

Artykuł ukazał się w Wiadomościach Elektrotechnicznych, nr 7/2008

dr inż. Witold Hoppel, docent PP

dr hab. inż. Józef Lorenc, profesor PP

Politechnika Poznańska

Instytut Elektroenergetyki

**Wpływ impedancji transformatora uziemiającego na wielkości
ziemnozwarciowe w sieci z punktem neutralnym uziemionym
przez rezystor**

1. Wstęp

Uziemienie punktu neutralnego sieci średnich napięć przez rezystor jest w Polsce dość często stosowane, szczególnie w obszarach miejskich.

Oceniając ogólnie taki sposób pracy punktu neutralnego, przy prawidłowym doborze rezystora, wymienia się następujące jego zalety:

- znaczne tłumienie przepięć ziemnozwarciowych i w ten sposób ograniczanie awaryjności kabli oraz liczby zwarć wielokrotnych,
- możliwość stosowania prostych zabezpieczeń zerowoprądowych nie wymagających składowej zerowej napięcia,
- eliminowanie skutków oddziaływania napięcia asymetrii naturalnej, co pozwala na zmniejszenie nastaw zabezpieczeń i urządzeń automatyki ziemnozwarciowej działających w oparciu o kryteria zerowonapięciowe,
- uproszczoną obsługę pola potrzeb własnych bez potrzeby kontrolowania i dokonywania zmian w nastawach dławika kompensującego.

Skutki niekorzystne uziemienia punktu neutralnego sieci przez rezystor to przede wszystkim:

- większe zagrożenie porażeniowe lub ostrzejsze wymagania dla uziomów stacji SN/mn w porównaniu z sieciami skompensowanymi,
- znaczna intensywność działania automatyki SPZ w liniach napowietrznych,
- konieczność dwustronnego wyłączenia transformatora 110 kV/SN podczas działania rezerwowych zabezpieczeń ziemnozwarciowych w polu transformatora uziemiającego, co wiąże się z potrzebą ochrony rezystora przed skutkami cieplnymi oraz możliwością istnienia zwarcia na szynach zbiorczych.

2. Dobór rezystora uziemiającego punkt neutralny sieci SN

2.1. Sposób uproszczony

Dla typowych sieci o napięciu nominalnym 15 kV wartości znamionowych prądów ziemnozwarciowych rezystorów z reguły przyjmuje się w granicach od 100 do 500 A. W ostatnich latach utrwaliła się zasada doboru rezystora wg zależności:

$$I_{RN} \geq 1,2I_{CS} \quad (1a)$$

oraz dodatkowo, że

$$I_{RN} \geq 100 \text{ A} \quad \text{lub} \quad I_{RN} \geq 150 \text{ A} \quad (1b)$$

w których:

I_{RN} – znamionowy prąd ziemnozwarciowy rezystora,

I_{CS} – pojemnościowy prąd zwarcia doziemnego sieci.

Spełnienie zależności (1) pozwala na ograniczenie nieustalonych przepięć ziemnozwarciowych do wartości niezagrażających bezpośrednio izolacji sieci. Pojęcie „znamionowy prąd ziemnozwarciowy” określa tutaj wartość prądu płynącego przez rezystor podczas metalicznego zwarcia doziemnego, a nie wiąże się z właściwościami konstrukcyjnymi – np. wytrzymałością cieplną.

Wartość rezystancji uziemiającej R_{PN} dobiera się przeważnie wg uproszczonego wzoru:

$$R_{PN} = \frac{U_n}{\sqrt{3}I_{NR}} \quad (2)$$

gdzie:

U_n – nominalne napięcie przewodowe sieci (15 kV - a nie 15,75 kV, 20 kV - a nie 21 kV).

Przy takim uproszczonym doborze pomija się impedancję transformatora uziemiającego dla składowej zerowej oraz fakt, że napięcie robocze sieci jest często o kilka procent większe od nominalnego.

Obydwa uproszczenia częściowo kompensują się, ponieważ pierwsze z nich powoduje zmniejszenie dobieranej rezystancji, drugie – zwiększenie.

Kontynuując obliczenia z przyjętymi uproszczeniami, wartość ustalonego prądu ziemnozwarciowego, m. in. dla potrzeb doboru rezystancji uziemiaenia stacji SN/nN, oblicza się wg zależności:

$$I_{KI} = \sqrt{I_{RN}^2 + I_{CS}^2} \quad (3),$$

co jest wystarczająco dokładne dla większości przypadków.

2.2. Sposób dokładny

Impulsem do napisania niniejszego artykułu były badania przeprowadzone w jednej z sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor ($I_{RN}=500$ A), gdzie po analizie okazało się, że wartość prądu ziemnozwarciowego jest praktycznie równa prądowi płynącemu przez rezystor i jest w fazie ze składową zerową napięcia na szynach zbiorczych. Nie stwierdzono wyraźnego udziału składowej pojemnościowej, którą szacowano wstępnie na kilkadziesiąt amperów. Stąd próba obliczenia pojemnościowego prądu sieci na podstawie pomiarów prądu rezystora i prądu zwarcia dawała wynik absurdalny.

Szczegółowa analiza rozptyłów prądów w tej sieci wykazała, że pojemnościowy prąd części sieci został skompensowany prądem indukcyjnym pochodzącym od reaktancji transformatora uziemiającego dla składowej zerowej.

Rezystor uziemiający jest włączany do sieci wg schematu na rys. 1a. Zaniedbując impedancję transformatora uziemiającego schemat zastępczy tego fragmentu sieci jest taki, jak pokazano na rys. 1b, punkt neutralny N jest zlokalizowany na szynach zbiorczych, a przez rezystor teoretycznie płynie wyłącznie prąd czynny oznaczony jako I_{RN} . Natomiast w rzeczywistości, jak to pokazano na rys.1c, pomiędzy szynami zbiorczymi a punktem neutralnym sieci występuje impedancja zerowa transformatora uziemiającego, a przez rezystor płynie prąd oznaczony jako I_N posiadający tak składową czynną, jak i bierną.

