



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH

DYSCYPLINA AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA, ELEKTROTECHNIKA
I TECHNOLOGIE KOSMICZNE

AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Analiza wpływu losowości parametrów sieci
i spodziewanych zakłóceń na wybór sposobu
połączenia z ziemią punktu neutralnego w sieci
średniego napięcia

Autor: mgr inż. Jarosław Maksymilian Kmak

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Wiesław Nowak, prof. AGH
Promotor pomocniczy: dr inż. Rafał Tarko

Praca wykonana:
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej
Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki

Kraków, 2023

Zagadnienie wyboru sposobu połączenia z ziemią punktu neutralnego sieci elektroenergetycznych średnich napięć (SN), ze względu na swoją złożoność i wieloaspektowość, należy do ciągle aktualnych problemów elektroenergetyki. Podstawę tego wyboru stanowi wartość jednofazowego prądu zwarcia doziemnego oraz ocena skutków jego rozprzysięgu zarówno w samej sieci jak i w układach uziomowych. Najważniejszymi skutkami branymi pod uwagę w analizie są: zagrożenie porażeniowe, skuteczność działania elektroenergetycznych zabezpieczeń ziemnozwarciowych oraz poziom przepięć dorywczych i przejściowych.

Punkt neutralny (PN) w sieciach średnich napięć jest połączony z ziemią poprzez impedancję (dławik, rezystor lub ich równoległe połączenie) albo izolowany. Od parametrów tego połączenia zależy zarówno wartość jak i charakter prądu I_F zwarcia doziemnego. Prąd ten jest również istotnie zależny od parametrów sieci i zakłóceń, które mając losowy charakter wpływają na wybór sposobu połączenia z ziemią punktu neutralnego. W rozprawie sformułowano następującą tezę:

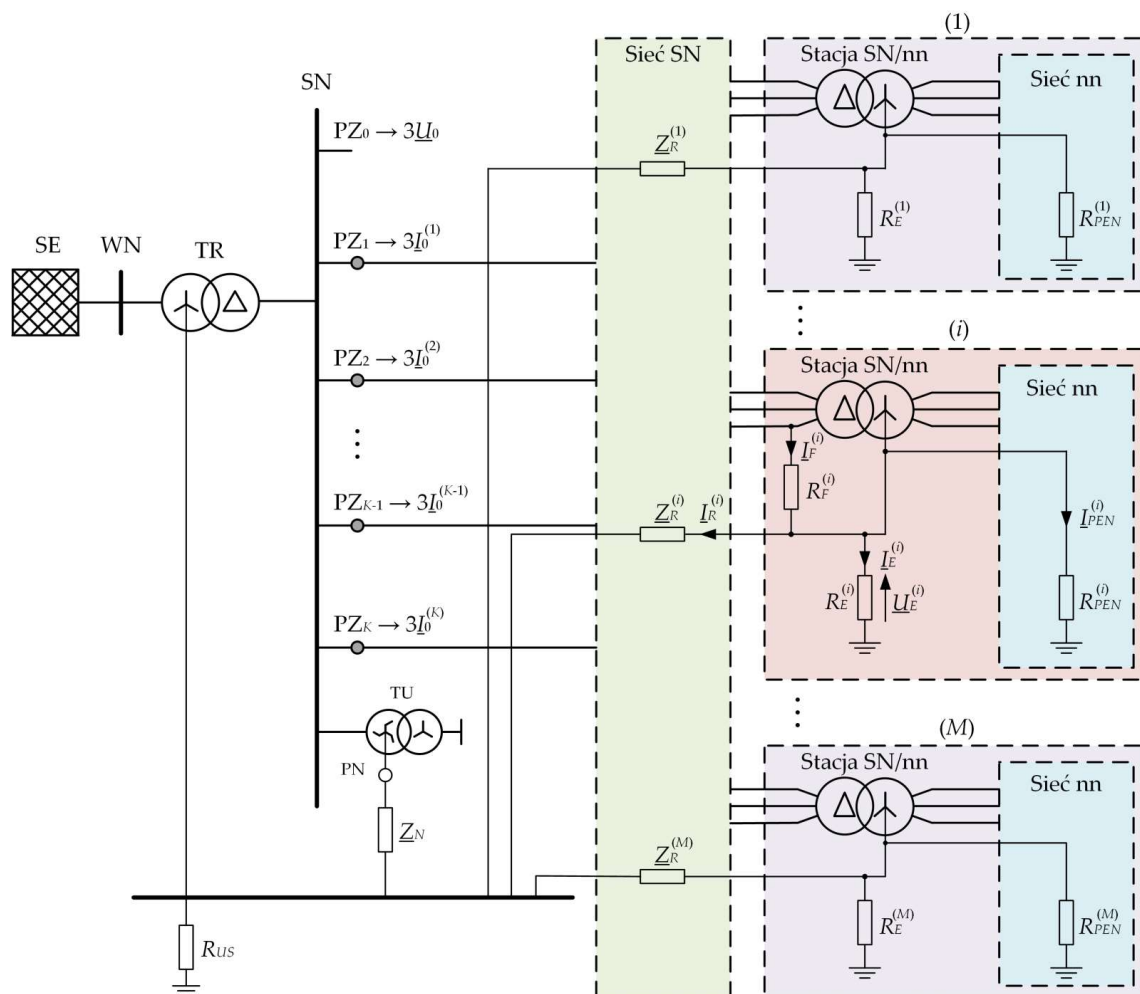
Uwzględnienie losowości parametrów sieci i zakłóceń umożliwia wyznaczenie dla każdego ze sposobów połączenia z ziemią punktu neutralnego sieci średniego napięcia, wymaganych nastaw elektroenergetycznej automatyki ziemnozwarciowej lub maksy–malnych rezystancji uziemienia stacji SN/nn, tak aby zagrożenie porażeniowe podczas jednofazowych zwarc doziemnych nie przekroczyło założonego akceptowalnego poziomu.

Głównym celem badań było opracowanie spójnego zestawu metod statystycznych, umożliwiających obiektywną ocenę i podejmowanie decyzji o wyborze reżimu pracy punktu neutralnego sieci średnich napięć.

Przedmiotem rozważań dysertacji jest sieć średniego napięcia (rys. 1), w której występuje M stacji transformatorowych SN/nn zasilających M sieci niskiego napięcia. W przedmiotowej sieci analizuje się jednofazowe zwarcie doziemne, które ma miejsce po stronie SN w i -tej stacji SN/nn. W wyniku tego stanu zakłócenia, w miejscu zwarcia płynie prąd I_F , którego wartość uzależniona jest również od rozległości (wypadkowej pojemności) sieci oraz od wartości napięcia roboczego U_r . Ponadto w stacji dotkniętej zwarcie występuje zagrożenie porażeniowe, którego poziom wynika z wartości napięcia uziomowego U_E (rys. 2).

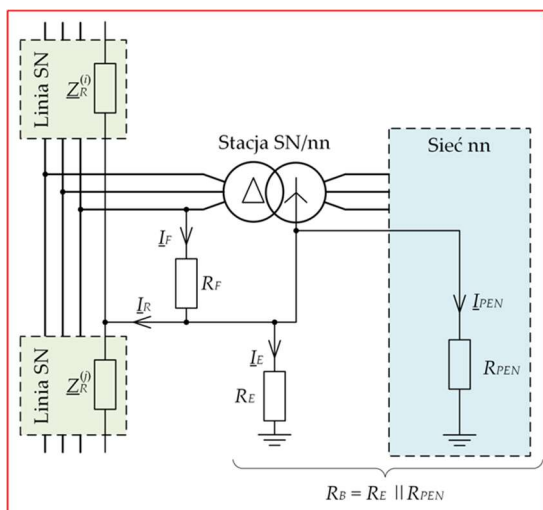
Podstawę badań stanowiły modele statystyczne parametrów sieci i zakłóceń, które istotne są z punktu widzenia tematyki rozprawy:

- napięcia roboczego U_r na szynach rozdzielni SN – rysunek 3,
- rezystancji R_F zwarcia – rysunek 4,
- impedancji dróg ziemnopowrotnych Z_R wynikających ze struktury sieci – rysunek 5,
- rezystancji R_B stacji SN/nn na terenie Polski, który opracowano na podstawie badań ankietowych (tab.1), dzięki uprzejmości Polskiego Towarzystwa Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej oraz wiodących Operatorów Systemów Dystrybucyjnych.

