

## Piotr Piechocki

Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A.  
ul. Marcelesińska 71, 60-354 Poznań  
e-mail: piotr.piechocki@pse.pl

## Ryszard Frackowiak

Instytut Elektroenergetyki  
Politechnika Poznańska  
Pl. Skłodowskiej – Curie 5, 60-965 Poznań, Poland  
e-mail: ryszard.frackowiak@put.poznan.pl

### Wartości czasu trwania zwarcia a ocena skutków dynamicznych w rozdzielniach z przewodami giętkimi

**Słowa kluczowe:** skutki dynamiczne, czas trwania zwarcia, rozdzielnie najwyższych napięć, symulacja

**Streszczenie:** Artykuł dotyczy zagadnienia określania wartości czasu trwania zwarcia podczas obliczania skutków dynamicznych w rozdzielniach najwyższych napięć z przewodami giętkimi metodą statystyczno-probabilistyczną. Do realizacji zadania opracowano model symulacyjny, którego ważnym elementem jest model czasu trwania zwarcia. Wyniki badań symulacyjnych pozwoliły na przeprowadzenie probabilistycznej analizy wartości czasu trwania zwarcia, prądu zwarciovego oraz sił dynamicznych dla wybranych punktów rozdzielni. W obliczeniach uwzględniono zwarcia na szynach i w polach rozdzielni, transformatorach oraz liniach elektroenergetycznych. Przedstawiono metodę określania wartości czasu trwania zwarcia dla potrzeb obliczeń dynamicznych sił w rozdzielniach elektroenergetycznych opartą na kryterium ryzyka.

## 1. Wprowadzenie

Podjęcie różnego rodzaju decyzji związanych z eksploatacją systemu elektroenergetycznego wiąże się z koniecznością przeprowadzania wielu analiz. Przyjmowane dane i założenia oraz tworzone modele wprowadzają różnego rodzaju źródła niepewności [2]. Decyzje podejmowane na podstawie zdeterminowanych wielkości nie dają wyobrażenia o niebezpieczeństwie popełnienia zbyt dużego błędu; czy przyjęte kryteria dają rozwiązania zbyt pewne lub mało pewne w stosunku do poniesionych kosztów. Problem taki pojawia się, gdy w eksploatowanej rozdzielni elektroenergetycznej rośnie moc zwarciovą i należy urządzenia dostosować do pracy przy większych wartościach prądu zwarciovego. Jednym z istotnych skutków przepływu prądu zwarciovego przez przewody szynowe są siły dynamiczne działające na konstrukcje wsporcze. Zagadnienie obliczania skutków dynamicznych w rozdzielniach z szynami giętkimi było analizowane w pracach autorów polskich i zagranicznych [1, 11, 12, 14, 15, 18, 19].

Ocena dynamicznych skutków przepływu prądu zwarciovego podczas opracowywania projektu modernizacji rozdzielni wymaga właściwego określenia warunków zwarciovych. Do warunków tych należy wartość prądu zwarciovego oraz wielkości charakteryzujące jego przebieg. Istotny wpływ na wartość obliczanych sił dynamicznych w rozdzielniach ma przyjęta wartość czasu trwania zwarcia  $T_k$  [16]. Przyjęcie do obliczeń zbyt dużej lub za małej wartości

czasu trwania zwarcia może prowadzić do strat ekonomicznych spowodowanych niewłaściwą decyzją, skutkującą przewymiarowaniem urządzeń lub ich uszkodzeniem a nawet zniszczeniem. Przykładowo w zakresie konstrukcji wsporczych można pozostawić te konstrukcje bez żadnych zmian, zaproponować ich wzmocnienie lub zdecydować o przebudowie całej rozdzielni. Zagadnienie jest ściśle związane z zagadnieniem niezawodności rozdzielni elektroenergetycznej. Nieliczne prace poświęcone statystycznym badaniom czasu trwania zwarcia w sieciach wysokiego napięcia dają pewien pogląd na charakter rozkładu tej wielkości. Jednak stosunkowo niewielka liczebność dostępnych próbek sprawia, że wiarygodność otrzymanych rozkładów tej zmiennej losowej jest niewielka i nie daje możliwości oceny wartości czasu trwania zwarcia  $T_k$  na podstawie prawdopodobieństwa ich występowania. Pewną pomoc w doborze wartości czasu trwania zwarcia do wyznaczania zagrożeń spowodowanych zakłóceniami zwarciovymi mogą stanowić badania probabilistyczne. Wykorzystanie probabilistycznego podejścia do doboru urządzeń elektroenergetycznych było przedmiotem badań licznych opracowań na świecie [4, 10, 20] i w Polsce [3, 6, 17]. W dostępnej literaturze nie spotyka się prac poświęconych kryteriom wyboru wartości czasu trwania zwarcia podczas obliczenia skutków dynamicznych w rozdzielniach z przewodami giętkimi.

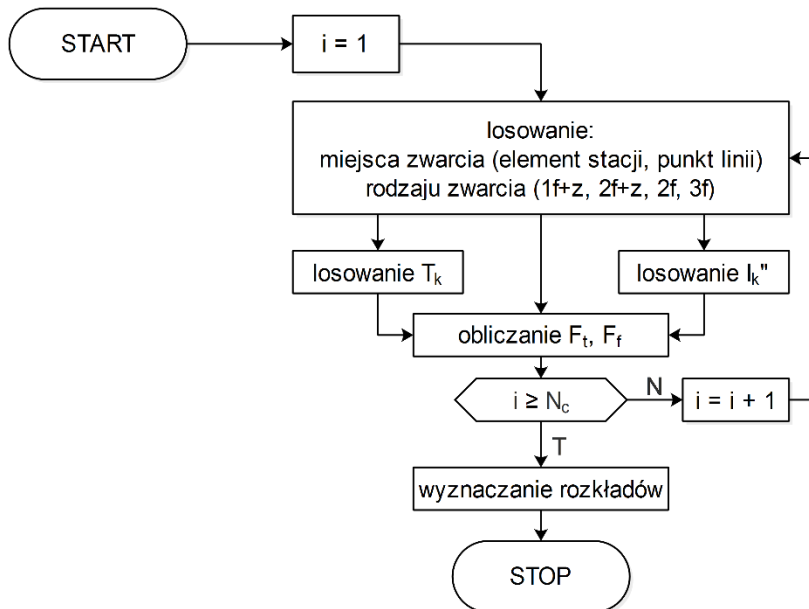
W artykule przedstawiono wykorzystanie metody symulacji Monte Carlo do analizy wartości czasu trwania zwarcia w sieciach najwyższych napięć z punktu widzenia skutków dynamicznych w rozdzielni z szynami giętkimi. Do realizacji zadania opracowano model symulacyjny, w którym uwzględniono możliwość symulacji zwarć na szynach i w polach rozdzielni, transformatorach oraz liniach elektroenergetycznych. Badania symulacyjne pozwoliły na przeprowadzenie probabilistycznej analizy wartości czasu trwania zwarcia, prądu zwarciovego oraz sił dynamicznych dla wybranych punktów rozdzielni. Do określania wartości czasu trwania zwarcia dla potrzeb analizy sił dynamicznych zaproponowano metodę opartą na kryterium ryzyka – spodziewanej rocznej częstości przekroczeń wyznaczonej siły. Przykładową analizę wykonano dla rozdzielni 220 kV i dla kilku wybranych konfiguracji elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej EAZ.

## 2. Model symulacyjny do analizy skutków dynamicznych

Jedną z metod obliczania wartości sił dynamicznych jest metoda zawarta w normie PN-EN 60865-1 [16]. Uwzględnia ona oprócz siły wynikającej z oddziaływania przewodów sąsiednich faz na siebie  $F_t$  i siły związanej z opadaniem przewodów po wyłączeniu zwarcia  $F_f$ , również siłę spowodowaną oddziaływaniem dynamicznym przewodów w obrębie wiązki przewodów  $F_{pi}$ . Obliczanie skutków dynamicznych wymaga znajomości geometrii przęsła, danych charakteryzujących przewód i konstrukcje wsporcze w przęsle oraz parametrów charakteryzujących zwarcie. Te ostatnie mają charakter losowy.