Przy uwzględnieniu impedancji zerowej transformatora powstaje szeregowy jej układ z rezystancją rezystora pierwotnego, który można zastąpić równoważnym układem równoległym (rys. 1.d) o następujących parametrach:

$$G_N = \frac{R_{PN} + R_{T0}}{(R_{PN} + R_{T0})^2 + (\omega L_{0T})^2} \quad (4)$$

$$L_N = \frac{(R_{PN} + R_{T0})^2 + (\omega L_{0T})^2}{\omega^2 L_{0T}} \quad (5)$$

gdzie:

ω - pulsacja sieci,

R_{PN} – rzeczywista rezystancja rezystora uziemiającego,

R_{0T} – rezystancja transformatora dla składowej zerowej,

G_N – zastępcza konduktancja układu rezystor-transformator,

L_N – zastępcza indukcyjność układu rezystor-transformator,

L_{0T} – indukcyjność transformatora uziemiającego dla składowej zerowej.

Szczegółowe uzasadnienie tych wzorów jest zawarte w [1].

W związku z tym można przyjąć, że rzeczywista rezystancja uziemiająca R_N wynosi:

Pomimo, że w układzie nie ma dławika kompensującego, to występuje kompensacja

$$R_N = \frac{1}{G_N} = R_{PN} + R_{0T} + \frac{(\omega L_{0T})^2}{(R_{PN} + R_{0T})} \quad (6)$$

ziemnozwarciowa, której stopień K określony jest zależnością:

$$K = \frac{1}{\omega^2 L_N C_{0S}} \quad (7).$$

w której:

C_{0S} – pojemność doziemna sieci.

3. Wyniki obliczeń dla przykładowych sieci SN

Schemat zastępczy dla obliczeń prowadzonych metodą składowych symetrycznych pokazano na rys.2. Został on sporządzony dla zwarcia na szynach zbiorczych, co z punktu widzenia doboru warunków uziemienia stacji SN/nN jest przypadkiem najtrudniejszym. Jeśli w obliczaniu prądu ziemnozwarciowego w takiej sieci zaniedbuje się impedancje wzdłużne linii, to wg tego schematu można łatwo obliczać prąd zwarcia doziemnego (ale nie jego rozptył) w dowolnym punkcie sieci. Poszczególne symbole oznaczają:

Z_{0T} – impedancja transformatora potrzeb własnych dla składowej zerowej (fazowa),

R_F – rezystancja przejścia w miejscu zwarcia,

Y_{0S} – admitancja doziemna sieci

U_K – napięcie w miejscu zwarcia, czyli na szynach zbiorczych,

Z_{1SYS}, Z_{2SYS} – impedancja systemu elektroenergetycznego dla składowej zgodnej i przeciwnej,

Z_{1T110}, Z_{2T110} – impedancje transformatora zasilającego dla składowej zgodnej i przeciwnej,

I_{1K}, I_{2K}, I_{2K} – składowe symetryczne prądu ziemnozwarciowego,

U_{1K}, U_{2K}, U_{0K} – odpowiednio składowa zgodna, przeciwna i zerowa napięcia w miejscu zwarcia,

W schemacie tym można pominąć impedancje systemu elektroenergetycznego i transformatora zasilającego [3], a dalszą analizę prowadzić przy założeniu zerowej wartości rezystancji przejścia w miejscu zwarcia, co pokazano na rys. 3.

Taka sytuacja występuje podczas zwarć doziemnych w stacjach SN/nN w pobliżu rozdzielni.

Poniżej przedstawiono wyniki przykładowych obliczeń i dokonano analizy wpływu transformatora uziemiającego na wielkości ziemnozwarciowe. W przeprowadzonych ocenach

przyjęto, że wartość I_{RN} jest obliczana ze wzoru (1), ale przy napięciu znamionowym czyli np. 15,75 kV. Taką samą wartość przyjęto jako napięcie źródłowe w metodzie składowych symetrycznych.

Na kilku wykresach porównano wybrane wielkości istotne z punktu widzenia doboru rezystancji uziemienia stacji SN/nN, tłumienia przepięć i charakteru prądu ziemnozwarciowego.

Wykresy wykonano dla sieci 15 kV o różnych wartościach pojemnościowych prądów zwarć doziemnych przy trzech wartościach impedancji transformatorów uziemiających:

- a) dla sieci o pojemnościowym prądzie zwarcia doziemnego 100 A i impedancji $Z_{0T} = (10+j40) \Omega$ – jest to wartość zbliżona do występującej w transformatorach produkowanych w Żychlinie [2] o mocy do 545 kVA i na napięciu 15 kV (rys.4),
- b) dla sieci o pojemnościowym prądzie zwarcia doziemnego 100 i 250 A oraz impedancji $Z_{0T} = 1+j4 \Omega$ – jest to wartość zbliżona do występującej w transformatorach produkowanych w Żychlinie o mocy od 730 kVA i na napięciu 15 kV (rys.5),
- c) dla $Z_{0T} = 0+j9 \Omega$ (typowa wartość spotykana w różnych innych transformatorach bez określonej rezystancji) i sieci o pojemnościowym prądzie zwarcia doziemnego 250 A (rys.6).

Na wykresach oznaczonych A pokazano zależności prądu zwarciego obliczonego na podstawie zależności uproszczonej (3) i dokładniejszą metodą składowych symetrycznych w funkcji znamionowego prądu rezystora przy przyjęciu tej samej wartości napięcia źródłowego 15,75 kV.

Na wykresach B pokazano zmiany składowej czynnej i biernej prądu ziemnozwarciowego w funkcji znamionowego prądu rezystora obliczone metodą składowych symetrycznych.

Linia ciągłą zaznaczono użyteczne zakresy prądów wynikające z dopuszczalnego obciążenia transformatora potrzeb własnych, zaleceń producenta w tym zakresie oraz spotykanego w praktyce zakresu prądu czynnego rezystorów uziemiających [3]. Wszystkie wykresy rozpoczęto od prądu rezystora $I_{RN}=0$ uwzględniając w ten sposób również czysto teoretyczny zakres zmian. Rozszerzenie zakresu prądów rezystorów poza zalecenia autorów wynika również z tego, że w Polsce spotyka się również inne zasady tego doboru, głównie sprzed kilkunastu lat. Powszechnie stosowano wówczas w sieciach kablowych rezystory o prądzie 500 A, a dla sieci napowietrznych projektowano rezystory na 300 A.

Dla przypadku „a” (rys. 4), czyli transformatorów mniejszych mocy, wpływ impedancji zerowej transformatora jest bardzo silny. Przy przyjęciu uproszczonej metody

obliczania prądu ziemnozwarciowego obliczone dopuszczalne rezystancje uziemień będą zaniżone – przy rezystorze 300 A nawet o 30 %.