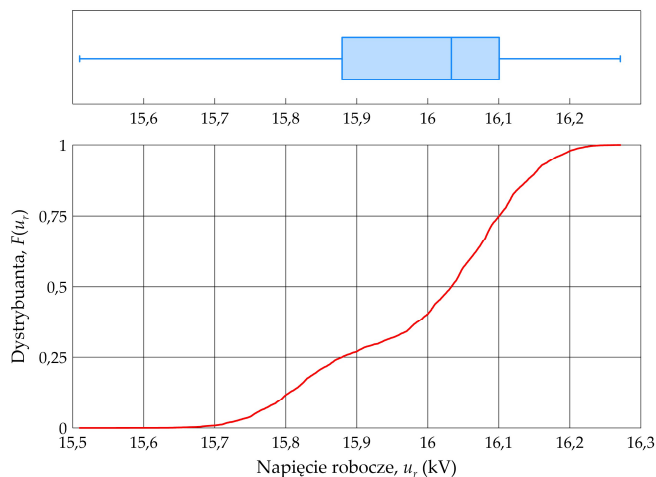


Rys. 1. Schemat rozważnego układu elektroenergetycznego SN

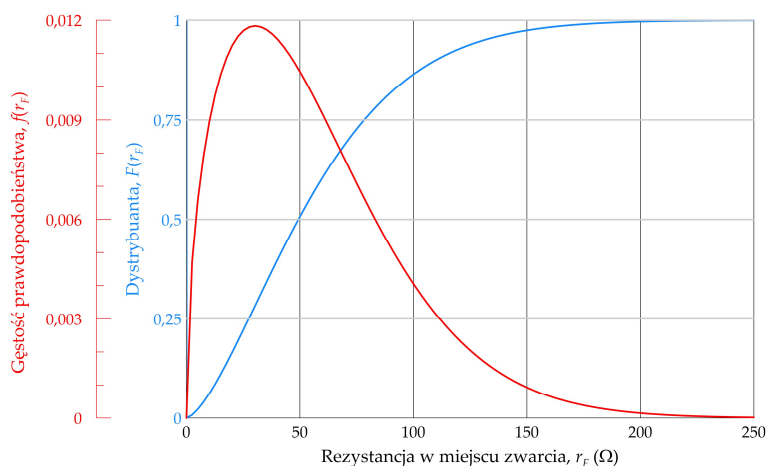
SE – system elektroenergetyczny wysokiego napięcia; TR – transformator zasilający sieć średniego napięcia; PZ₀ – układ pomiaru składowej zerowej napięcia $3\dot{U}_0$; PZ₁ ÷ PZ_K – układy pomiarów składowych zerowego prądu $3\dot{I}_0$ w polach liniowych; TU – transformator uziemiający; Z_N – impedancja uziemia punktu neutralnego (PN); R_{US} – rezystancja uziemia stacji WN/SN; Z_R – wypadkowa impedancja dróg ziemnopowrotnych; R_E – rezystancja uziomu stacji SN/nn; R_{PEN} – wypadkowa rezystancja uziemień w sieci niskiego napięcia (nn); R_F – rezystancja zwarcia; I_F – prąd zwarcia doziemnego; I_E, I_R, I_{PEN} – składowe prądu I_F w układzie uziomowym stacji; U_E – napięcie uziomowe



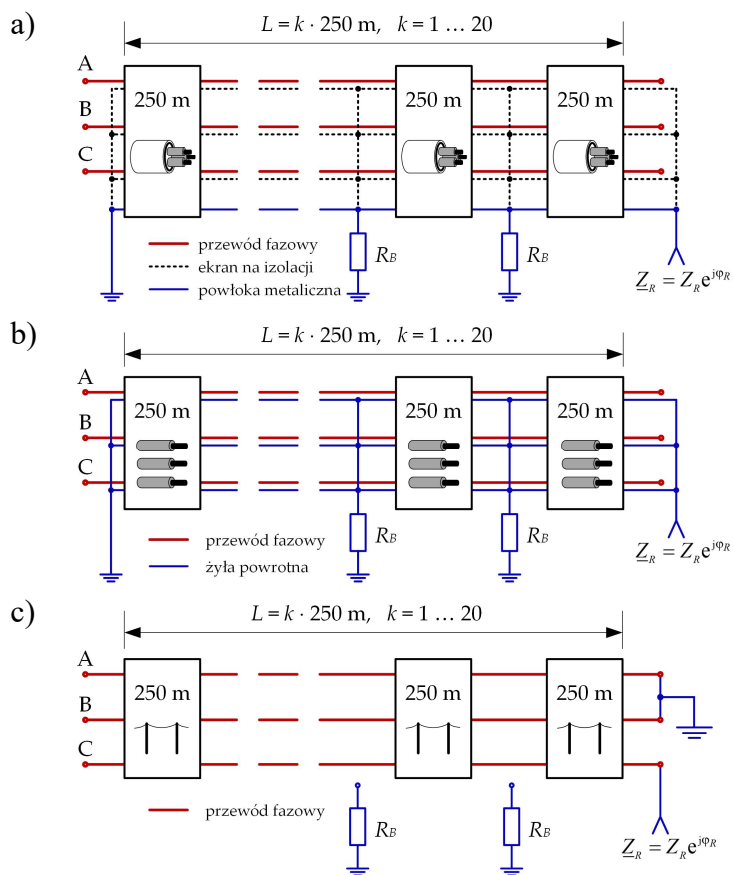
Rys. 2. Układ uziomowy stacji SN/nn
R_B – rezystancja uziemia stacji



Rys. 3. Wykres pudełkowy oraz dystrybuanta empiryczna napięcia roboczego U_r na szynach 15 kV stacji 110/15 kV (opracowanie własne na podstawie próby 14390 wartości zmierzonych w analizowanej w ramach rozprawy stacji 110/15 kV)



Rys. 4. Funkcja gęstości $f(r_F)$ i dystrybuanta $F(r_F)$ rozkładu Weibulla rezystancji r_F (opracowanie własne na podstawie danych literaturowych)



Rys. 5. Modele dróg ziemnopowrotnych w sieciach SN: (a) powłoki metaliczne kabli trójżyłowych, (b) żyły powrotne kabli jednożyłowych, (c) admitancje poprzeczne linii napowietrznych

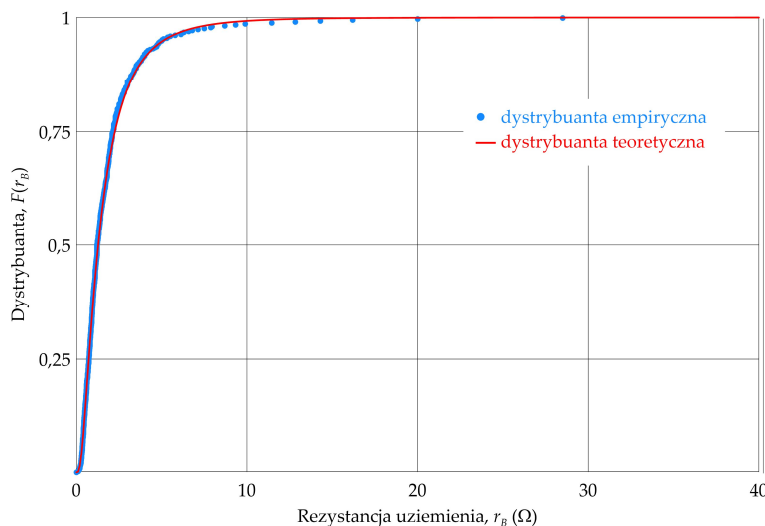
Tab. 1. Wzór ankiety dotyczący stacji SN/nn

Nr próbki	Rezystancja R_B (Ω)	Rodzaj gruntu	Wilgotność gruntu	Miesiąc wykonania pomiaru	Prąd zwarcia doziemnego I_F (A)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1					
2					
...