Można przyjąć, że czas trwania zwarcia nie ma wpływu na wartości siły  $F_{pi}$  [6]. Uwzględniając pomijalnie mały wpływ składowej nieokresowej na wartości sił wynikających z oddziaływania przewodów sąsiednich faz na siebie  $F_t$  i  $F_f$  [16], dla określonego przęsła, istotny wpływ na wartości tych sił posiada wartość składowej okresowej prądu zwarciovego w przewodach szynowych oraz czas jego przepływu.

Ogólny schemat wyznaczania rozkładów sił dynamicznych  $F_t$  i  $F_f$  w określonym przęsle rozdzielni metodą symulacji Monte Carlo pokazano na rys. 1. W obliczeniach uwzględnia się zwarcia występujące w samej rozdzielni oraz w jej otoczeniu.



Rys. 1. Schemat wyznaczania rozkładów sił dynamicznych

Podczas symulacji wyznacza się miejsce i rodzaj zwarcia i na tej podstawie oblicza się wartość prądu zwarciovego w przewodach szynowych oraz czas jego przepływu. Następnie dla określonego przęsła rozdzielni oblicza się wartości sił dynamicznych i po wykonaniu założonej liczby symulacji roczną częstość ich występowania. Program komputerowy pozwalający na realizację przedstawionych obliczeń został napisany w środowisku Delphi. Do jego budowy wykorzystano model symulacyjny do analizy prądów zwarciovych [6, 8], który został poszerzony o skorelowany z nim model czasu trwania zwarcia oraz moduł obliczeń skutków dynamicznych w rozdzielniach.

### 3. Model czasu trwania zwarcia

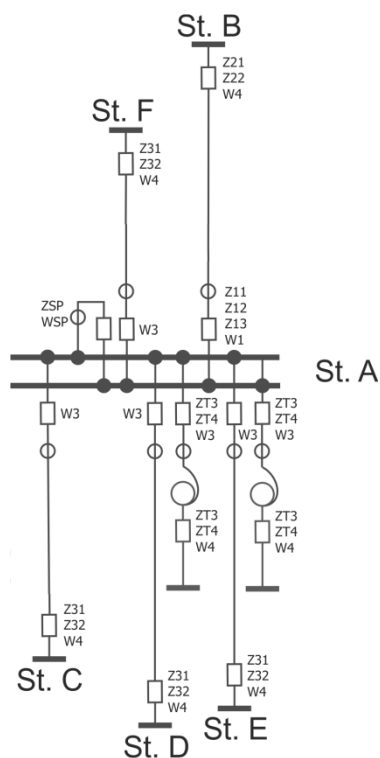
Podstawę do wyznaczania czasu trwania zwarcia podczas analizy skutków zwarciovych stanowi znajomość czasu działania układu EAZ i wyłączników likwidujących przepływ prądu zwarciovego przez urządzenia. Do wyznaczania wartości czasu trwania zwarcia posłużono się zależnością:

$$T_k = t_{zab} + t_{wyl} \quad (1)$$

gdzie:  $T_k$  - czas trwania zwarcia  
 $t_{zab}$  - czas zadziałania zabezpieczenia, mierzony od momentu powstania zwarcia do chwili pojawienia się impulsu "wyłącz" na wyjściu zabezpieczenia  
 $t_{wyl}$  - czas zadziałania wyłącznika, mierzony od chwili otrzymania impulsu „wyłącz” do chwili przerwania prądu zwarciovego

Ogólną zasadę wyznaczania wartości  $T_k$  na drodze symulacji Monte Carlo w postaci kolejnych etapów bliżej omówiono w pracy [9]. Szczegółowe wymagania dotyczące instalowanych zabezpieczeń w polach rozdzielni WN i NN i elementów automatyki elektroenergetycznej podaje Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej (IRiESP) [13].

Schemat fragmentu systemu zawierający przykładową rozdzielnię 220 kV przedstawiono na rys. 2. Zaznaczono zabezpieczenia Z oraz wyłączniki W.



Rys. 2. Schemat badanego fragmentu sieci 220 kV

W opracowanym modelu czasu trwania zwarcia wzięto pod uwagę elementy EAZ szyn rozdzielni, przyłączonych do nich linii oraz transformatorów elektroenergetycznych. Uwzględniono następujące wyposażenie w układy EAZ:

- pola linii wyposażone są w dwa zabezpieczenia odległościowe i zabezpieczenie nadprądowe ziemnozwarciowe, nie występuje zabezpieczenie odcinkowe,
- współbieżnienie zabezpieczeń odległościowych na poszczególnych liniach (na każdej linii z osobna można je załączyć),
- automatyka SPZ na liniach (dla każdej linii z osobna można ją załączyć),
- zabezpieczenie w polu łącznika szyn,
- zabezpieczenie szyn zbiorczych,
- układ lokalnej rezerwy wyłącznikowej (LRW),
- dwa zabezpieczenia różnicowe na każdym z transformatorów, zabezpieczenia odległościowe w polach transformatorów oraz zabezpieczenie ziemnozwarciowe.

Przykładowo w przypadku wystąpienia zakłócenia w linii AB uwzględniane jest działanie zabezpieczeń w badanej rozdzielni w polu linii AB (Z11, Z12, Z13), w polu na drugim końcu linii (Z21, Z22), na drugich końcach gałęzi liniowych przyłączonych do rozpatrywanej rozdzielni 220 kV (Z31, Z32 - w sąsiednich rozdzielniach), w polach transformatorów (ZT3 i ZT4) oraz po drugiej stronie transformatora (ZT3).

Nie zakładano awaryjności układu LRW, ale uwzględniano awaryjności wyłączników pobudzanych przez ten układ.

Zabezpieczenia ZT1 i ZT2 są to zabezpieczenia różnicowo-prądowe chroniące transformatory z najmniejszą możliwą zwłoką czasową. Z uwagi na zasadę działania jest to najszybsze zabezpieczenie zainstalowane w polu transformatora. Każdy transformator zainstalowany w sieci WN i NN jest chroniony przez co najmniej jedno takie zabezpieczenie. O tym czy transformator zostanie wyposażony w drugi taki komplet zabezpieczeń zależne jest od spełnienia wymagań zapisanych w IRIESP. Obszar chroniony przez zabezpieczenie

różnicowo-prądowe znajduje się między przekładnikami prądowymi zainstalowanymi w polu a przepustami transformatora drugiej strony napięcia. W przypadku zadziałania zabezpieczenia różnicowo-prądowego impuls wysyłany jest na wyłączniki transformatora z obu stron.

Zabezpieczenie ZT3 jest zabezpieczeniem odległościowym podobnym do tych zainstalowanych w polu liniowym. Jednak to zabezpieczenie posiada nieco inne nastawy. Zasięg I strefy to około 70% impedancji zabezpieczanego transformatora. W strefie tej zabezpieczenie działa bezzwłocznie. Strefa II obejmuje swym zasięgiem szyny zbiorcze po drugiej stronie transformatora, a nastawa czasowa wynosi 1 s. Zabezpieczenie to posiada strefę wsteczną sięgającą do około 60% impedancji najkrótszej linii przyłączonej do rozdzielni z nastawą czasową wnoszącą około 0,6 s. Ta strefa ma chronić przed zwarciami bliskimi w przypadkach niezadziałania zabezpieczeń polowych, zabezpieczenia szyn zbiorczych lub zabezpieczenia w polu sprzęgła, aby ograniczyć prąd zwarciovą płynący przez transformator.

W przypadku zadziałania zabezpieczenia ZT3 w strefie „do przodu” impuls wysyłany jest na oba wyłączniki transformatora. W przypadku zwarcia wykrywanego w strefie wstecznej impuls wysyłany jest tylko na wyłącznik w polu własnym.