Przy spodziewanym prądzie czynnym 300 A wynikającym z obliczonej rezystancji metodą uproszczoną, rzeczywisty prąd czynny wyniesie tylko około 240 A.

Wartość składowej biernej prądu ziemnozwarciowego może zmienić nawet swój charakter z pojemnościowego (przy rezystorach o dużej oporności) na indukcyjny. Taki przypadek należy uwzględniać podczas wyznaczania parametrów doziemnych sieci w sposób szczegółowy.

Dla przypadku „b” (rys.5), czyli transformatorów o mocy od 730 kVA impedancja X_{OT} jest pomijalnie mała i nie ma wpływu przede wszystkim na wartość prądu ziemnozwarciowego i jego charakter.

Dla przypadku „c” (rys. 6), czyli transformatorów o reaktancji $X_{OT} = 9 \Omega$ i zerowej wartości R_{OT} jej wpływ na zmiany wielkości ziemnozwarciowe są widoczne, ale dla rezystorów 500 A osiągają nie więcej niż 10 %. Takie rozrzuty przy doborze rezystancji stacji oraz jej sezonowej zmienności są dopuszczalne.

Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono wpływ reaktancji transformatora na współczynnik rozstrojenia kompensacji ziemnozwarciowej sieci s liczony jako

$$s = 1 - K$$

Oba rysunki dotyczą sieci o pojemnościowych prądach zwarć doziemnych w granicach od 50 do 300 A oraz dwóch wartości impedancji składowej. Sieci o prądzie przekraczającym 300 A są w Polsce praktycznie nie spotykane, chociaż mogą tworzyć się na pewien okres czasu w układach awaryjnych np. po zadziałaniu automatyki SZR.

Oczywiście w sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor kompensacja składowej pojemnościowej prądu ziemnozwarciowego nie prowadzi do gaszenia zwarć łukowych tak jak w sieciach skompensowanych ale pośrednio może wpływać korzystnie na warunki zagrożenia porażeniowego.

5. Wnioski

Impedancja transformatora uziemiającego dla składowej zerowej wpływa na wielkości ziemnozwarciowe w sieci średniego napięcia z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor.

Stopień tego wpływu silnie zależy od znamionowego prądu ziemnozwarciowego zastosowanego rezystora i parametrów transformatora.

Dla transformatorów produkowanych w Żychlinie o mocy do 530 kVA, które nadają się do współpracy z rezystorami o prądzie 300 A lub mniejszym wpływ jest na tyle silny, że warto go uwzględnić w obliczeniach. Pominięcie impedancji transformatora spowoduje zaniżenie, czyli zaostrenie wymaganych rezystancji uziemienia stacji SN/nN oraz może spowodować niedoszacowanie przepięć w stanach nieustalonych.

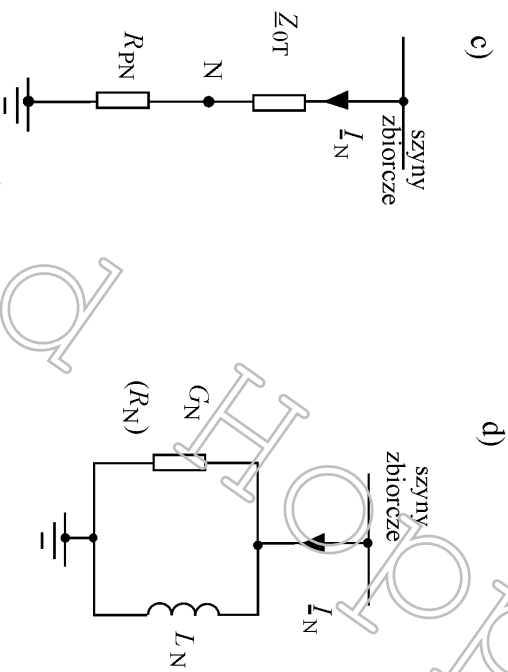
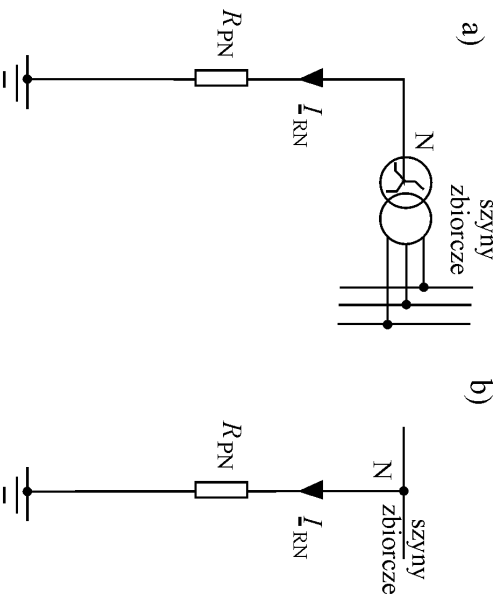
Przy transformatorach z Żychlina o mocy od 730 kVA wpływ impedancji Z_{OT} jest pomijany.

Wydaje się, że graniczna wartość impedancji, dla której należy ten wpływ uwzględnić wynosi około 10Ω lub nieco więcej.