W wyniku przeprowadzenia ankiety otrzymano próbę 2408 wartości rezystancji R_B pochodzącej z obszaru całej Polski. Analiza cech uzupełniających pozwoliła na stwierdzenie, że próba ta jest reprezentatywna dla populacji stacji SN/nn na terenie kraju. W wyniku przeprowadzonego wnioskowania statystycznego zaproponowano dla wielkości R_B model statystyczny w postaci rozkładu logarytmno-normalnego o dystrybuancie:

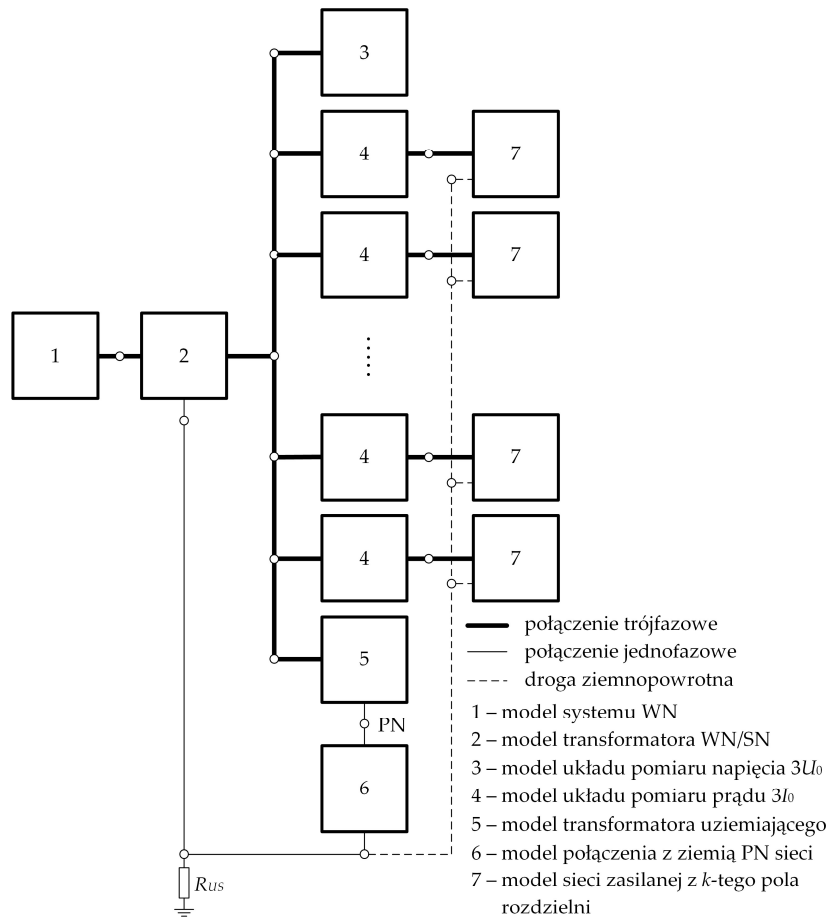
$$F(r_B) = \int_0^{r_B} \frac{1}{x\sqrt{2\pi} \cdot 0,845} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - 0,241}{0,845}\right)^2\right] dx$$

Dystrybuantę tę (rys.6) wykorzystano w badaniach symulacyjnych wykonywanych w celu oceny zagrożenia porażeniowego i skuteczności działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych w sieci SN.



Rys. 6. Dystrybuanta teoretyczna i empiryczna zmiennej losowej R_B

Badania skutków jednofazowych zwarcí doziemnych w sieciach o strukturze przedstawionej na rysunku 1, przeprowadzano metodą Monte Carlo z wykorzystaniem opracowanego w programie komputerowym EMTP-ATP modelu (rys. 7). W każdej z M stacji SN/nn przeprowadzano po N symulacji doziemień dla wylosowanych wartości R_B , rezystancji R_F zwarcia oraz napięcia roboczego U_r . Do automatycznego sterowania procesem symulacji (poza preprocesorem ATPDraw) i analizą wyników według algorytmu przedstawionego na rysunku 8 wykorzystano program opracowany w środowisku MATLAB.



Rys. 7. Schemat blokowy modelu analizowanego układu elektroenergetycznego

W wyniku przeprowadzonych symulacji otrzymuje się próby losowe następujących wielkości:

— napięć uziomowych w stacjach SN/mn:

$$\underline{U}_E(i, j), \quad i = 1, \dots, M \quad j = 1, \dots, N$$

— prądów zwarć doziemnych w stacjach SN/mn:

$$\underline{I}_F(i, j), \quad i = 1, \dots, M \quad j = 1, \dots, N$$

— składowej symetrycznej kolejności zerowej napięcia w stacji zasilającej WN/SN:

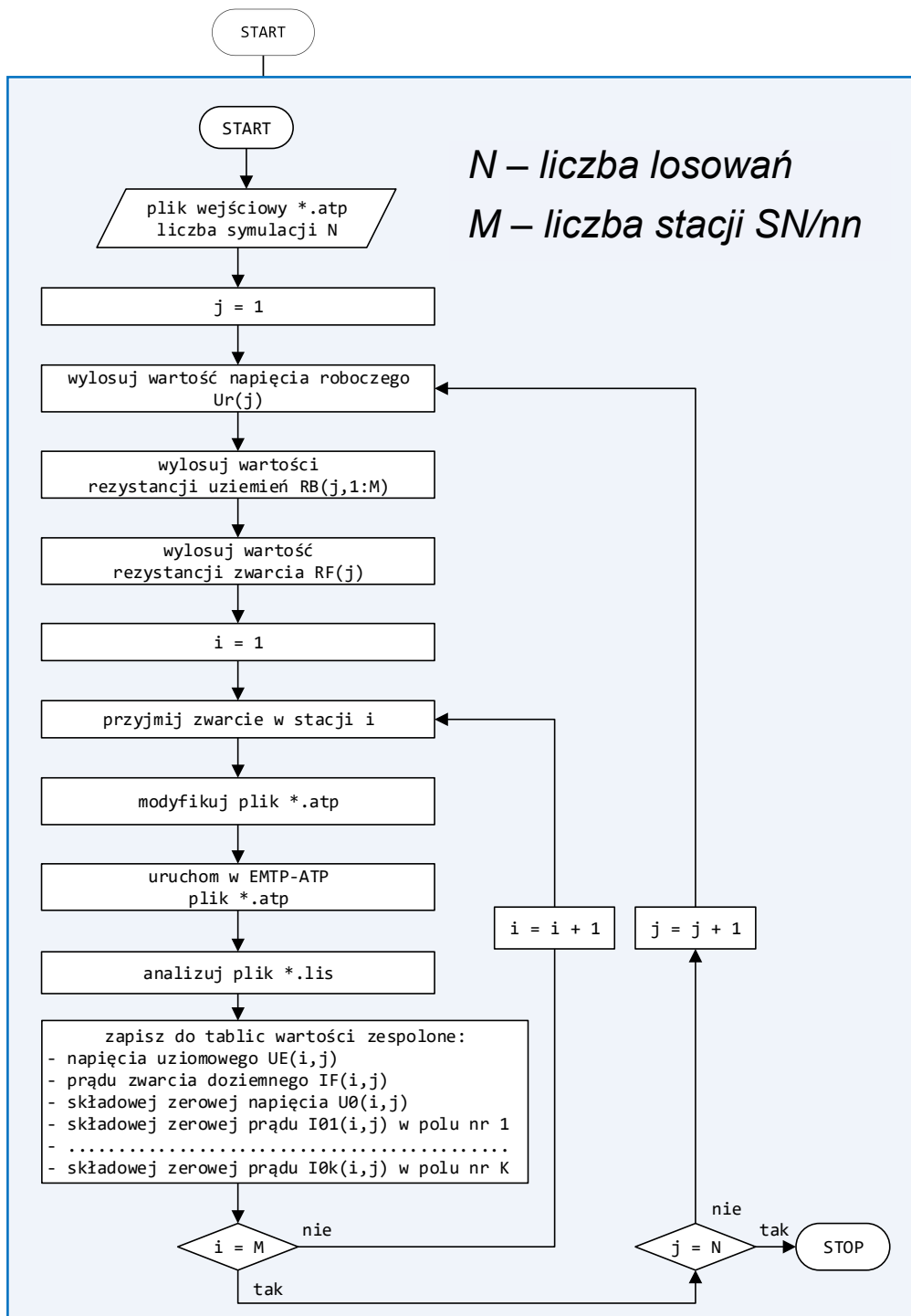
$$\underline{U}_0(i, j), \quad i = 1, \dots, M \quad j = 1, \dots, N$$

