

PRZEPIĘCIA I KOORDYNACJA IZOLACJI

***8. PRZEPIĘCIA WEWNĘTRZNE DŁUGOTRWAŁE I PRÓBY
NAPIĘCIEM PRZEMIENNYM.***

8.1. WPROWADZENIE

Przebiegi wewnętrzne długotrwałe są to przebiegi o charakterze przemennym, małej częstotliwości, zbliżonej do technicznej, charakteryzujące się długim czasem trwania rzędu minut, godzin a nawet dni. Często są to przebiegi wywołane rezonansem w szeregowym układzie indukcyjności i pojemności, gdy napięcia na tych elementach są sobie równe, co do wartości bezwzględnej. Gdyby nie było strat czynnych to wypadkowe napięcie byłoby równe zeru, układ przedstawiałby sobą reaktancję wypadkową równą zeru. Po doprowadzeniu do takiego układu napięcia popłynąłby znaczny prąd dający spadki napięcia na indukcyjności i pojemności dążące teoretycznie do nieskończoności. W układach rzeczywistych istnieje ograniczenie spowodowane stratami czynnymi.

Najogólniej biorąc, przemienne długotrwałe przebiegi małej częstotliwości można podzielić na:

- symetryczne, czyli równomierny wzrost napięcia we wszystkich fazach - przebiegi takie można rozpatrywać jednofazowo;
- asymetryczne.

8.2. PRZEPIĘCIA SYMETRYCZNE

8.2.1. Efekt Ferrantiego

Ten rodzaj przebiegu symetrycznego polega na tym, że na końcu długiej linii energetycznej występuje napięcie większe niż na początku, wskutek powstawania stojącej fali napięcia o długości $\lambda = c/f$ (gdzie c - prędkość światła, f - częstotliwość). Wówczas napięcia na końcu linii i na początku linii są związane wzorem:

$$U_1 = U_2 \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{l}{\lambda}\right) \quad (8.1)$$

gdzie l - długość linii.

Przy częstotliwości 50 Hz długość fali $\lambda = 6000$ km, zatem dla:

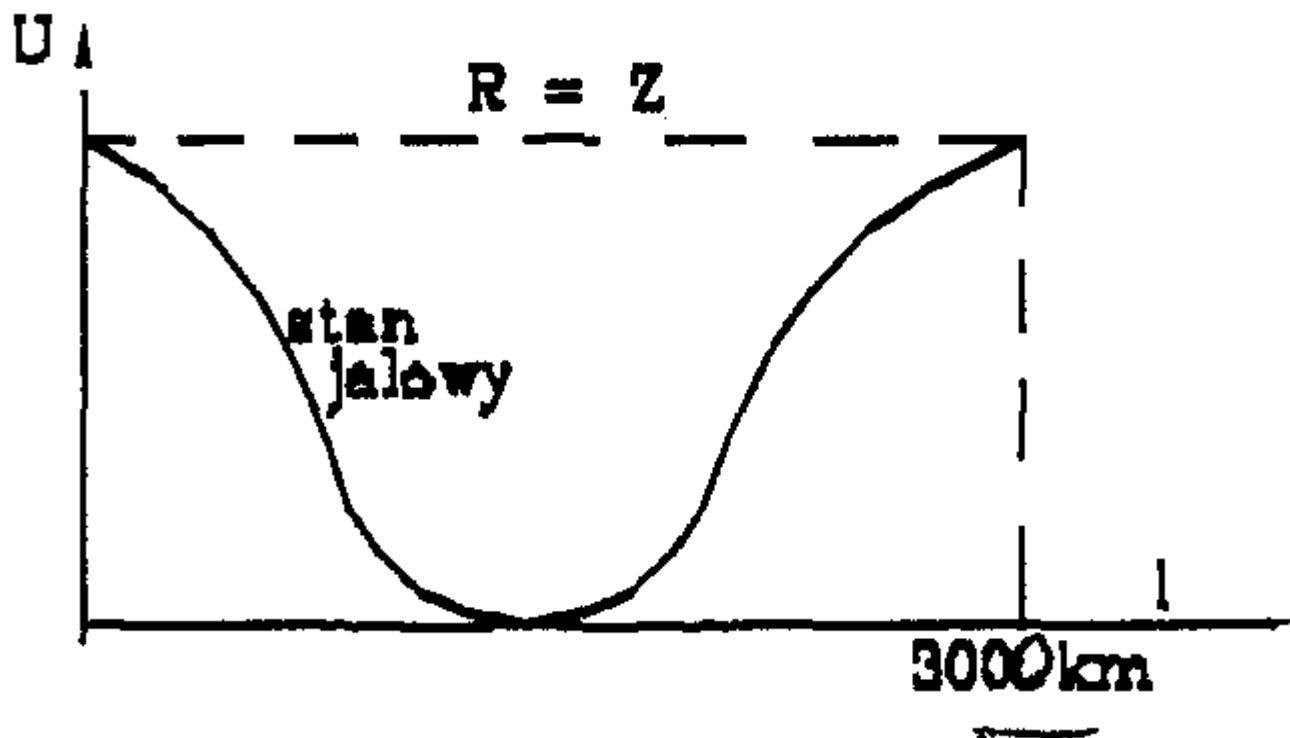
- $l = 300$ km krotność przebiegu wyniesie $|U_2/U_1| = 1.05$,
- $l = 500$ km krotność przebiegu wyniesie $|U_2/U_1| = 1.15$.