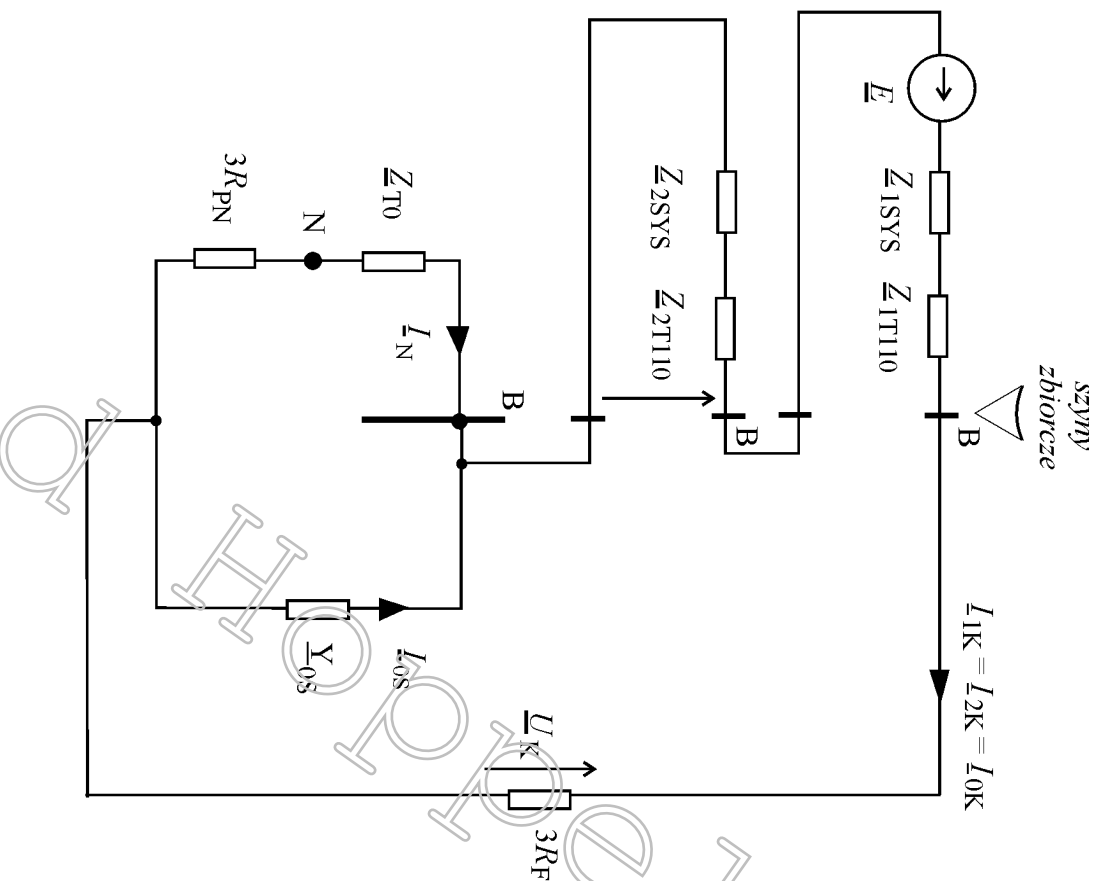
Natomiast w dokładnych pomiarach sieciowych i badaniu rozptyłu prądów ziemnozwarciowych należy to zjawisko uwzględniać. Inaczej uzyskane wyniki będą mało wiarygodne i sugerować mogą niewłaściwe wnioski.

Literatura

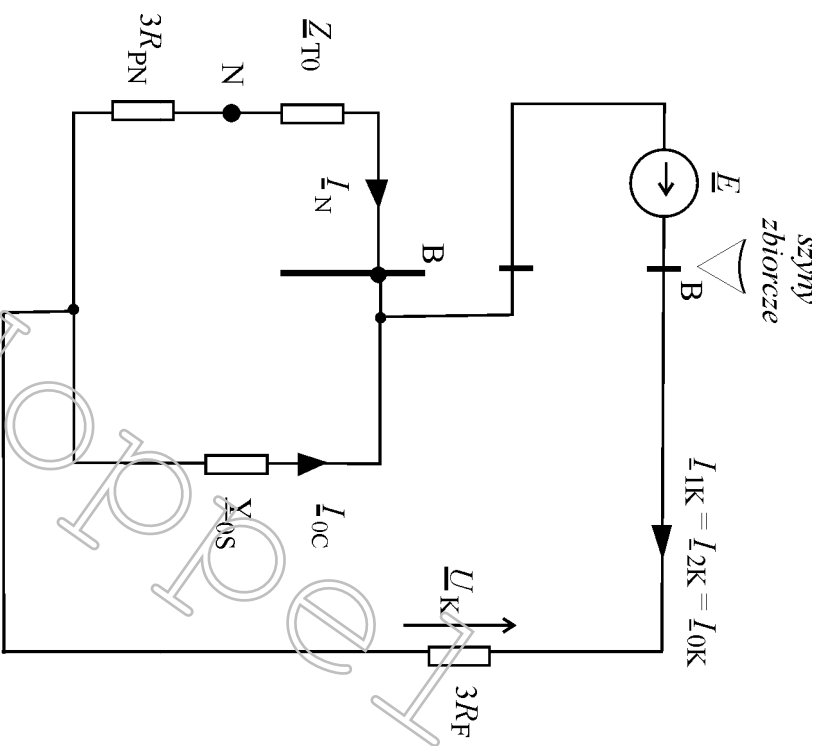
- 1 Lorenc J.: Admitancyjne zabezpieczenia ziemnozwarciowe. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2007.
- 2 Szablewski K.: Transformatory uziemiające w EVZT. Publikacja otrzymana bezpośrednio od autora bez podania miejsca i czasu druku.
- 3 Hoppel W., Lorenc J.: Skutki uproszczeń stosowanych w obliczeniach wielkości ziemnozwarciowych w sieciach rozdzielczych SN. IV Konferencja Naukowo-Techniczna. „Sieci elektroenergetyczne w przemyśle i energetyce”, Prace Instytutu Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej, nr 91, Seria: Konferencje 34, t.2, Wrocław 2000.



Rys. 1. Umieszczenie rezystora w sieci i schematy zastępcze urządzeń w jej punkcie neutralnym