— składowych symetrycznych kolejności zerowej prądów w K polach rozdzielni SN stacji zasilającej WN/SN:

$$\underline{I}_{0k}(i, j), \quad i = 1, \dots, M \quad j = 1, \dots, N \quad k = 1, \dots, K$$

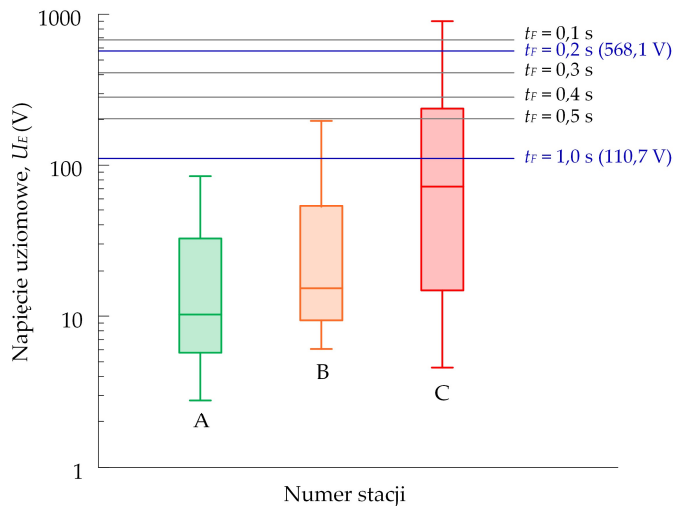
Otrzymane próby poddaje się dalszej analizie statystycznej, której celem jest:

- wyznaczenie prawdopodobieństw przekroczenia dopuszczalnych napięć uziomowych stanowiących podstawę oceny zagrożenia porażeniowego w stacjach SN/mn;
- statystyczny dobór nastaw zabezpieczeń ziemnozwarciowych.



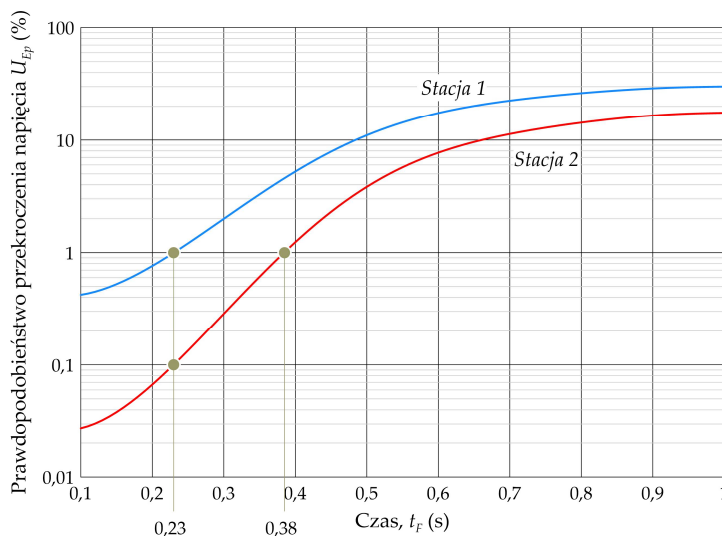
Rys. 8. Algorytm skryptu w programie MATLAB sterującego procesem symulacji i analizy wyników

Pierwszym krokiem proponowanej metody oceny zagrożenia porażeniowego w stacjach SN/nn jest sporządzenie statystyk opisowych napięć uziomowych U_E w postaci M wykresów pudełkowych napięć uziomowych U_E dla poszczególnych stacji SN/nn. Wykresy te są następnie klasyfikowane do trzech grup A, B, C (rys. 9), a podstawą tej klasyfikacji jest położenie danego wykresu na tle dopuszczalnych poziomów napięć U_{Ep} , które zależne są od czasów t_F trwania zwarcia.



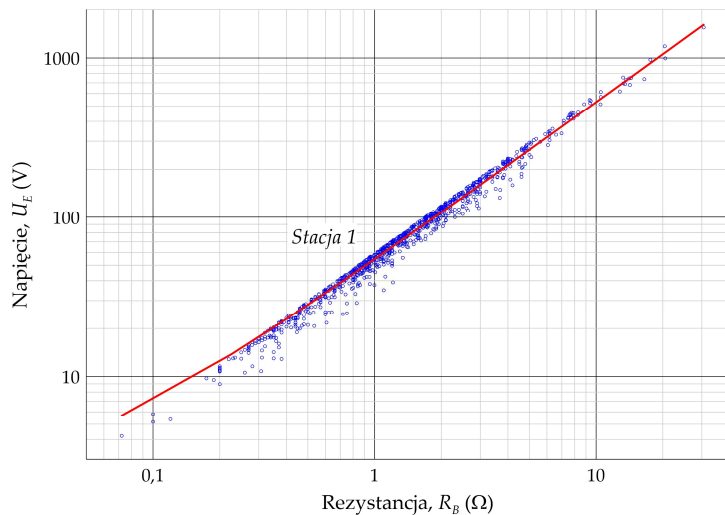
Rys. 9. Typy wykresów pudełkowych napięć uziomowych w stacjach SN/nn z zaznaczonymi poziomami napięć dopuszczalnych $U_{Ep} = f(t_F)$

Dla stacji z grupy A bezpieczeństwo porażeniowe zapewnione jest dla czasów trwania zwarcia krótszych od 1 s, niezależnie od wartości rezystancji uziemień tych stacji. Dla stacji z grupy B możliwe jest zapewnienie bezpieczeństwa porażeniowego dla czasów trwania zwarcia $0,2 \text{ s} \leq t_F \leq 1 \text{ s}$, niezależnie od wartości rezystancji uziemień tych stacji. Dla stacji z grupy C konieczna jest dalsza analiza statystyczna w celu określenia ryzyka zagrożenia porażeniowego od czasu wyłączenia zwarcia. W stacjach tych wyznacza się zależność prawdopodobieństwa przekroczenia dopuszczalnych napięć uziomowych U_{Ep} od czasu trwania zwarcia t_F (rys. 10).