Ponadto transformator jest chroniony jeszcze przez zabezpieczenie ziemnozwarciowe patrzące w stronę sieci, ZT4 (posiada dwie nastawy prądowe oraz odpowiadające im nastawy czasowe) oraz przez zabezpieczenie ziemnozwarciowe w punkcie gwiazdowym transformatora (posiadające również dwie nastawy prądowe). Nastawy czasowe tych zabezpieczeń posiadają duże wartości i nie są uwzględniane w algorytmie.

Szczegółowe zasięgi stref zabezpieczeń uwzględnianych w obliczeniach symulacyjnych opisano w pracy [8].

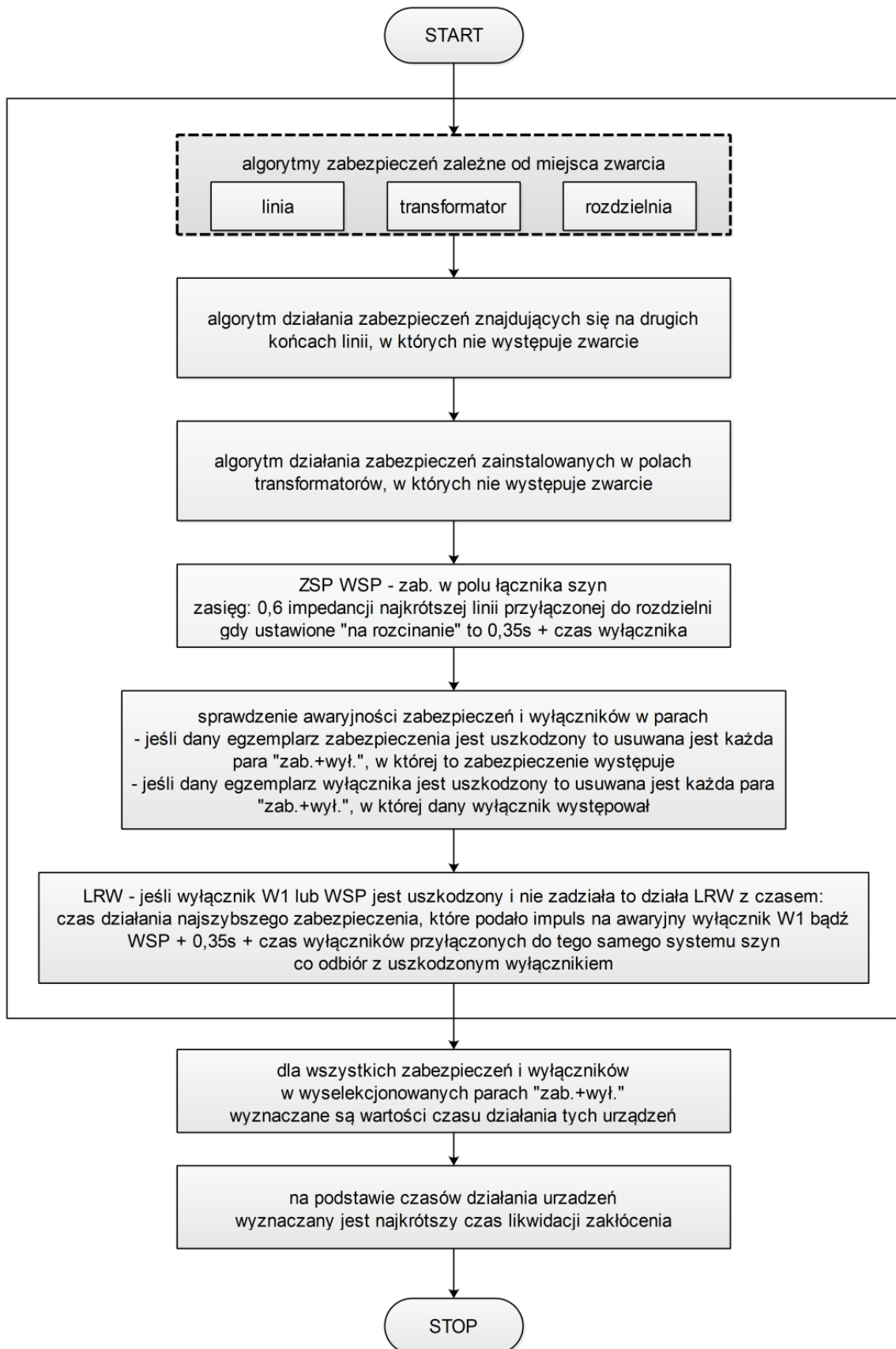
Ogólny algorytm wyznaczania czasu trwania zwarcia dla rozdzielni przedstawiono na rys. 3. W pierwszym kroku, w zależności od miejsca zwarcia, realizowany jest algorytm działania zabezpieczeń wykrywających i likwidujących zwarcie w miejscu jego wystąpienia (rys. 3 linia przerywana). Algorytmy te szczegółowo opisane były w pracy [9], a dotyczą zabezpieczeń chroniących bezpośrednio linie, transformatory oraz systemy szyn zbiorczych.

W dalszych krokach symulacji kolejno uwzględnia się działanie:

- zabezpieczenia na drugich końcach linii współpracujące z wyłącznikiem, które mogą wyłączyć prąd zwarciovą płynący do miejsca zakłócenia,
- zabezpieczenia w polach transformatorowych,
- zabezpieczenie rozcinające zainstalowane w polu sprzęgła, jeżeli zwarcie znajduje się w zasięgu jego działania.

W kolejnym kroku wyznaczone są niesprawne zabezpieczenia i wyłączniki, które nie mogą wziąć udziału w likwidacji zakłócenia. Jeżeli uszkodzeniu uległ wyłącznik w symulacji dodatkowo uwzględnia się działanie układu LRW.

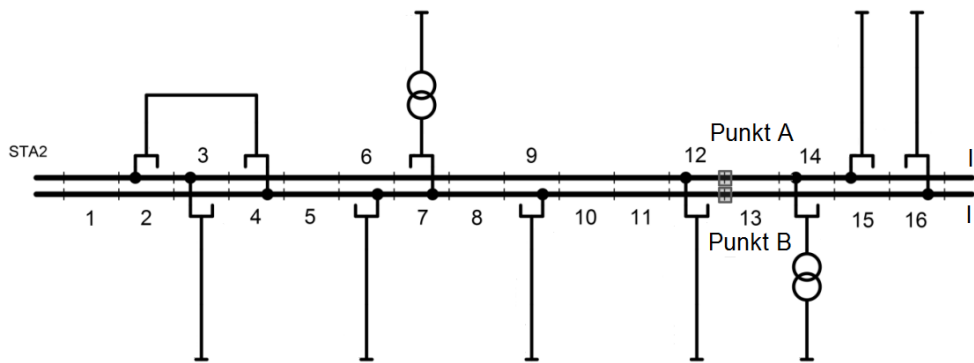
W końcowym etapie symulacji, zgodnie z przyjętymi rozkładami, wyznacza się czas działania zabezpieczeń i wyłączników. Najkrótszy sumaryczny czas działania tych urządzeń jest brany jako czas likwidacji zakłócenia. Zgodnie z rozpoznaniem przyjęto, że w badanej sieci 220 kV występują wyłączniki DLF, przyjmując rozkład czasu działania wyznaczony dla tych wyłączników. Rozkłady czasu działania wybranych zabezpieczeń wyznaczone na podstawie rejestracji czasów działania tych urządzeń przedstawiono w pracy [7].