Przebiegi tego typu nie występują, gdy na końcu linii obciążenie równe jest impedancji falowej linii $Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$ (szerzej o impedancji falowej patrz rozdz. 10), gdzie L i C to parametry rozłożone linii długiej czyli linii, której długość jest porównywalna z długością fali napięciowej.

W celu ograniczenia przebiegów Ferrantiego jest stosowana, w długich liniach UHV, tzw. poprzeczna kompensacja pojemności doziemnych linii za pomocą indukcyjności (dławików) włączanych między przewody fazowe a ziemię. Kompensuje się w ten sposób moc pojemnościową linii i ujednolica napięcie wzdłuż linii. W Polsce kompensacja taka jest zrealizowana np. w linii 750 kV.

Dodatni wpływ na tego typu przebiegi ma również tzw. kompensacja podłużna linii polegająca na włączeniu szeregowo z linią baterii kondensatorów służących do kompensacji reaktancji indukcyjnej linii.

Problem wzrostu napięcia na końcu linii względem napięcia na jej początku zanika wówczas, gdy linia ma długość równą połowie długości fali λ , tzw. linia półfalowa. Na końcu linii napięcie ma wtedy tę samą wartość bezwzględną i przeciwną fazę względem początku (rys. 8.1). Długości półfalowe będą osiągnane w przyszłościowych liniach EHV.



Rys. 8.1. Napięcie wzdłuż linii o długości półfalowej [28]