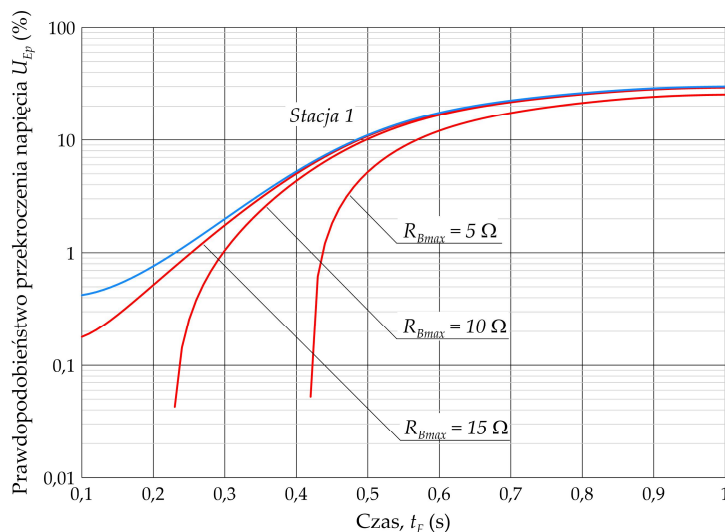
Rys. 10. Przykładowe zależności prawdopodobieństwa przekroczenia dopuszczalnych napięć uziomowych U_{Ep} od czasu trwania zwarcia t_F

Rysunek 10 stanowi podstawę określenia najdłuższych czasów zadziałania zabezpieczeń ziemnozwarciowych. Przykładowo: niezależnie od wartości rezystancji uziemienia R_B , prawdopodobieństwo przekroczenia napięcia U_{Ep} na poziomie 1% będzie spełnione w stacji nr 1 dla czasów $t_F < 0,23 \text{ s}$, a w stacji nr 2 dla czasów $t_F < 0,38 \text{ s}$. Natomiast jeżeli założyć największą wartość prawdopodobieństwa na poziomie 0,1%, to w stacji nr 1 nie jest możliwe spełnienie tego warunku poprzez skrócenie czasu t_F . Dla tego przypadku, w stacji nr 1 wymagane jest ograniczenie rezystancji uziemienia R_B do wartości R_{Bmax} i wynikające stąd ucięcie rozkładu. W tym celu wyznacza się korelację zmiennych losowych U_E i R_B (rys. 11).



Rys. 11. Przykładowa korelacja zmiennych losowych U_E i R_B w stacji SN/nn

Z funkcji korelacji wynika, że na przykład dla założonej wartości rezystancji $R_{Bmax} = 5 \Omega$ wartość napięcia ucięcia dystrybuanty wynosi $u_{E0} = 265,4 \text{ V}$. Następnie wyznacza się zależności prawdopodobieństwa przekroczenia dopuszczalnych napięć uziomowych U_{Ep} od czasu t_F trwania zwarcia przy ograniczeniu rezystancji R_B do założonej wartości maksymalnej R_{Bmax} (rys. 12). Krzywe te stanowią podstawę określenia najdłuższych czasów zadziałania zabezpieczeń ziemnozwarciowych w stacji 1, przy ograniczeniu największej wartości rezystancji R_B . Przykładowo: jeżeli założyć największą wartość prawdopodobieństwa przekroczenia napięcia U_{Ep} na poziomie 0,1%, to w stacji 1 warunek ten może zostać spełniony dla czasów trwania zwarcia $t_F < 0,42 \text{ s}$ dla $R_{Bmax} = 5 \Omega$ albo $t_F < 0,24 \text{ s}$ dla $R_{Bmax} = 10 \Omega$.



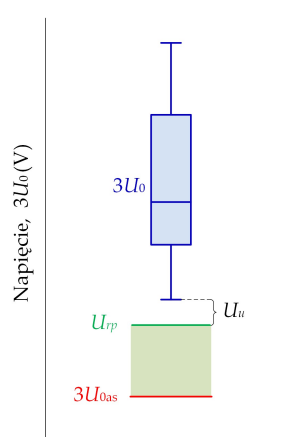
Rys. 12. Zależności prawdopodobieństwa przekroczenia dopuszczalnych napięć uziomowych U_{Ep} od czasu t_F trwania zwarcia przy ograniczeniu rezystancji R_B do wartości maksymalnej R_{Bmax} równej odpowiednio 5Ω , 10Ω i 15Ω

Przedstawiona powyżej nowatorska statystyczna metoda oceny zagrożenia porażeniowego w stacjach SN/nn pozwala określić ryzyko przekroczenia dopuszczalnych napięć uziomowych podczas zwarc doziemnych w stacjach SN/nn. Może być również podstawą doboru nastaw czasowych zabezpieczeń ziemnozwarciowych w sieciach o dowolnym sposobie pracy punktu neutralnego.

Statystyczna metoda doboru nastaw zabezpieczeń ziemnozwarciowych opiera się na otrzymanych w drodze symulacji rozkładach statystycznych wielkości kryterialnych

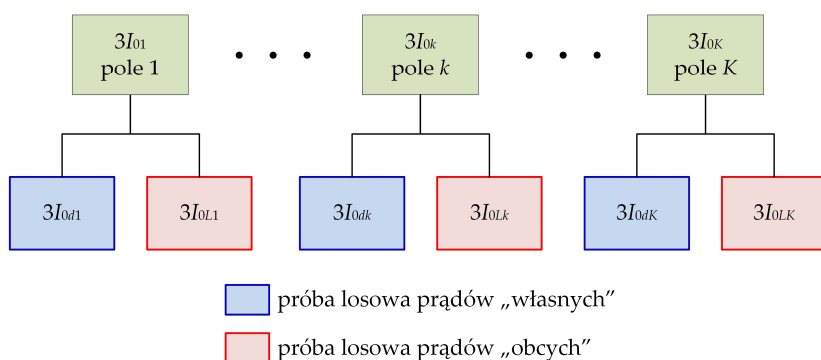
wykorzystywanych przez poszczególne zabezpieczenia. Wykorzystywanie rozkładów statystycznych pozwala na rezygnację z arbitralnie przyjętych współczynników bezpieczeństwa i czułości, których celem jest uwzględnienie niepewności określenia wartości wielkości kryterialnej w metodzie deterministycznej.

W przypadku zabezpieczeń zerowonapięciowych rozpatruje się rozkład wielkości $3U_0$ (rys. 13), która jest wielkością charakterystyczną dla całej rozdzielni SN. Jako nastawę U_{rp} proponuje się przyjąć wartość minimalną z próby $3U_0$ pomniejszoną o uchyb U_u filtru składowej zerowej napięcia. Pozwala to lepiej oszacować minimalną wartość U_{rp} , która w metodzie deterministycznej była często zaniżana w celu zapewnienia odpowiedniej czułości. W efekcie istniało większe prawdopodobieństwo zaszłań zbędnych w wyniku napięcia $3U_{0as}$ związanego z asymetrią sieci.