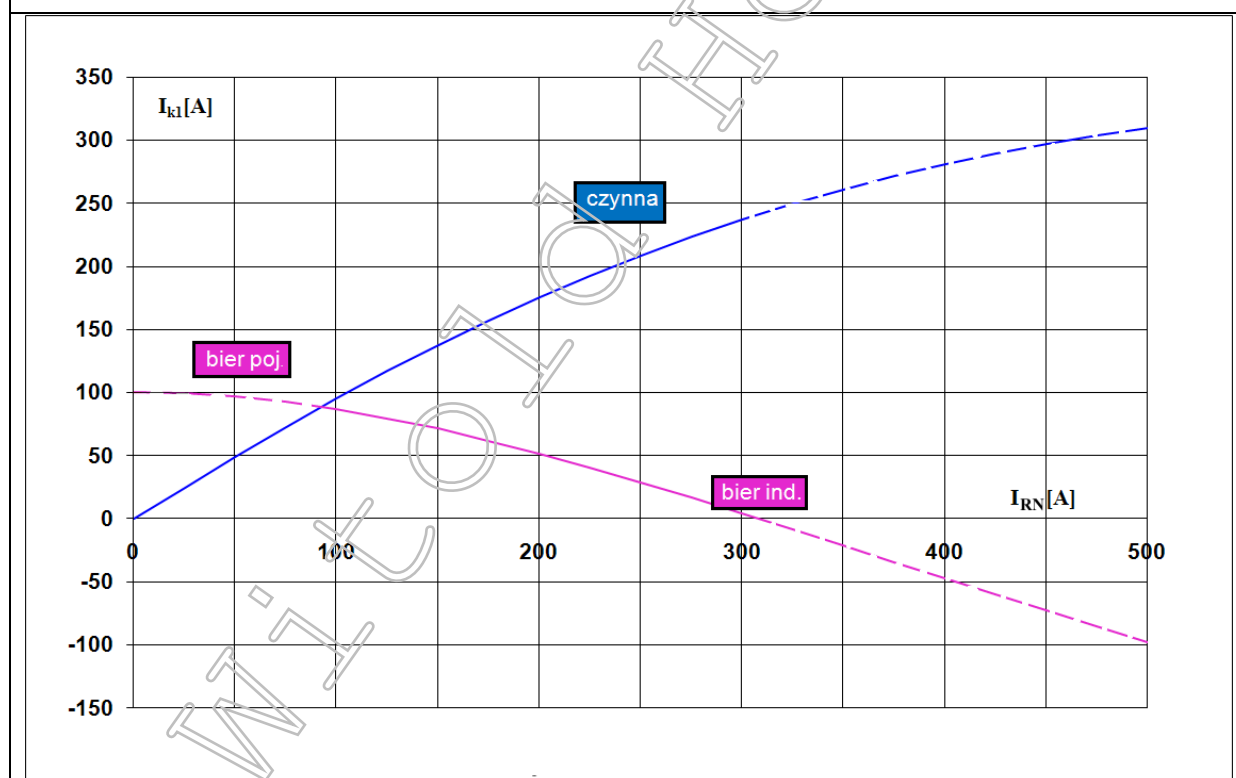
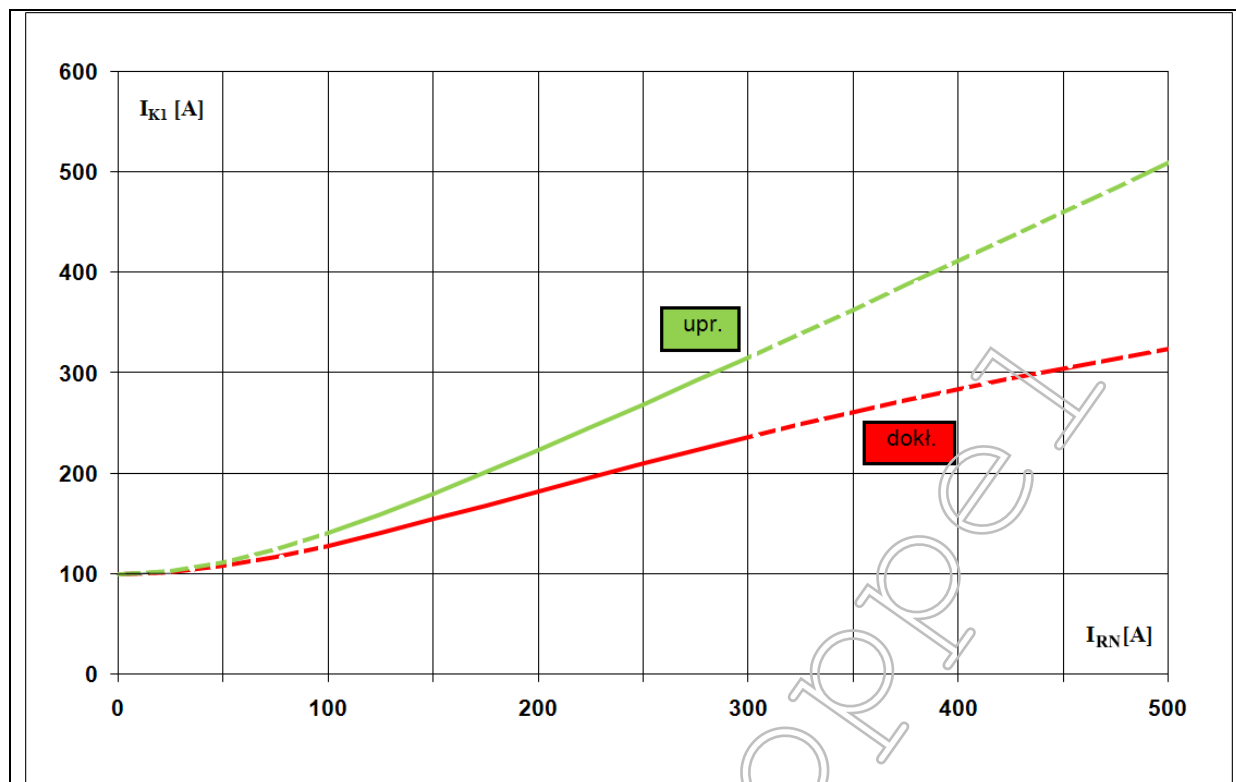


Rys. 2. Schemat zastępczy sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor podczas zwarcia na szynach zbiorczych dla metody składowych symetrycznych