Rys. 3. Ogólny algorytm wyznaczania czasu trwania zwarcia na drodze symulacyjnej

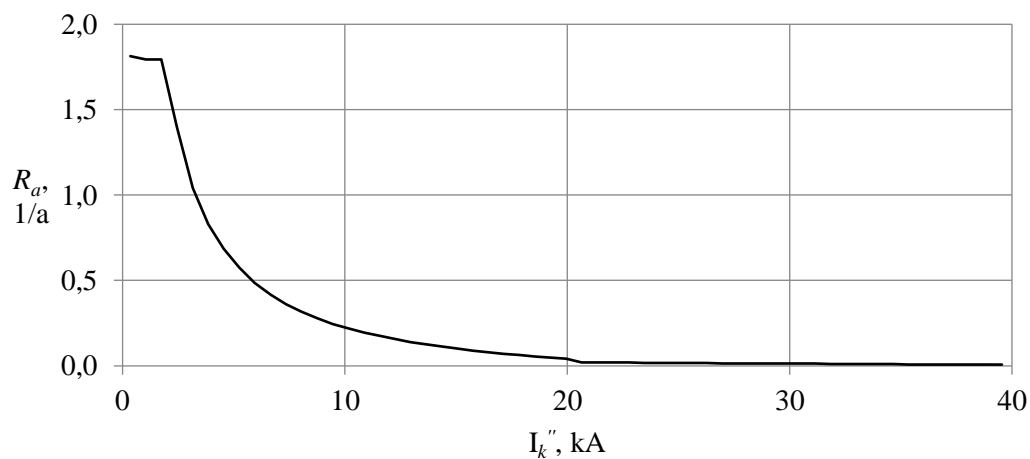
#### 4. Model rozdzielni i rozkład prądu zwarciovego

Na rysunku 4 przedstawiono schemat rozdzielni, na którym zaznaczono punkty obserwacji (A, B) warunków zwarciovych na systemach szyn nr I i nr II pomiędzy polami 12 i 13. W pierwszym przypadku po jednej stronie punktu obserwacji znalazły się dwa pola, do których jest dołączony transformator (pole nr 14) oraz linia (pole nr 15), a po drugiej pozostałe gałęzie uwzględniane na schemacie. W drugim przypadku (system nr 2) po jednej stronie punktu obserwacji znajduje się tylko linia (pole nr 16) o bardzo małym udziale w prądzie zwarciovym na szynach. Do wyznaczenia rozptyłu prądów zwarciovych wykorzystano model sieci w programie Plans. Obliczenia symulacyjne wykonano dla układu, w którym przeskalowano wartości prądu zwarciovego tak, aby maksymalny prąd na szynach rozdzielni wynosił 40 kA.



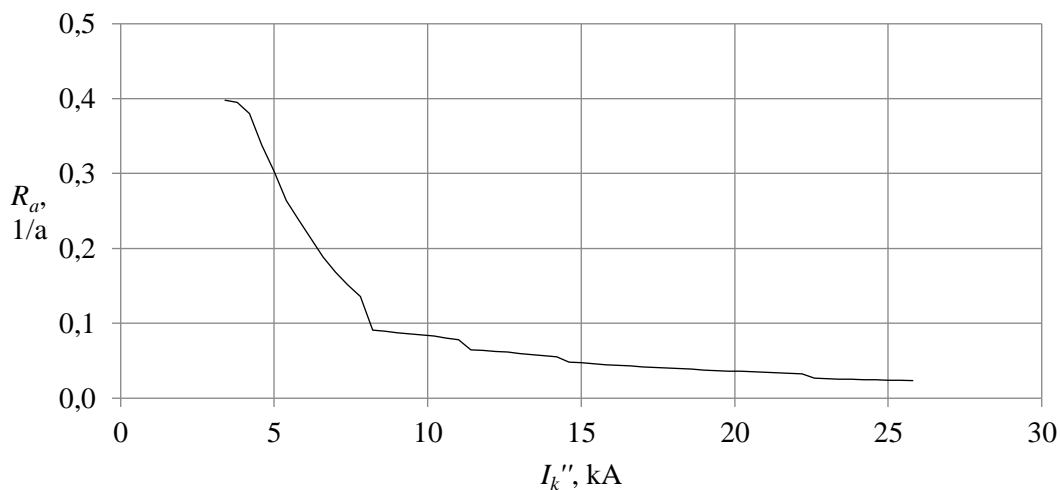
Rys. 4. Schemat badanej rozdzielni 220 kV – punkty obserwacji A i B zaznaczono kwadratami na I i II systemie szyn pomiędzy polami nr 12 i 13

Na rysunku 5 przedstawiono wykres rocznej częstości przekroczenia poszczególnych wartości prądu zwarciovego w punkcie obserwacji B podczas zwarć w rozpatrywanym fragmencie systemu. Ponieważ udział prądu zwarciovego linii przyłączonej w polu 16 jest pomijalnie mały, maksymalne wartości prądów są bliskie 40 kA (wartości prądu zwarcia na szynach). Należy zaznaczyć, że maksymalna wartość prądu zwarciovego na szynach występuje podczas zwarcia jednofazowego. Podczas trójfazowego zwarcia na szynach rozpatrywanej rozdzielni wartość prądu jest nieco mniejsza od 40 kA.



Rys. 5. Roczna częstość przekroczenia poszczególnych wartości prądu zwarciovego dla punktu obserwacji B

Wykres rocznej częstości przekroczenia poszczególnych wartości prądu zwarciovego w punkcie obserwacji A podczas zwarć w rozpatrywanym fragmencie systemu przedstawiono na rys. 6. Ze względu na rozptył prądu zwarciovego na szynach rozdzielni maksymalna wartość tego prądu spodziewana w punkcie obserwacji jest nieco większa od 25 kA. Sumaryczny udział linii (pole 15) oraz transformatora (pole 14) w prądzie zwarciovym na szynach wynosi prawie 15 kA.



Rys. 6. Roczna częstość przekroczenia poszczególnych wartości prądu zwarciovego dla punktu obserwacji A

Bardziej szczegółową analizę rozkładów prądu zwarciovego w rozdzielniach najwyższych napięć metodą statystyczno – probabilistyczną przedstawiono w pracy [8].

## 5. Wyniki analizy czasu trwania zwarcia

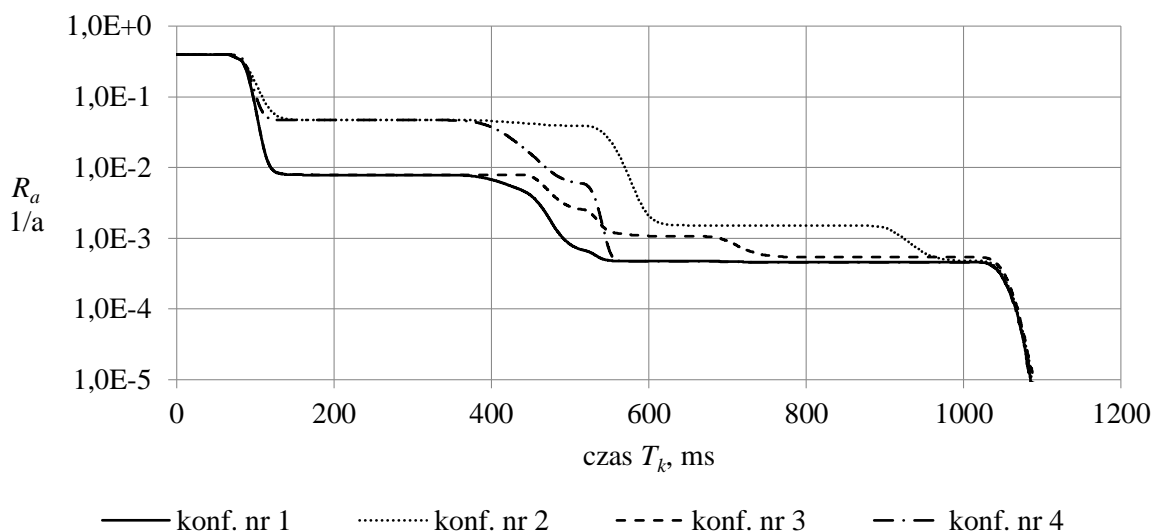
Przeanalizowano roczną częstość przekroczenia poszczególnych wartości czasu trwania zwarcia dla czterech przypadków konfiguracji wyposażenia w układy EAZ rozdzielni 220 kV. Konfiguracje opisano szczegółowo w tabeli 1. W obliczeniach symulacyjnych uwzględniono tylko fragmenty systemu, w których zwarcia powodują przepływ istotnych wartości prądu zwarciovego przez przyjęte punkty obserwacji, z punktu widzenia analizy skutków dynamicznych.