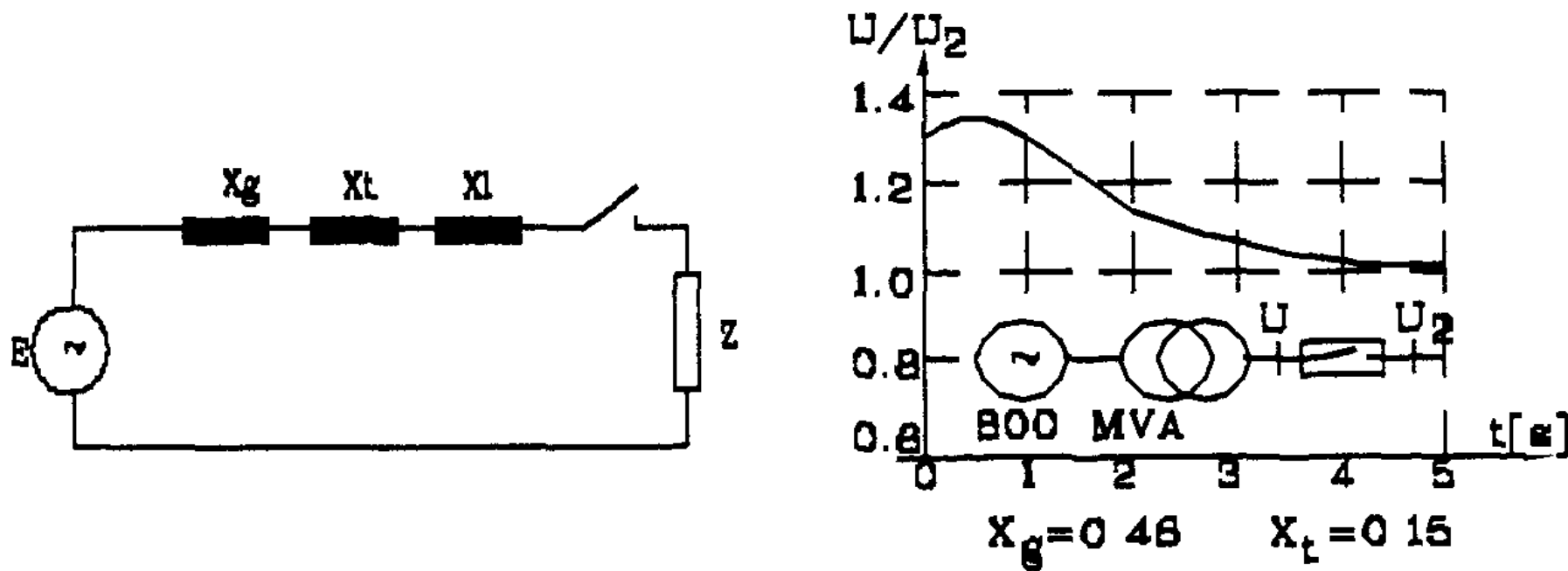
Warunki linii półfalowej można uzyskać w sposób sztuczny, przy mniejszych długościach linii, wprowadzając do linii możliwie jednostajnie rozłożone dodatkowe indukcyjności szeregowo i pojemności równoległe zmieniając w ten sposób długość fali:

$$\lambda = \frac{1}{f \cdot \sqrt{(L + \Delta L) \cdot (C + \Delta C)}} \quad (8.2)$$

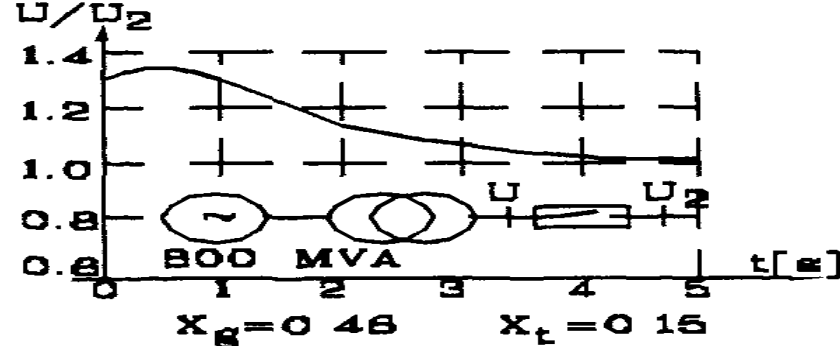
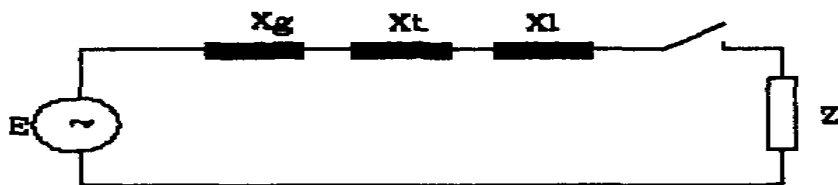
Wielką zaletą linii o długości półfalowej jest to, że napięcia na obu jej końcach są jednakowe co do wartości, a przeciwne co do fazy i są niezależne od obciążenia (w linii bez strat). Linia o długości półfalowej jest w fragmencie eksploatowana w ZSRR i ma służyć do przesyłu mocy z Syberii na Ural.