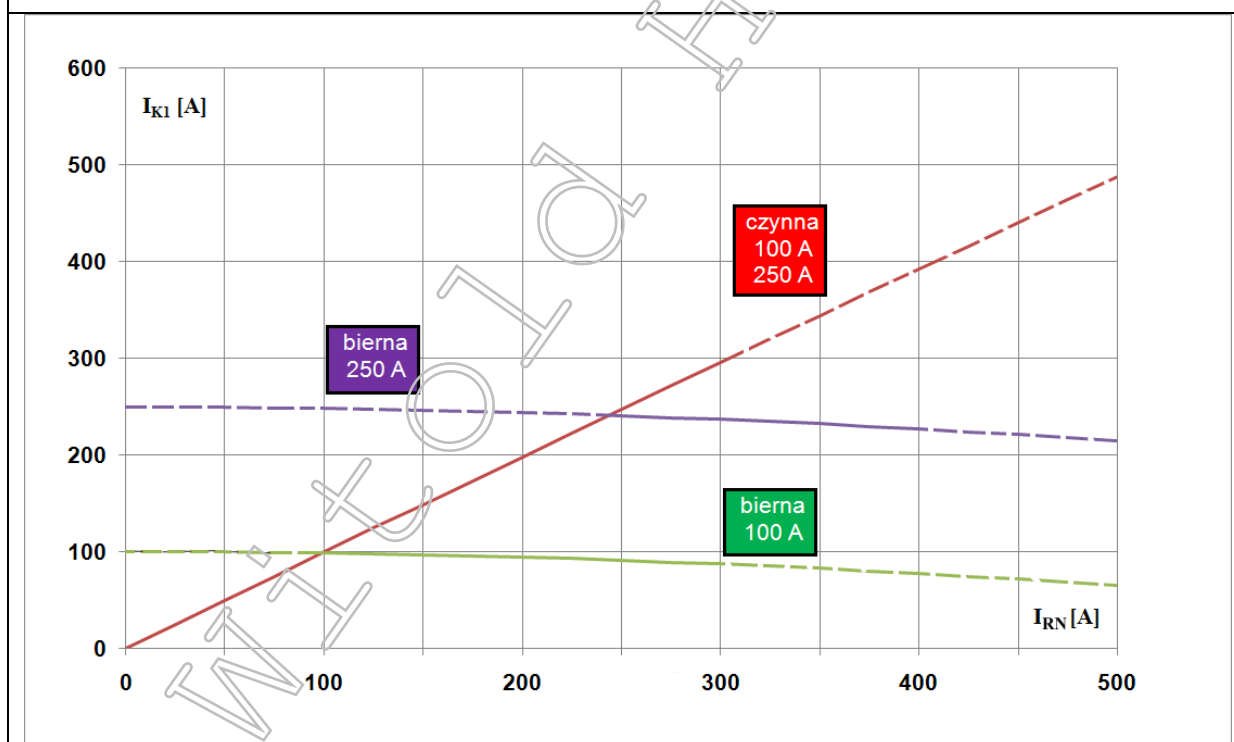
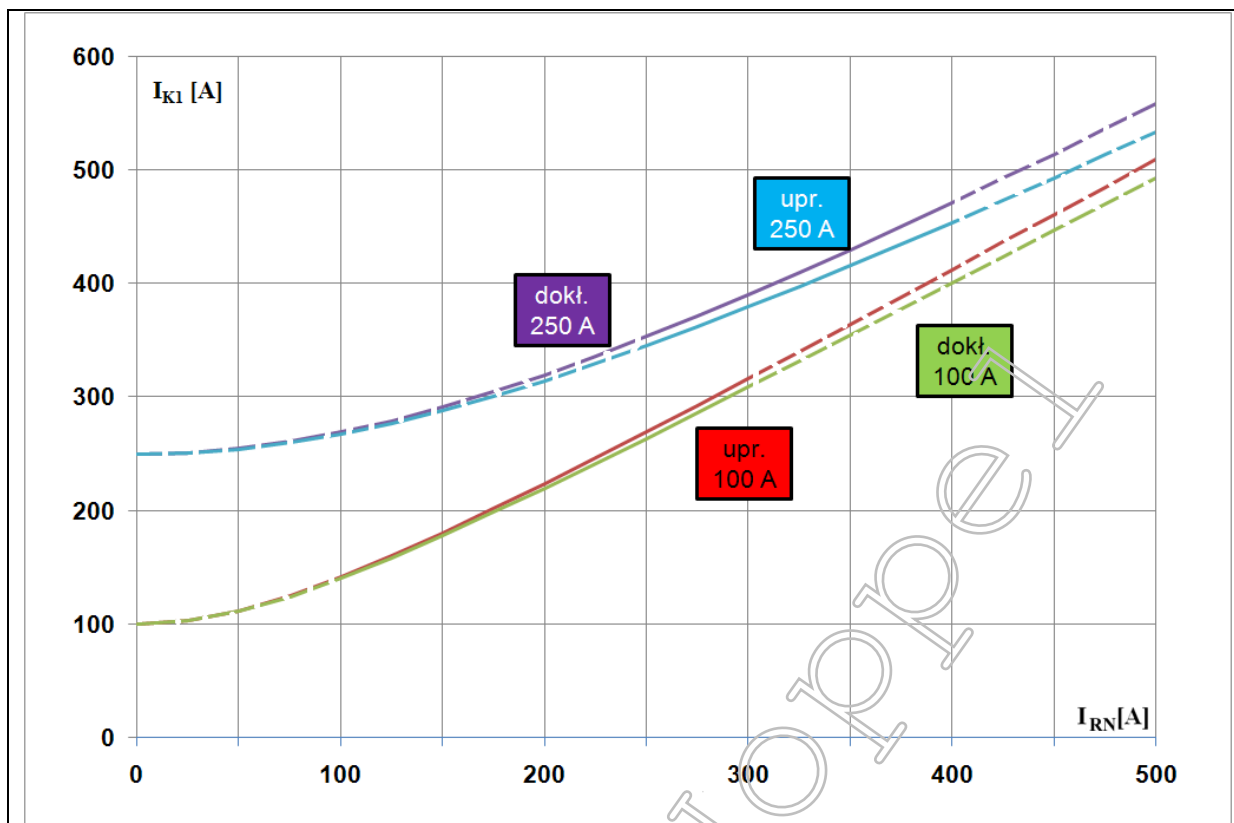
Rys. 3. Uproszczony schemat zastępczy sieci z rys. 2 przyjęty do obliczeń