Tabela 1. Opis wyposażenia w układy EAZ badanej rozdzielni dla założonych konfiguracji

Wyposażenie	Konf. nr 1	Konf. nr 2	Konf. nr 3	Konf. nr 4
Automatyka SPZ i współbieżnianie zabezpieczeń	jest	brak	jest	jest
Układ LRW	jest	jest	jest	jest
Zabezpieczenie rozcinające w polu łącznika szyn	jest	jest	brak	jest
Zabezpieczenie szyn zbiorczych	jest	jest	jest	brak



Wykres spodziewanej rocznej częstości przekroczenia czasu trwania zwarcia (przepływu prądu zwarciovego) dla punktu obserwacji A, przedstawiono na rys. 7. Zwarcia symulowane były na fragmencie systemu szyn zbiorczych nr I, w polu liniowym i linii oraz polu transformatorowym i transformatorze (fragment systemu po prawej stronie punktu obserwacji).



Rys. 7. Roczna częstość przekroczenia poszczególnych wartości czasu trwania zwarcia dla punktu obserwacji A

Mniejsze wartości częstości przekroczenia dla najczęściej występujących krótkich czasów trwania zwarcia (do około 150 ms) występują dla konfiguracji nr 1 (pełnej) oraz nr 3 (bez zabezpieczenia rozcinającego w polu łącznika szyn, którego czasy działania są rzędu 400 ms).

Wyższe wartości częstości przekroczeń odpowiadają konfiguracji nr 2, bez automatyki SPZ na linii oraz współbieżniania zabezpieczeń oraz dla konfiguracji nr 4 (bez zabezpieczenia szyn zbiorczych).

Dla częstości przekroczenia  $10^{-2}$  1/a i  $10^{-3}$  1/a zauważa się znaczące różnice w wartościach czasu trwania zwarcia dla różnych konfiguracji. Dla częstości  $10^{-4}$  1/a i niższych wpływ konfiguracji EAZ na otrzymywane wyniki jest pomijalnie mały.

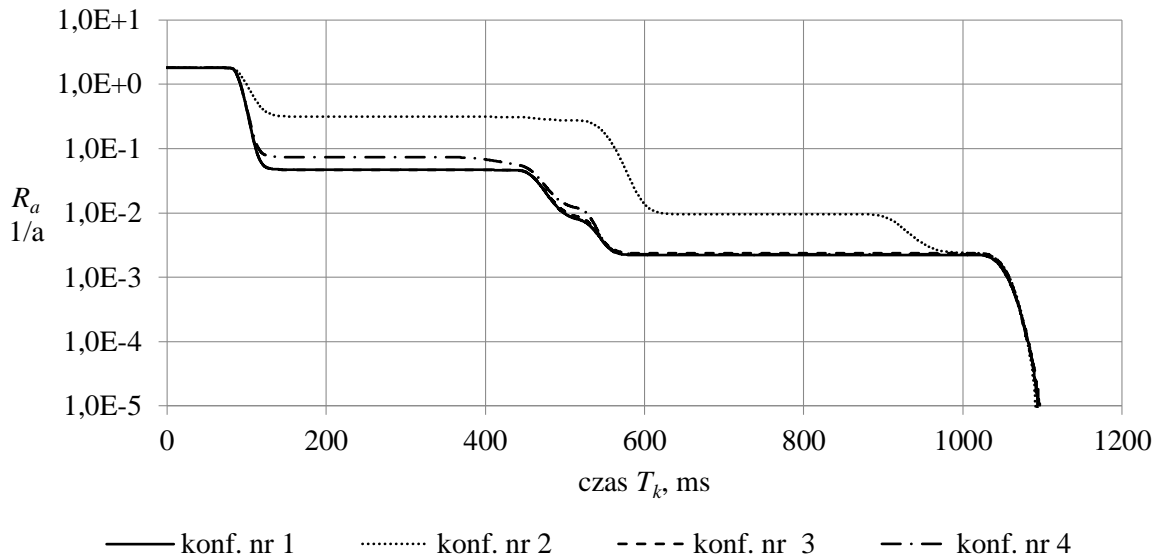
Wartości czasów trwania zwarcia dla wybranych poziomów częstości przekroczenia i dla uwzględnianych konfiguracji EAZ, wyznaczone dla punktu obserwacji A, przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wartości czasu trwania zwarcia  $T_k$  wyznaczone dla punktu obserwacji A, dla wybranych poziomów częstości przekroczenia i czterech konfiguracji EAZ

$R_a, 1/a$	Konf. nr 1	Konf. nr 2	Konf. nr 3	Konf. nr 4
	$T_k$ [ms]	$T_k$ [ms]	$T_k$ [ms]	$T_k$ [ms]
$10^{-1}$	97,2	108,7	97,2	101,2
$10^{-2}$	119,6	569,8	119,8	469,3
$10^{-3}$	491,1	923,9	689,4	545,2
$10^{-4}$	1066,4	1067,6	1069,0	1065,8

Krzywe przedstawiające wyznaczoną częstość przekroczenia czasu trwania dla punktu obserwacji B przedstawiono na rys. 8. W obliczeniach uwzględniono zwarcia na fragmencie

systemu szyn zbiorczych nr II, w polu liniowym nr 16 i na linii przyłączonej do tego pola (na prawo od punktu obserwacji).



Rys. 8. Roczna częstość przekroczenia poszczególnych wartości czasu trwania zwarcia dla punktu obserwacji B

W przypadku, kiedy tylko jedna linia 220 kV znajduje się po prawej stronie punktu obserwacji największy wpływ na badaną częstość ma automatyka SPZ i uwspółbieżnianie zabezpieczeń na tej linii. Dla częstości przekroczenia  $10^{-1}$  1/a i  $10^{-2}$  1/a, brak tej automatyki znacznie zawyża wyznaczone wartości czasu trwania zwarcia. Wpływ automatyki chroniącej linię, na której symulowane są zakłócenia jest większy niż dla linii uwzględnianej dla punktu obserwacji na systemie I. Wynika to z faktu, że linia przyłączona w polu 16 jest około 7-krotnie dłuższa niż linia w polu nr 15. Krzywe zamieszczone na rys. 8 dla konfiguracji nr 1, nr 3 i nr 4 mają przebiegi porównywalne. Dla częstości przekroczenia  $10^{-3}$  1/a i niższych nie zauważa się wpływu konfiguracji EAZ na otrzymane wyniki.

Wartości czasów trwania zwarcia dla wybranych poziomów częstości przekroczenia i dla uwzględnianych konfiguracji EAZ, wyznaczone dla punktu obserwacji B, przedstawiono w tabeli 3.