8.2.2. Przepięcia przy zrzucie obciążenia

Do uproszczonej analizy przebiegów powstających przy wyłączeniu obciążenia można wykorzystać prosty schemat jak na rysunku 8.2, uwzględniający źródło energii o sile elektromotorycznej E , transformator, linię, wyłącznik i odbiornik. Na rysunku 8.2a podano schemat jednofazowy uwzględniający jedynie indukcyjności poszczególnych elementów obwodu. Pominięto pojemności, rezystancje i upływności linii, transformatora i generatora.



Rys. 8.2. Przepięcia przy zrzucie obciążenia: a) uproszczony schemat, b) przykładowa zależność krotności przepięcia od czasu



Dla schematu z rysunku 8.2a można napisać wzór na napięcie \underline{U}_2 na końcu linii przed wyłączeniem odbiornika \mathbf{Z}_2 :

$$U_2 = \frac{E \cdot Z_2}{Z_2 + jX} \quad (8.3)$$

Po wyłączeniu, gdy prąd przestanie płynąć, na końcu linii pojawi się napięcie $\underline{U}_2 = \underline{E}$. Zatem krotność przepięcia wyniesie:

$$k_2 = \left| \frac{E}{U_2} \right| = \left| \frac{Z_2 + jX}{Z_2} \right| = \sqrt{1 + \left(\frac{X}{Z_2} \right)^2} \pm 2 \cdot \frac{X}{Z_2} \cdot \sin(\varphi) \quad (8.4)$$

przy czym "+" odpowiada obciążeniu indukcyjnemu, a "-" pojemnościowemu.

Uwzględnienie C, R, G linii znacznie komplikuje rozważania. Stan, w którym występuje przepięcie określone wzorem trwa jednak krótko - jeden lub dwa okresy. Odciążenie generatora powoduje wzrost jego obrotów, zadziałanie regulatorów napięcia i sprowadzenie napięcia do normalnego poziomu.

Największe przepięcia przy zrzucie obciążenia powstają w elektrowniach wodnych wskutek dużej bezwładności układów regulacji hydrogeneratorów. Przepięcia tego typu ogranicza się poprzez:

- wielokrotne powiązania sieci, nie dopuszczające do sytuacji, w której cała moc generatora byłaby przesyłana tylko jedną linią;
- przestrzeganie odpowiedniej kolejności wyłączania, np. w przypadku jak na rysunku 8.2 należy w pierwszej kolejności wyłączyć generatora a dopiero później na końcu linii; unika się w ten sposób nakładania się przepięć dodatkowo od efektu Ferrantiego i od zmiany charakteru obciążenia z indukcyjnego Z_2 na pojemnościowe obciążenie linii.

Krotności przepięć powstających przy zrzucie obciążenia wahają się od 1.1 w sieciach rozgałęzionych do 1.7 w przypadku elektrowni wodnych. W sieciach ŚN nie występują. Dwa powyższe przypadki to najbardziej popularne przykłady długotrwałych przepięć małej częstotliwości, występujących symetrycznie we wszystkich fazach.