WITAM



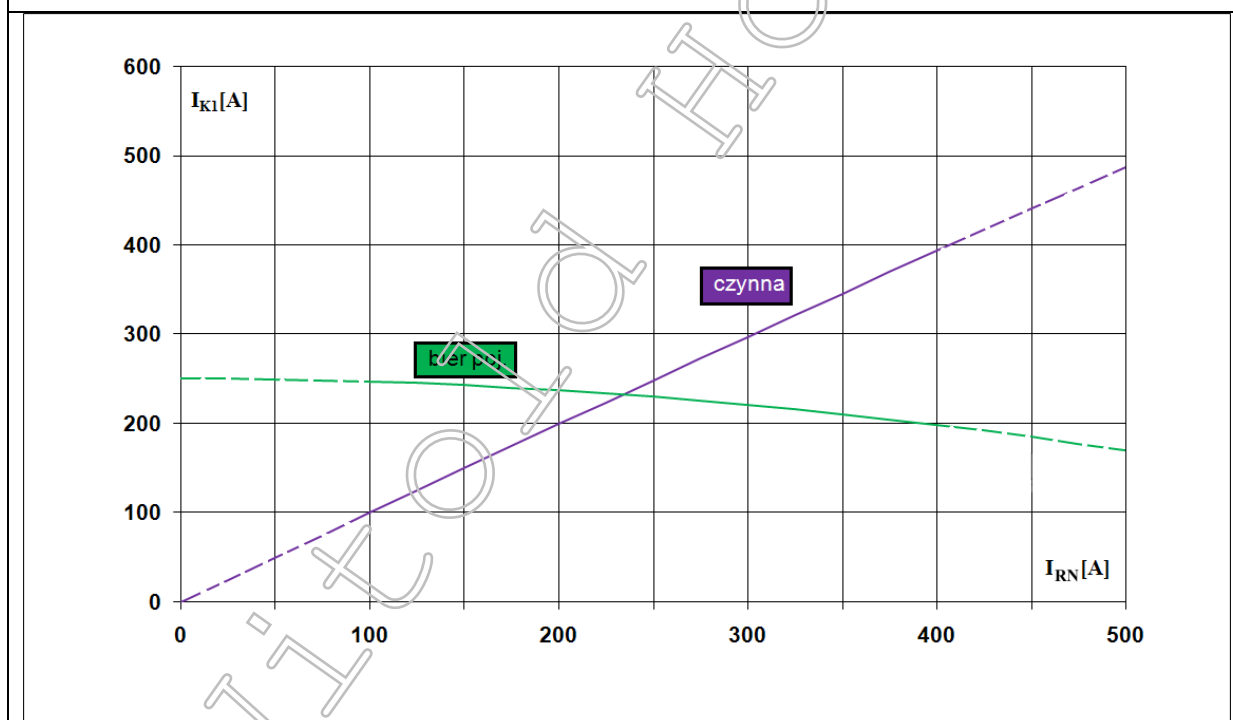
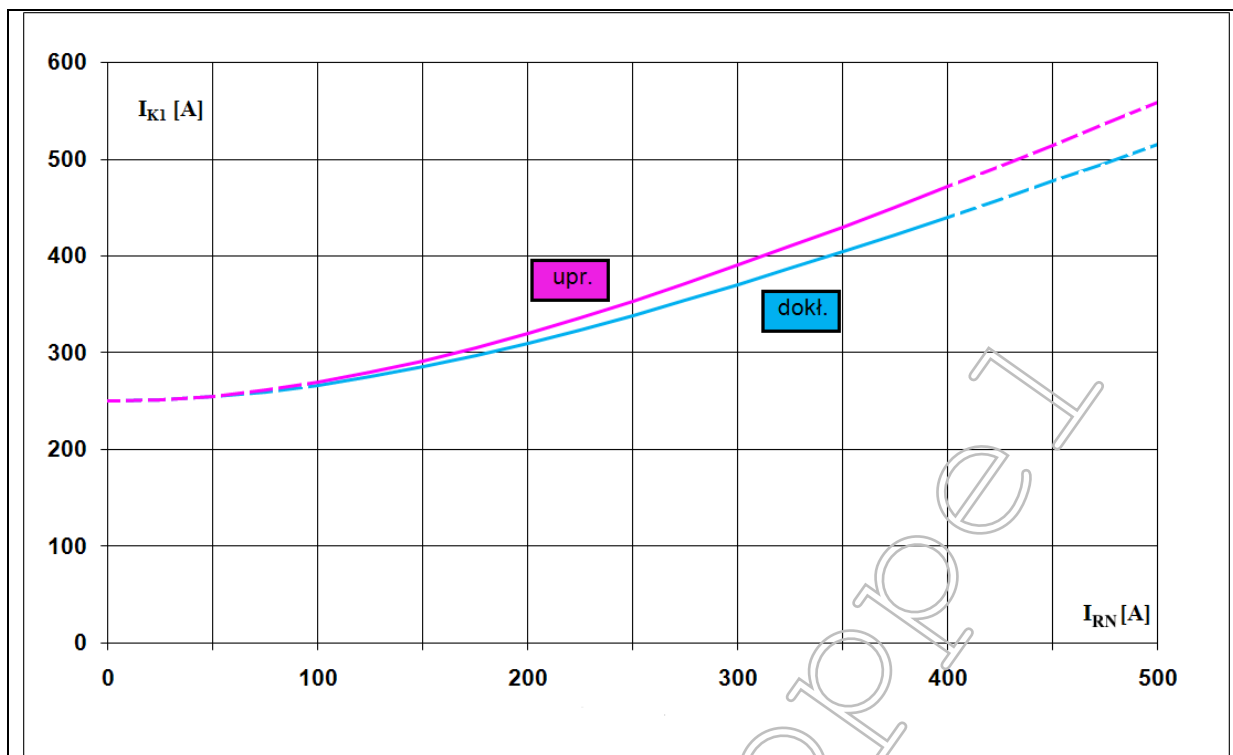
Rys.4. Wyniki obliczeń dla sieci o pojemnościowym prądzie zwarcia doziemnego 100 A i impedancji zerowej transformatora $(4+j40) \Omega$:

- a) prądu ziemnozwarciowego metodą uproszczoną (upr.) i dokładną (dokł.)składowej czynnej i biernej prądu ziemnozwarciowego.