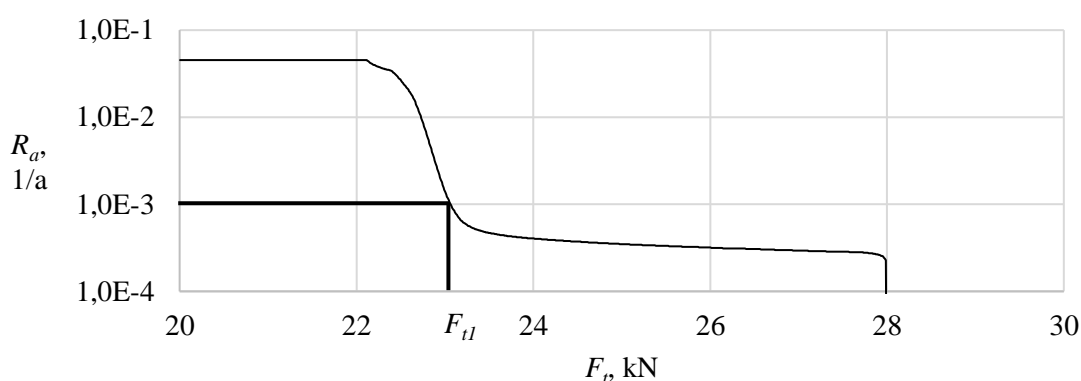
Tabela 3. Wartości czasu trwania zwarcia  $T_k$  wyznaczone dla punktu obserwacji B, dla wybranych poziomów ryzyka i czterech konfiguracji EAZ

$R_a$ , 1/a	Konf. nr 1	Konf. nr 2	Konf. nr 3	Konf. nr 4
	$T_k$ [ms]	$T_k$ [ms]	$T_k$ [ms]	$T_k$ [ms]
$10^{-1}$	111,5	562,9	111,5	115,1
$10^{-2}$	498,7	620,6	503,4	527,2
$10^{-3}$	1055,9	1058,7	1058,3	1057,2
$10^{-4}$	1081,9	1081,0	1081,2	1081,6

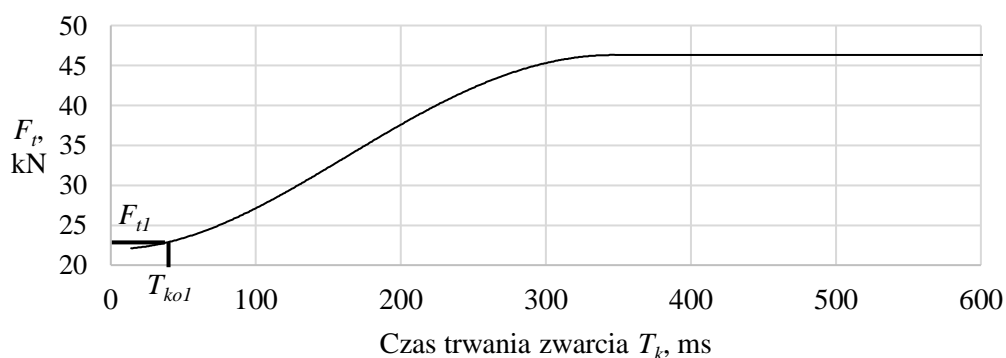
## 6. Ocena sił dynamicznych i czasów trwania zwarcia do ich wyznaczenia

Do analizy wartości sił dynamicznych posłużono się symulacją komputerową, w której wykorzystano schemat obliczeń zamieszczony na rys. 1. Przykładowe obliczenia wykonano dla określonego pręśła 220 kV o długości 56 m.

Na rysunku 9 przedstawiono spodziewaną roczną częstość przekroczenia poszczególnych wartości siły  $F_t$ , wyznaczoną dla konfiguracji EAZ nr 1 w rozdzielni. Korzystając z wyznaczonej krzywej oraz z zależności wartości siły  $F_t$  od czasu trwania zwarcia wyznaczonej dla prądu 40 kA (rys.10) można oszacować wartości czasu trwania zwarcia  $T_{ko}$ , jakie należy przyjmować podczas obliczania siły  $F_t$  w rozdzielni, przy założonej wartości ryzyka  $R_{az}$  (spodziewanej częstości przekroczenia wyznaczonej siły). Przykładowo częstości przekroczeń  $10^{-3}$  1/a odpowiada siła  $F_{t1}$  o wartości około 23,1 kN (rys. 9). Na podstawie krzywej zamieszczonej na rys. 10 można zauważyć, że wartości tej odpowiada czas  $T_{ko1} = 43,9$  ms. W ten sposób można powiązać wartości czasu trwania zwarcia przyjmowane do obliczania skutków dynamicznych w rozdzielni o maksymalnym prądzie zwarcia 40 kA, ze spodziewanym ryzykiem przekroczenia wyznaczonej wartości siły podczas zwarcia.



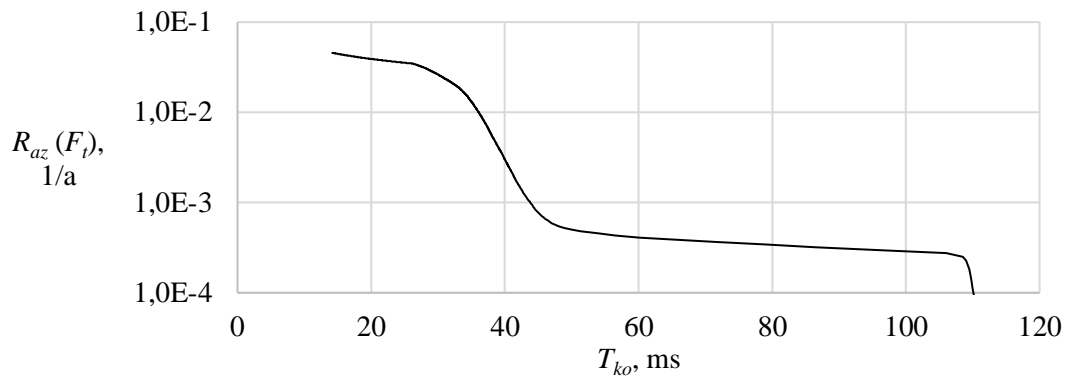
Rys. 9. Roczna częstość przekroczenia siły  $F_t$  dla punktu obserwacji A i konfiguracji nr 1



Rys. 10. Zależność wartości siły  $F_t$  od czasu trwania zwarcia dla  $I_k'' = 40$  kA

Wykorzystując omówioną metodę można wyznaczyć krzywą ryzyka przekroczenia wyznaczonej siły  $F_t$  od wartości czasu  $T_{ko}$ , przyjmowanego do obliczania wartości tej siły. Dla omawianego przykładu zależność tą przedstawia krzywa zamieszczone na rys. 11.

Zestawienie wartości siły  $F_t$  oraz odpowiadających im wartości czasu  $T_{ko}$  dla czterech uwzględnianych konfiguracji EAZ, dla wybranych poziomów ryzyka zamieszczone w tabeli 4. Wyniki dotyczą warunków zwarciovych w punkcie A. Rezultaty podobnej analizy wykonanej dla warunków zwarciovych w punkcie B przedstawiono w tabeli 5.



Rys. 11. Zależność ryzyka przekroczenia siły  $F_t$  od czasu  $T_{ko}$  dla warunków zwarciovych w punkcie A, dla konfiguracji nr 1

Tabela 4. Wartości siły  $F_t$  oraz czasu  $T_{ko}$  dla określonych poziomów ryzyka i różnych konfiguracji EAZ, dla warunków zwarciovych w punkcie A

$R_a, 1/a$	Konf. nr 1		Konf. nr 2		Konf. nr 3		Konf. nr 4	
	$F_t, \text{kN}$	$T_{ko}, \text{ms}$	$F_t, \text{kN}$	$T_{ko}, \text{ms}$	$F_t, \text{kN}$	$T_{ko}, \text{ms}$	$F_t, \text{kN}$	$T_{ko}, \text{ms}$
$10^{-1}$	-	-	-	-	-	-	-	-
$10^{-2}$	22,7	36,2	22,8	37,6	22,7	36,2	23,0	41,5
$10^{-3}$	23,1	43,9	25,2	77,6	23,1	43,9	28,0	110,0
$10^{-4}$	28,0	110,0	28,0	110,0	28,0	110,0	28,0	110,0

Tabela 5. Wartości siły  $F_t$  oraz czasu  $T_{ko}$  dla określonych poziomów ryzyka i różnych konfiguracji EAZ, dla warunków zwarciovych w punkcie B