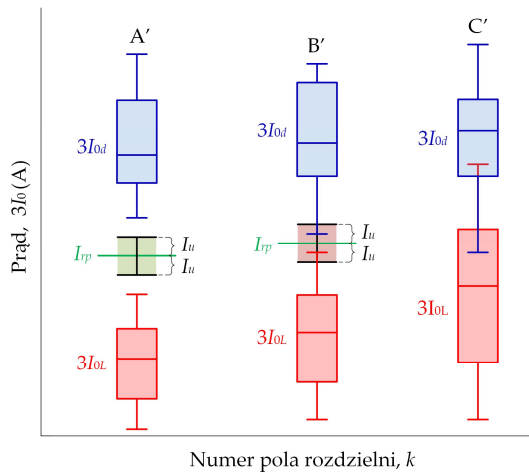
Rys. 13 Zasada doboru napięcia rozruchowego U_{rp} zabezpieczenia zerowonapięciowego

Zabezpieczenia zerowoprądowe wykorzystują potrójną składową symetryczną kolejności zerowej prądu, która jest wielkością charakterystyczną dla danego pola rozdzielni SN. W drodze symulacji otrzymuje się K prób losowych prądów $3I_0$. Każdą z tych prób należy podzielić na dwie kategorie (rys. 14): próbę $3I_{0d}$ obejmującą prądy $3I_0$ płynące w analizowanym polu w przypadku doziemienia w nim oraz próbę $3I_{0L}$ obejmującą prądy $3I_0$ płynące w analizowanym polu podczas doziemienia w innych polach rozdzielni SN.



Rys. 14. Podział próby losowej prądów zerowych $3I_{0k}$ na kategorie $3I_{0dk}$ i $3I_{0Lk}$

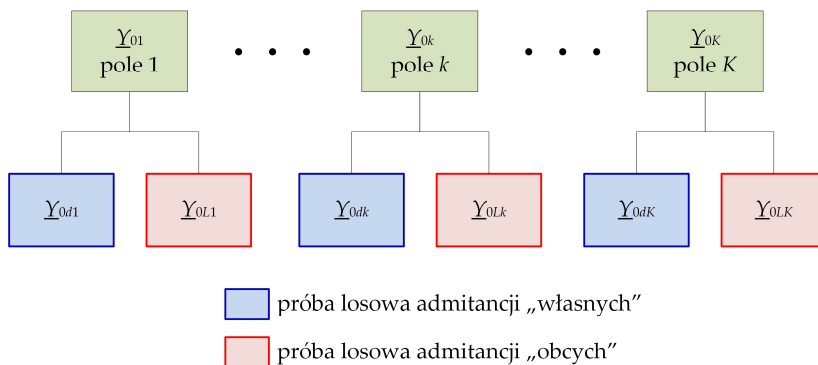
Sporządza się $2K$ wykresów pudełkowych potrójonych wartości prądów $3I_{0dk}$ i $3I_{0Lk}$ dla poszczególnych pól rozdzielni SN. Wykresy te są następnie klasyfikowane do trzech grup A', B', C' (rysunek 15), a podstawą tej klasyfikacji jest wzajemne położenie wartości maksymalnej z próby $3I_{0L}$ oraz minimalnej z próby $3I_{0d}$.



Rys. 15. Zasada klasyfikacji pól rozdzielni SN do grup A', B' i C' oraz doboru prądów rozruchowych I_{rp} zabezpieczeń zerowoprądowych

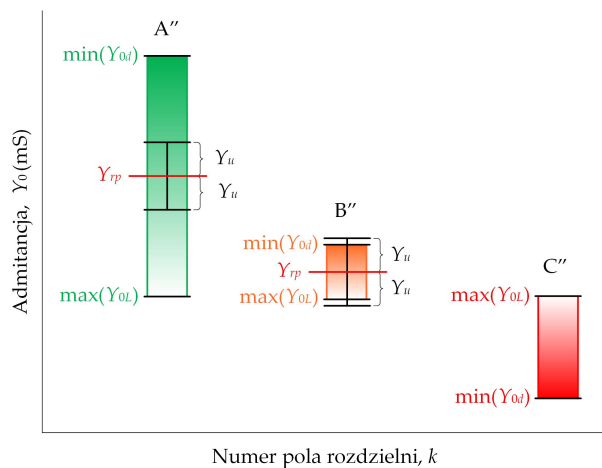
Do grupy A' zaliczane są pola, w których różnice najmniejszych wartości prób losowych prądów $3I_{0d}$ i największych wartości prób losowych prądów $3I_{0L}$ są większe od podwojonej wartości uchybu filtry składowej zerowej prądu $2I_u$. Dla pól z grupy A' możliwe jest zapewnienie selektywności działania zabezpieczeń zerowoprądowych bezkierunkowych. Jako nastawę I_{rp} proponuje się średnią arytmetyczną minimalnej wartości $3I_{0d}$ i maksymalnej $3I_{0L}$. Do grupy B' zaliczane są pola, w których najmniejsze wartości prób losowych prądów $3I_{0d}$ są większe od największych wartości prób losowych prądów $3I_{0L}$. Ponadto różnice tych wartości są mniejsze bądź równe $2I_u$. Do grupy C' zaliczane są pola, w których najmniejsze wartości prób losowych prądów $3I_{0d}$ są mniejsze bądź równe od największych wartości prób losowych prądów $3I_{0L}$. Dla pól z grup B' i C' konieczne jest zastosowanie zabezpieczenia reagującego na kierunek przepływu prądu zwarciovego.

Admitancje zerowe \underline{Y}_0 , podobnie jak prądy $3I_0$ są wielkościami charakterystycznymi dla pola rozdzielni SN. W związku z tym analogicznie jak w przypadku prądów zerowych dokonuje się podziału prób admitancji dla poszczególnych pól na kategorie \underline{Y}_{0d} i \underline{Y}_{0L} (rys. 16).



Rys. 16. Podział próby losowej admitancji zerowych \underline{Y}_{0k} na kategorie \underline{Y}_{0dk} i \underline{Y}_{0Lk}

Pierwszym krokiem analizy admitancji jest odpowiednia ilustracja graficzna elementów prób. Ze względu na relatywnie niewielki rozrzut wartości wielkości kryterialnych w obrębie próby wybrano do tego celu wykres kolumnowy pływający. Przedstawia on zakres wartości wielkości kryterialnej pomiędzy wartością maksymalną Y_{0L} a wartością minimalną Y_{0d} (rys. 17). Wykresy te są następnie klasyfikowane do trzech grup A'', B'', C'' (rys. 17), a podstawą tej klasyfikacji jest wzajemne położenie wartości maksymalnej z próby Y_{0L} oraz minimalnej z próby Y_{0d} .



Rys. 17. Zasada klasyfikacji pól rozdzielni SN do grup A'', B'' i C'' oraz doboru admitancji rozruchowych Y_{rp} zabezpieczeń admitancyjnych

W przypadku zabezpieczeń admitancyjnych do grupy A'' zaliczane są pola, w których różnice najmniejszych wartości prób losowych modułów admitancji Y_{0d} oraz największych wartości prób losowych modułów admitancji Y_{0L} są większe od podwojonej wartości admitancji uchybowej $2Y_u$. Dla tych pól możliwe jest zapewnienie selektywności działania zabezpieczeń admitancyjnych. Jako nastawę Y_{rp} proponuje się średnią arytmetyczną minimalnej wartości Y_{0d} i maksymalnej Y_{0L} . Do grupy B'' zaliczane są pola, w których najmniejsze wartości prób losowych modułów admitancji Y_{0d} są większe od największych wartości prób losowych modułów admitancji Y_{0L} . Ponadto różnice tych wartości są mniejsze bądź równe $2Y_u$. Do grupy C'' zaliczane są pola, w których najmniejsze wartości prób losowych modułów admitancji Y_{0d} są mniejsze od największych wartości prób losowych modułów admitancji Y_{0L} . Dla pól z grupy B'' i C'' konieczne jest zastosowanie zabezpieczenia reagującego na kierunek przepływu prądu zwarciovego.

Podobne rozumowanie przeprowadza się dla zabezpieczeń konduktancyjnych (G0) i susceptancyjnych (B0).

Przedstawiona w niniejszym podrozdziale nowatorska statystyczna metoda doboru nastaw zabezpieczeń ziemnozwarciowych, pozwala wyznaczyć nastawy zabezpieczeń ziemnozwarciowych wykorzystujących różne kryteria, bez konieczności przyjmowania *a priori* wartości współczynników bezpieczeństwa k_b i czułości k_c .