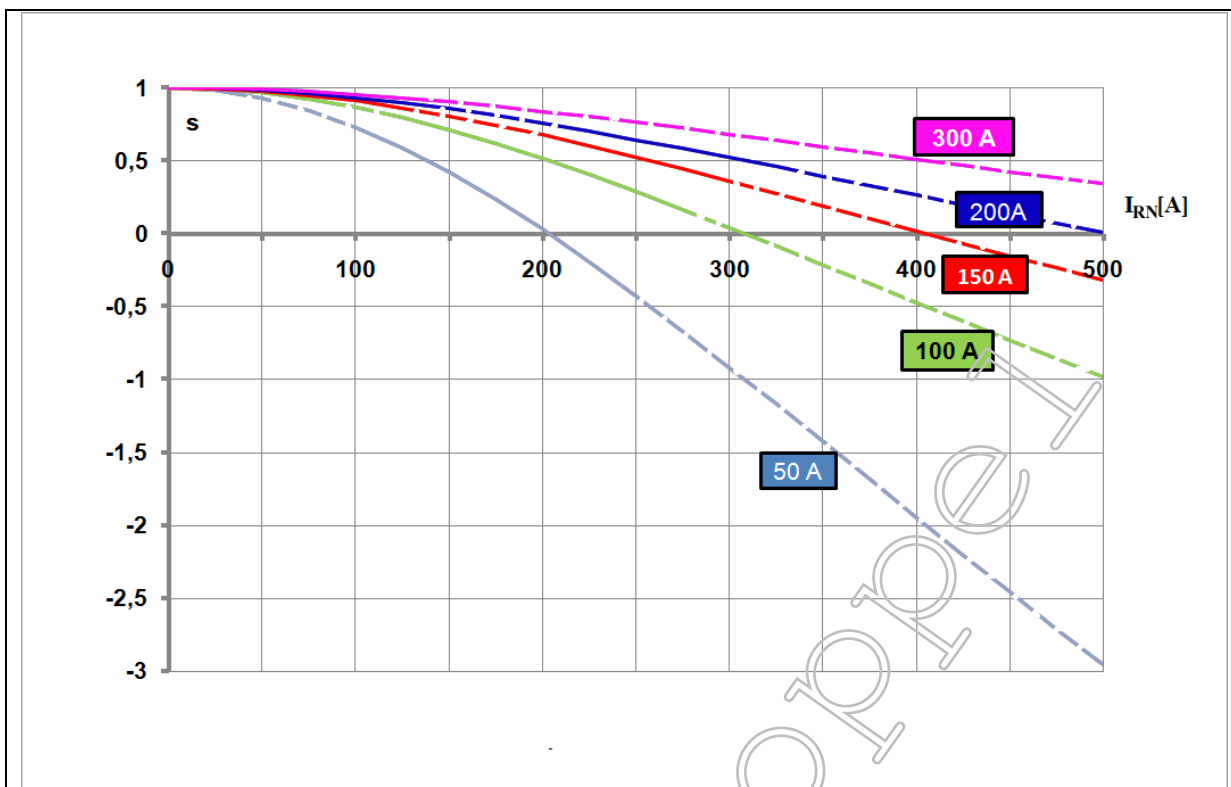
Rys.5. Wyniki obliczeń dla sieci o pojemnościowym prądzie zwarcia doziemnego 100 oraz 250 A i impedancji zerowej transformatora $(1+j4) \Omega$:

- prądu ziemnozwarciowego metodą uproszczoną (upr.) i dokładną (dokł.)
- składowej czynnej i biernej prądu ziemnozwarciowego.

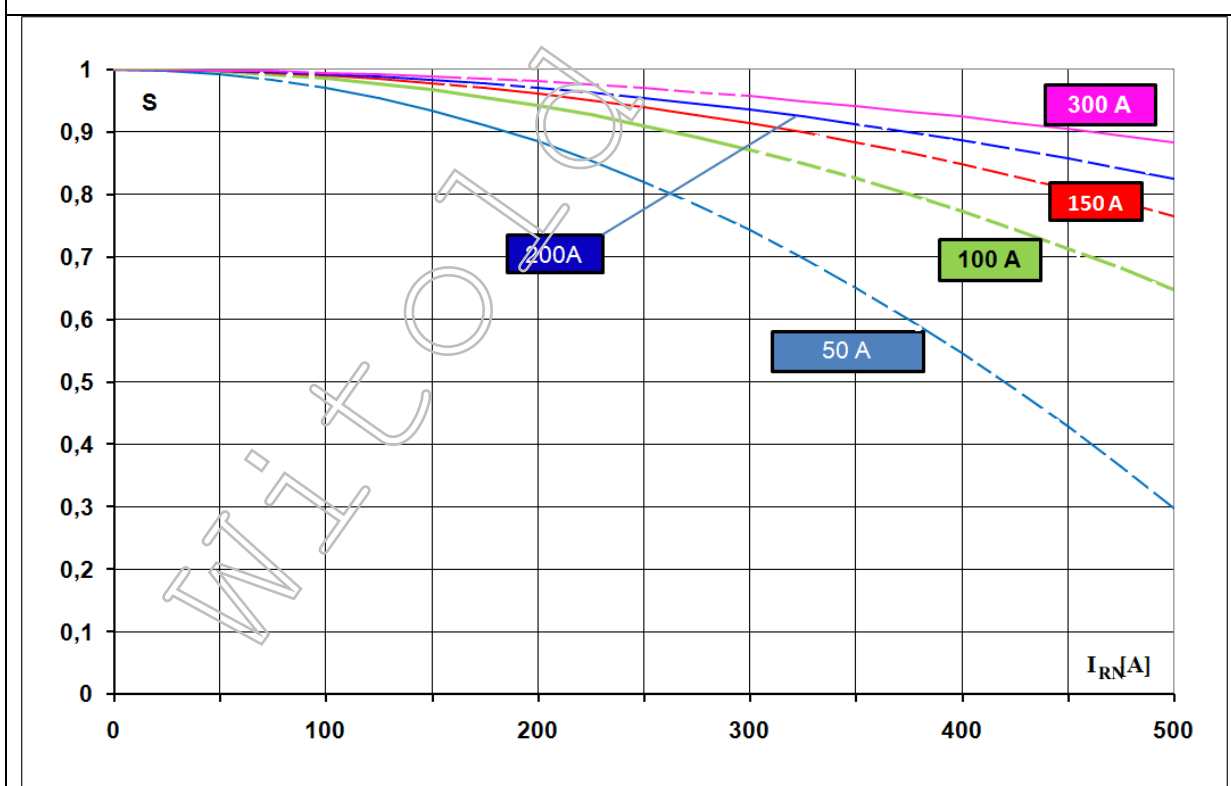


Rys.6. Wyniki obliczeń dla sieci o pojemnościowym prądzie zwarcia doziemnego 250 A i reaktancji zerowej transformatora 9 Ω :

- a) prądu ziemnozwarciowego metodą uproszczoną (upr.) i dokładną (dokł.)
- b) składowej czynnej i biernej prądu ziemnozwarciowego.



Rys.7. Współczynnik rozkompensowania sieci o różnych prądach pojemnościowych przy wprowadzeniu rezystora poprzez transformator uziemiający o impedancji $(4+j40) \Omega$



Rys.8. Współczynnik rozkompensowania sieci o różnych prądach pojemnościowych przy wprowadzeniu rezystora poprzez transformator uziemiający o reaktancji 9Ω

Witold

Hoopes