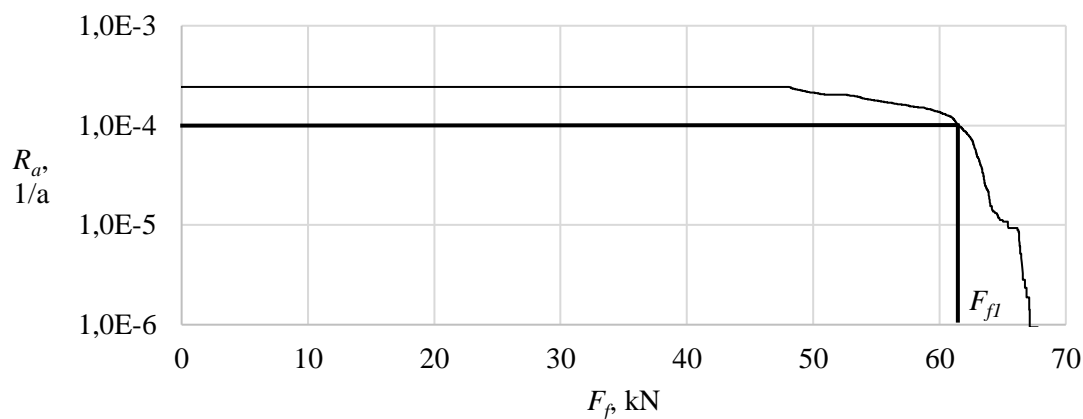
$R_a, 1/a$	Konf. nr 1		Konf. nr 2		Konf. nr 3		Konf. nr 4	
	$F_t, \text{kN}$	$T_{ko}, \text{ms}$	$F_t, \text{kN}$	$T_{ko}, \text{ms}$	$F_t, \text{kN}$	$T_{ko}, \text{ms}$	$F_t, \text{kN}$	$T_{ko}, \text{ms}$
$10^{-1}$	-	-	-	-	-	-	-	-
$10^{-2}$	25,0	74,2	25,6	82,0	25,0	74,2	25,8	84,8
$10^{-3}$	27,6	104,7	32,9	156,0	27,6	104,7	45,9	317,1
$10^{-4}$	45,9	317,1	45,9	317,1	45,9	317,1	45,9	317,1

Wyniki zamieszczone w tabeli 4 wskazują, że wartość czasu  $T_{ko}$  jest bardzo mała i dopiero dla ryzyka przekroczenia  $10^{-4} 1/a$  wzrasta do wartości około 100 ms. Wynika to z faktu, że maksymalna wartość prądu zwarciovego w punkcie A rozdzielni jest znacznie mniejsza od 40 kA. Brak zabezpieczenia szyn zbiorczych powoduje wzrost wyznaczonej wartości czasu. Można zauważyć to wyraźnie dla ryzyka  $10^{-3} 1/a$ .

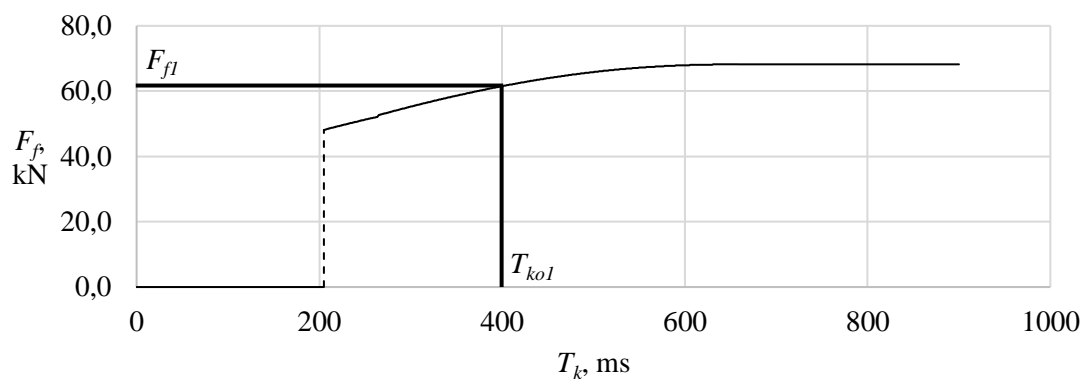
Dla warunków zwarciovych w punkcie B wyznaczone wartości czasu  $T_{ko}$  są wyraźnie większe i dla ryzyka równego  $10^{-3} 1/a$  wynoszą około 100 ms (konfiguracja nr 1 i nr 3). Brak zabezpieczenia szyn zbiorczych powoduje znaczący wzrost wyznaczonej wartości czasu (około 3 razy). Dla rozważanego poziomu ryzyka zaznacza się także wpływ braku automatyki SPZ i uwspółbieżniania zabezpieczeń ( $T_{ko}$  wynosi około 160 ms).

Podobną analizę przeprowadzono dla siły  $F_f$ . Na rysunku 12 przedstawiono spodziewaną roczną częstość przekroczenia poszczególnych wartości siły  $F_f$ , wyznaczoną dla konfiguracji EAZ nr 1, dla warunków zwarciovych w punkcie B. Zależność wartości siły  $F_f$  od czasu trwania zwarcia dla prądu 40 kA pokazano na rys. 13. Przykładowo wyznaczono wartość czasu  $T_{ko}$  dla obliczania siły  $F_f$  przy założeniu ryzyka przekroczenia równego  $10^{-4} 1/a$ . Wartość siły odczytana z krzywej na rys. 12 wynosi 61,5 kN a odpowiadająca jej wartość czasu trwania zwarcia odczytana z rys. 13 wynosi około 400 ms.

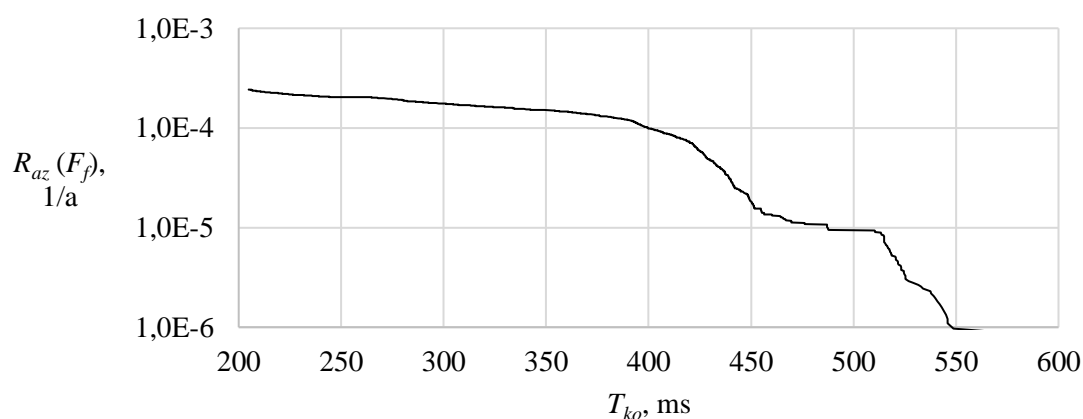
Krzywą przedstawiającą zależność spodziewanego ryzyka przekroczenia wyznaczonej siły  $F_f$  od czasu  $T_{ko}$  przyjmowanego do obliczenia wartości tej siły pokazano na rys. 14.



Rys. 12. Ryzyko przekroczenia siły  $F_f$  dla punktu obserwacji B dla konfiguracji nr 1



Rys. 13. Zależność wartości siły  $F_f$  od czasu trwania zwarcia dla  $I_k'' = 40$  kA



Rys. 14. Zależność ryzyka przekroczenia siły  $F_f$  od czasu  $T_{ko}$  dla warunków zwarciovych w punkcie B, dla konfiguracji nr 1

Zestawienie wartości sił  $F_f$  oraz odpowiadających im czasów dla czterech uwzględnianych konfiguracji EAZ i dla wybranych poziomów ryzyka pokazano w tabeli 6.

