia/100km/50lat], dopuszczalne czasy trwania zwarcia zestawiono w tablicy 5.

APPLICATION STATISTICAL METHODS TO DETERMINE OPTIMAL CROSS-SECTION OF THE RETURN CONDUCTOR IN MEDIUM VOLTAGE NETWORKS

Key-words: statistical optimization, return conductor, double fault

This paper presents the problem of statistical analysis of the optimum cross-section of the return conductor, taking into account the actual data of the distribution network. The aim of this study was to determine the level of risk of venous return conductors as a result of exceeding their permissible load short-circuit current. Analysis was made using programs: *The Electromagnetic Transients Program - Alternative Transients Program (EMTP-ATP)* and *Statgraphics*, appropriately to computer modeling of double faults and the analysis of statistical optimization.