Zaproponowane metody statystyczne badań i oceny zagrożenia porażeniowego oraz doboru nastaw zabezpieczeń ziemnozwarciowych, zastosowano dla rzeczywistej sieci kablowo-napowietrznej 15 kV, której schemat przedstawiono na rysunku 18. Przeanalizowano osiem wariantów sposobów pracy punktu neutralnego:

PNI – sieć z izolowanym punktem neutralnym;

RN – 100 A – sieć z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor o prądzie znamionowym 100 A ($R_N = 86,6 \Omega$);

RN – 200 A – sieć z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor o prądzie znamionowym 200 A ($R_N = 43,3 \Omega$);

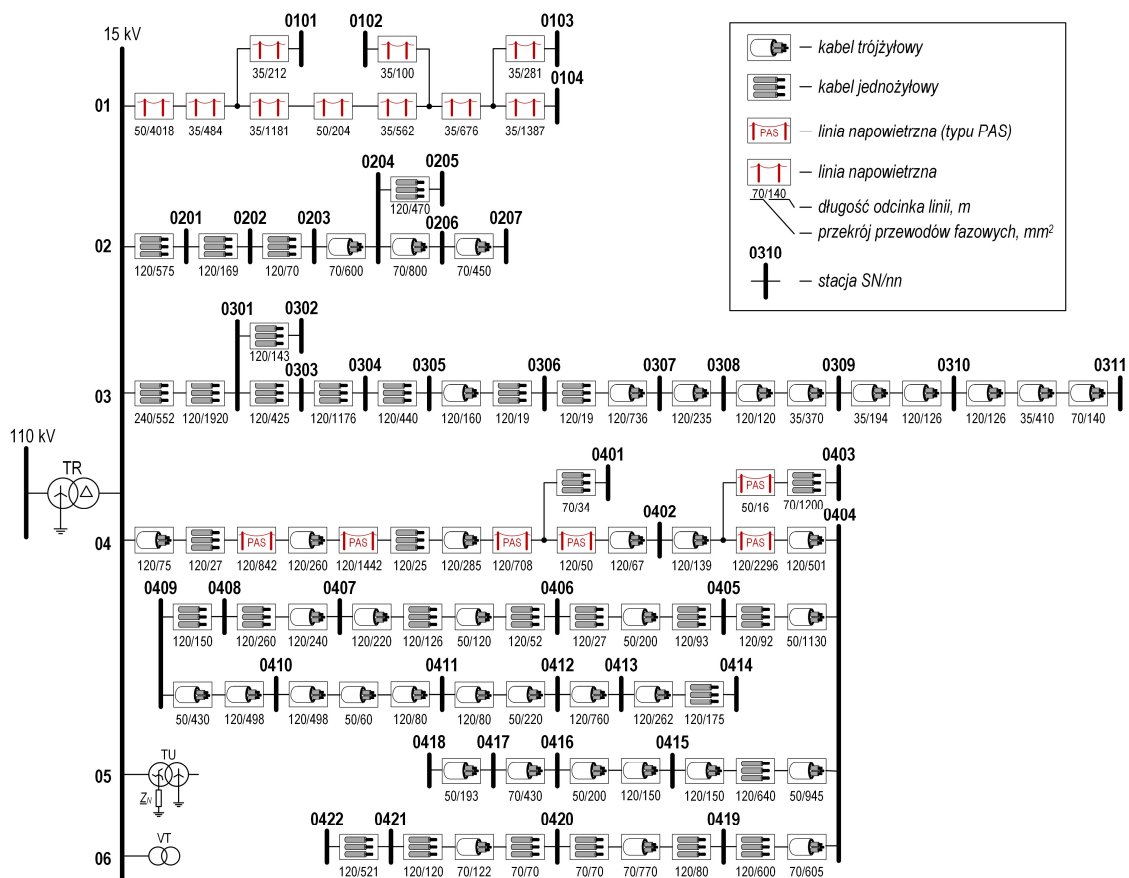
RN – 300 A – sieć z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor o prądzie znamionowym 300 A ($R_N = 28,9 \Omega$);

RN – 400 A – sieć z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor o prądzie znamionowym 400 A ($R_N = 21,7 \Omega$);

RN – 500 A – sieć z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor o prądzie znamionowym 500 A ($R_N = 17,3 \Omega$);

Rw – 25 A – sieć skompensowana o stopniu rozkompensowania $\xi = 0,1$ z wymuszeniem składowej czynnej prądu o wartości 25 A;

Rw – 100 A – sieć skompensowana o stopniu rozkompensowania $\xi = 0,1$ z wymuszeniem składowej czynnej prądu o wartości 100 A.



Rys. 18. Schemat analizowanej sieci kablowo-napowietrznej 15 kV

TR – transformator zasilający sieć średniego napięcia (SN); VT – układ pomiaru składowej zerowej napięcia $3U_0$; TU – transformator uziemiający; Z_N – impedancja uziemienia punktu neutralnego (PN)

Dla analizowanej sieci opracowano w EMTP-ATP model i dla każdego z ośmiu wariantów połączenia punktu neutralnego z ziemią wykonano po 1000 losowych symulacji jednofazowych zwarć doziemnych w każdej z 44 stacji SN/nn. Następnie do otrzymanych wyników zastosowano opracowane metody statystyczne oceny zagrożenia porażeniowego i doboru nastaw zabezpieczeń ziemnozwarciowych.

Analiza sieci z izolowanym punktem neutralnym (wariant PNI) wykazała, że już w tym przypadku występują stacje, w których przekroczone są wartości dopuszczalnych napięć uziomowych. W stacjach zasilanych z pola 01 konieczne jest ograniczenie wartości rezystancji uziemienia stacji (grupa C). Z kolei w trzech pierwszych stacjach zasilanych z pola 04,

konieczne jest skrócenie czasu działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych w tym polu. Zagrożenie we wskazanych stacjach wynika ze struktury sieci. Stacje 0101÷0104 są zasilane z linii napowietrznej. Z kolei w polu 04 występuje linia kablowo-napowietrzna. Jednak ze względu na występowanie rozdzielni sieciowej (stacja 0404) wyposażonej w uziom lokalny, tylko stacje 0401÷0403 nie mają ciągłej metalicznej drogi ziemnopowrotnej.

Przy zmianie pracy punktu neutralnego sieci na uziemienie przez rezystor zaobserwowano wzrost zagrożenia porażeniowego wraz ze wzrostem prądu znamionowego rezystora uziemiającego. Przejawia się to zwiększeniem liczby stacji, dla których konieczne jest ograniczenie czasu trwania zwarcia doziemnego lub rezystancji uziemienia stacji. Stosunkowo najłagodniejsze warunki dotyczą przypadku sieci kompensowanej z AWSZ 25A, jednak i w tym przypadku dla sześciu stacji obowiązują określone wymagania.

Podsumowując, zaproponowana metoda pozwala wytypować stacje, w których występuje zagrożenie porażeniowe mierzone prawdopodobieństwem przekroczenia przez napięcia uziomowe wartości dopuszczalnych. Umożliwia dobór czasu działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych w poszczególnych polach oraz wskazanie najwyżej kilku stacji, w których należy ograniczyć wartość rezystancji uziemienia stacji poniżej określonej wartości. W tabeli 2 zestawiono dla każdego wariantu pracy punktu neutralnego analizowanej sieci SN wymagania stawiane czasom działania zabezpieczeń w poszczególnych polach tak, aby prawdopodobieństwo przekroczenia wartości dopuszczalnych napięć uziomowych nie przekroczyło 0,1%. Należy zwrócić uwagę, że w najbardziej niekorzystnym wariantcie rezystancję należy ograniczyć najwyżej w siedmiu stacjach i to w najgorszym przypadku poniżej 4 Ω .