Wyniki dotyczą warunków zwarciovych w punkcie B. Dla warunków zwarciovych w punkcie A siła  $F_f$  nie występuje w ogóle. Z wyników zamieszczonych w tabeli 6 wynika, podczas analizy skutków dynamicznych w rozdzielni przy założeniu ryzyka równego  $10^{-3}$  1/a, dla konfiguracji EAZ nr 1 i nr 3 siły  $F_f$  nie trzeba uwzględniać w ogóle. Dla konfiguracji nr 2 należałoby do obliczeń przyjąć czas trwania zwarcia wynoszący około 280 ms, a dla konfiguracji nr 4 około 433 ms.

Tabela 6. Wartości sił  $F_f$  oraz czasów  $T_{ko}$  dla określonych poziomów ryzyka i różnych konfiguracji EAZ, dla warunków zwarciovych w punkcie B

$R_a, 1/a$	Konf. nr 1		Konf. nr 2		Konf. nr 3		Konf. nr 4	
	$F_f, \text{kN}$	$T_{ko}, \text{ms}$	$F_f, \text{kN}$	$T_{ko}, \text{ms}$	$F_f, \text{kN}$	$T_{ko}, \text{ms}$	$F_f, \text{kN}$	$T_{ko}, \text{ms}$
$10^{-2}$	-	-	-	-	-	-	-	-
$10^{-3}$	-	-	53,8	280,3	-	-	63,2	433,1
$10^{-4}$	61,5	399,7	64,8	469,4	63,7	444,6	66,4	517,2
$10^{-5}$	65,4	486,8	66,8	531,9	66,7	528,3	66,7	529,9

## 7. Podsumowanie

Określanie wartości czasu trwania zwarcia podczas obliczania sił dynamicznych w rozdzielniach najwyższych napięć można oprzeć na poziomach przyjmowanego w analizie ryzyka, tzn. spodziewanej rocznej częstości przekroczenia wyznaczonej siły w czasie eksploatacji rozdzielni (przyjęto warunki statyczne). Dla określonego pręśła rozdzielni, wartości te zależą głównie od punktu rozdzielni, dla którego warunki zwarciovowe są wyznaczane, od przyjętego poziomu ryzyka dla którego są wykonywane obliczenia oraz od wyposażenia rozdzielni w elementy EAZ.

W rozdzielniach najwyższych napięć, ze względu na długość pręśła, siła  $F_f$  posiada z reguły większe wartości niż siła  $F_t$ , ale prawdopodobieństwo jej wystąpienia jest małe. Autorzy prac, w których podjęto problem ryzyka dopuszczalnego podczas doboru urządzeń do warunków zwarciovych, wskazują na wartość  $10^{-2}$  1/a,  $10^{-3}$  1/a [6]. Wartości czasu  $T_{ko}$  wyznaczone dla obliczania siły  $F_f$  przy ryzyku  $10^{-3}$  1/a i mniejszym są większe niż wartości tego czasu dla wyznaczania siły  $F_t$ . W sytuacjach wątpliwych, zasadność uwzględnienia siły  $F_f$ , podczas wyboru wariantu modernizacji rozdzielni, należy umotywić analizą ekonomiczną.

Trzeba być świadomym, że wyznaczone wartości czasu  $T_{ko}$  będą zależały także od: parametrów pręśła rozdzielni, zastosowanego naciągu statycznego przewodów, rozptywu prądu zwarciovego w rozdzielni (także stosunku reaktancji  $x_0/x_1$ ), przyjętych modeli i danych. W kolejnym etapie badań autorzy przewidują podjęcie badań mających na celu oszacowanie wpływu tych czynników.

Przyjęte założenia, szczególnie nie uwzględnienie rozptywu prądu zwarciovego w ramach jednego pręśła, oraz przyjęcie stałej temperatury przewodów przed zwarcieniem znacznie zawyżają spodziewaną wartość ryzyka (wprowadzają pewien współczynnik bezpieczeństwa).

## Literatura

1. Adwad M. B., Huestits H. W. Influence of Short-Circuit Currents on HV and EHV Strain Bus Design. IEEE Transactions on PAS 1980; 99(2): 480-487.
2. Anders C. J. Probability Concepts in Electric Systems. J. Toronto: Wiley&Sons, 1990.

3. Daszczyszak M. Zastosowanie metod probabilistycznych do podjęcia decyzji optymalnej modernizacji oszynowania giętkiego w elektroenergetycznych stacjach NN. Rozprawa doktorska, AGH Kraków, 1995.
4. El-Kady M. A. Probabilistic Short-Circuit Analysis by Monte Carlo Simulations. IEEE Transactions on PAS 1983; 102(5): 1240-1248.
5. Frąckowiak R. Simulation – Aided Short-Circuit Risk Evaluation for Circuit Breakers in HV Substations. Second International Conference on The Reliability of Transmission and Distribution Equipment. IEE Conference Publication Number 406 1995; 175-179.
6. Frąckowiak R. Zagadnienia elektroenergetyki w ujęciu statystycznych i probabilistycznych badań. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2013.
7. Frąckowiak R., Piechocki P. Rzeczywisty czas działania zabezpieczeń w sieci elektroenergetycznej 110, 220 i 400 kV. Automatyka Elektroenergetyczna 2009; 2: 12-16.
8. Frąckowiak R., Piechocki P., Symulacyjna ocena prądów zwarciovych w rozdzielniach 110, 220 i 400 kV, Przegląd Elektrotechniczny 2010; 86(4); 237-240.
9. Frąckowiak R., Piechocki P. Wartości czasu trwania zwarcia szacowane dla rozdzielni najwyższych napięć na podstawie badań symulacyjnych, Przegląd Naukowo-Metodyczny, Edukacja dla Bezpieczeństwa 2016; 1: 1338-1352.
10. Germani M. D., Vainberg M., Ford G. L., El-Kady M. A., Ganton R. W. D. Probabilistic Short-circuit Uprating of Station Strain Bus System-Overview, Application and Risk Assessment. Proceedings of First International Symposium, Probabilistic Methods Applied to Electric Power Systems 1986; 567-579.
11. Herrmann, B., Stein, N., Kiessling, G. Short-circuit effects in high-voltage substations with stranded conductors. Systematic full-scale tests and simple calculation method. IEEE Trans. Power Delivery 1989; 4: 1021-1028.
12. Hosemann G., Landin I., Meyer W. Progress in International Standardization Mechanical Effect of Short-Circuit Currents in Substations with Flexible Conductors, Fourth International Symposium on Short-Circuit Currents in Power Systems 1990; 3.3.
13. IRiESP - Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej – Warunki korzystania, prowadzenia ruchu, eksploatacji i planowania rozwoju sieci przesyłowej. <http://www.pse.pl>.
14. Lilien J. L., Brokamp L. Mechanical effects of short-circuit currents in substations with strain bus systems. Parameter Analysis and simple method of calculation. CIGRE Symposium 1985; 06-85.
15. Lilien J. L., Miri A. M. Stein N., Herrmann, B., Stein, N., Kiessling, G. Short-circuit effects in high-voltage substations with stranded conductors. Systematic full-scale tests and simple calculation method. IEEE Trans. Power Delivery 1989; 4:1021-1028.

16. PN-EN 60865-1. Obliczanie skutków zwarciovych – Część I: Definicje i metody obliczania (IEC 865-1.Short-circuit currents – Calculation of effects. Geneve 1993).
17. Popczyk J. Modele probabilistyczne w sieciach elektroenergetycznych. Warszawa: WN-T, 1991.
18. Stein, N., Rieyer, W., Miri, A.M. Tests and calculations of short-circuit forces and displacements in high-voltage substations with strained conductors and droppers. European Transactions on Electrical Power 2000; 10 (3): 131-137.
19. Szadkowski, M. Siły zwarciove narażające izolatory w sporze WN . Przegląd Elektrotechniczny 2012; 88(5 A): 108-111.
20. Vainberg M., Germani M. D., El-Kady M. A., Ganton R. W. Probabilistic Uprating of 230 kV Strain Bus System at Substations with High Fault Currents. CIGRE Symposium 1985; 310-03.