Tab. 2. Wartości nastaw czasowych zabezpieczeń ziemnozwarciowych i maksymalnych wartości R_B dla prawdopodobieństwa przekroczenia przez napięcie uziomowe U_E wartości dopuszczalnego napięcia U_{Ep} na poziomie 0,1%

Wariant	Maksymalna nastawa czasowa zabezpieczeń (s)				Rezystancja R_{Bmax} (Ω)						
	P01	P02	P03	P04	0101	0102	0103	0104	0401	0402	0403
PNI	0,20	1,00	1,00	0,20	10	10	10	10	–	–	–
RN-100A	0,35	1,00	1,00	0,30	5	5	5	5	10	–	–
RN-200A	0,25	0,50	0,55	0,25	5	5	5	5	10	–	10
RN-300A	0,20	0,45	0,45	0,20	5	5	5	5	10	10	10
RN-400A	0,20	0,35	0,35	0,30	4	5	5	5	5	5	5
RN-500A	0,20	0,30	0,30	0,20	4	5	4	5	5	5	5
Rw-25A	0,25	1,00	1,00	0,45	–	–	–	–	–	–	–
Rw-100A	0,20	1,00	1,00	0,35	10	10	10	10	10	–	–

Zaproponowana metoda pozwala także określić na gruncie statystycznym sygnały dla ziemnozwarciowej automatyki zabezpieczeniowej (U_0 i I_0), stanowiące podstawę określenia nastaw zabezpieczeń zerowonapięciowych, zerowoprądowych, admitancyjnych, kondukcyjnych i susceptancyjnych w przypadku gdy dane zabezpieczenie może być zastosowane.

W tabeli 3 dla każdego rozważanego wariantu pracy punktu neutralnego sieci SN przedstawiono proponowaną nastawę zabezpieczenia zerowonapięciowego oraz oznaczenie możliwości zastosowania określonego typu zabezpieczenia ziemnozwarciowego wg przyjętej konwencji:

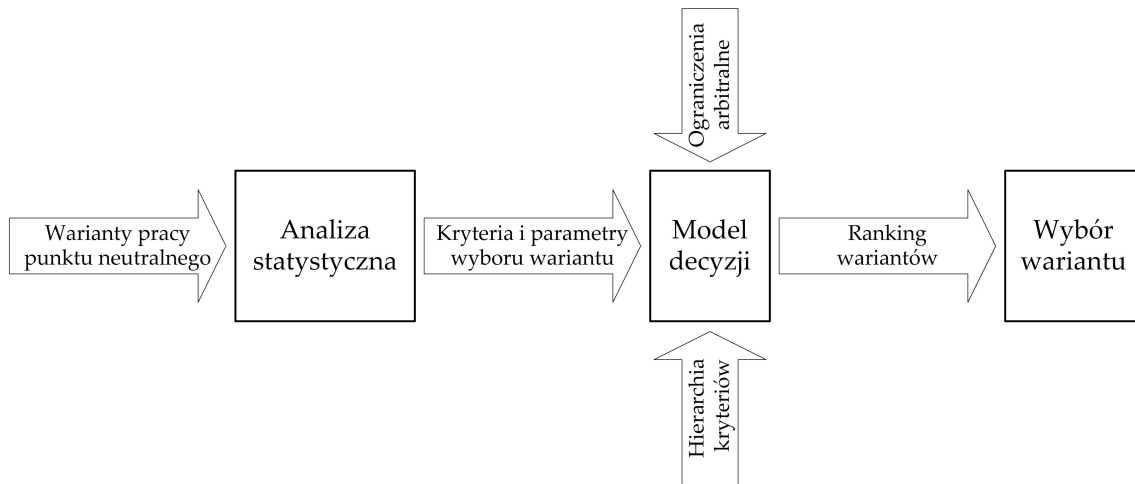
- 0 – brak możliwości zastosowania danego zabezpieczenia;
- 1 – brak możliwości zastosowania danego zabezpieczenia przynajmniej dla jednego pola;
- 2 – możliwość zastosowania danego zabezpieczenia dla każdego pola, ale przynajmniej dla jednego z nich wymagany jest człon kierunkowy;
- 3 – możliwość zastosowania danego zabezpieczenia dla każdego pola.

Tab. 3. Możliwość zastosowania różnych zabezpieczeń ziemnozwarciowych dla poszczególnych wariantów połączenia punktu neutralnego sieci z ziemią

Wariant pracy punktu neutralnego	Nastawa zabezpieczenia $U_{0>}$	Możliwość zastosowania zabezpieczenia				
		$I_{0>}$	$Y_{0>}$	$G_{0>}$	$B_{0>}$	$R_{YY0>}$
PNI	53 V	2	2	0	2	0
RN – 100 A	21 V	2	3	3	2	0
RN – 200 A	14 V	2	3	3	1	0
RN – 300 A	9 V	2	3	3	0	0
RN – 400 A	6 V	2	3	3	0	0
RN – 500 A	5 V	2	3	3	0	0
Rw – 25 A	54 V	2	3	3	1	3
Rw – 100 A	27 V	2	3	3	1	3

Przeprowadzona analiza rzeczywistej sieci 15 kV wykazała, że każdy z rozważanych sposobów pracy punktu neutralnego, może mieć zastosowanie, jeśli zostaną spełnione określone wymagania. Należy jednocześnie podkreślić, że sformułowanie jednoznacznej rekomendacji odnośnie wyboru reżimu pracy punktu neutralnego nie jest możliwe. Z drugiej jednak strony przeprowadzona analiza statystyczna pozwala na wyznaczenie *a posteriori* pewnych kryteriów i parametrów tego wyboru, będącymi obiektywnymi i wymiernymi wskaźnikami, na których może być oparta decyzja.

Dokonując wyboru wariantu pracy punktu neutralnego sieci SN, można również nałożyć pewne arbitralne ograniczenia na przyjmowane parametry i wyznaczone wartości kryterialne. Przyjmowane ograniczenia pozwalają na wyodrębnienie i stworzenie rankingu wariantów dopuszczalnych, pozwalającego na wybór wariantu optymalnego przy ustalonej hierarchii kryteriów i parametrów wyboru. Schemat procesu podejmowania decyzji przedstawiono na rysunku 19.



Rys. 19. Schemat procesu podejmowania decyzji o wyborze wariantu pracy punktu neutralnego sieci

Podsumowując można stwierdzić, że przeniesienie analizy kryteriów wyboru sposobu połączenia z ziemią punktu neutralnego na grunt statystyczny, stanowi istotną zmianę jakościową w stosunku do analiz wykonywanych deterministycznie. Opracowane i przedstawione w dysertacji metody statystyczne dotyczą analizy dwóch kryteriów: poziomu zagrożenia porażeniowego przy zwarciach doziemnych oraz skuteczności działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych. Metody te umożliwiają nie tylko oszacowanie ryzyka przekroczenia przez odpowiednie napięcia i prądy ustalonych wartości, ale również określenie warunków jakie należy w danej sieci spełnić, aby to ryzyko nie przekroczyło przyjętej akceptowalnej wartości.

Za oryginalny dorobek autora należy uznać opracowanie modeli statystycznych parametrów sieci, w szczególności opracowanego na podstawie rzeczywistych pomiarów modelu statystycznego rezystancji uziemień stacji SN/nn, a także wykorzystanie tych modeli w zaproponowanych metodach oceny zagrożenia porażeniowego i doborze parametrów układów elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej. Na podkreślenie zasługuje fakt, że efekty przeprowadzonych badań i analiz, pozwalają na formułowanie wniosków o istotnym znaczeniu praktycznym.