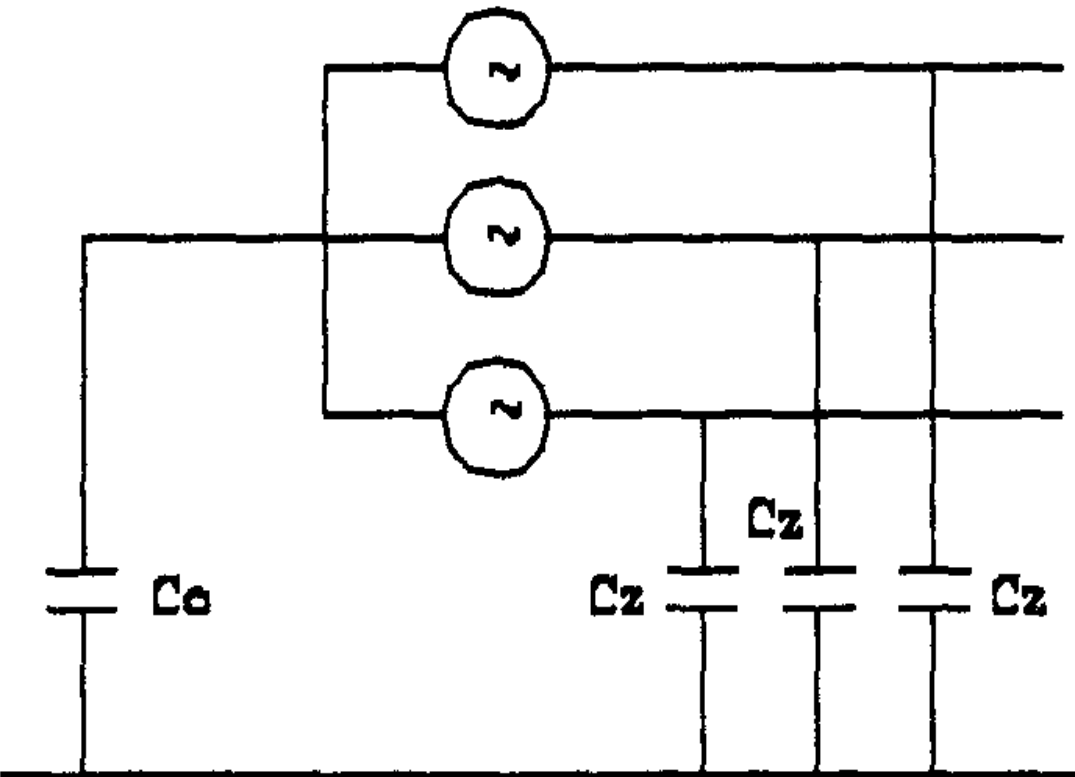
Przykłady symetrycznych przepięć rezonansowych można mnożyć, włączając w to przepięcia rezonansowe dla wyższych harmoniczných jak i dla podharmoniczných - szczególnie dla częstotliwości 1/3 50 Hz.

8.3. PRZEPĘCIA ASYMETRYCZNE

8.3.1. Wprowadzenie

Przepięcia długotrwałe asymetryczne są to głównie przepięcia ziemnozwarciowe w tym przede wszystkim wywołane zwarciami jednofazowymi. Przepięcia tego typu odgrywają dużą rolę w sieciach ŚN pracujących z izolowanym punktem zerowym. Stosowane w sieciach WN, poczynając od 110 kV, uziemianie punktu zerowego sieci jest skutecznym sposobem ograniczania tego typu przepięć. W krajach zachodnich również sieci rozdzielcze buduje się ostatnio jako czteroprzewodowe z czwartym, odpowiednio zwymiarowanym i dobrze uziemionym przewodem zerowym, co pozwala znacznie ograniczyć przepięcia a tym samym zwiększyć niezawodność i zmniejszyć koszty izolacji przy jednoczesnym poprawieniu warunków bezpieczeństwa.

Jednakże w Polsce typowym przykładem sieci rozdzielczej ŚN jest sieć z izolowanym punktem zerowym (rys. 8.3). W przypadku jednofazowego zwarcia z ziemią sieć taka może nadal pracować gdyż prąd zwarcia zamyka się na drodze pojemnościowej poprzez pojemności sieci C_z .



Dopuszczalne prądy zwarcia jednofazowego doziemnego, w dużych rozgałęzionych sieciach z izolowanym punktem zerowym wynoszą:

30 A dla sieci 3÷6 kV

20 A dla sieci 10 kV

15 A dla sieci 15÷20 kV

10 A dla sieci 30÷40 kV

5 A dla sieci 60 kV

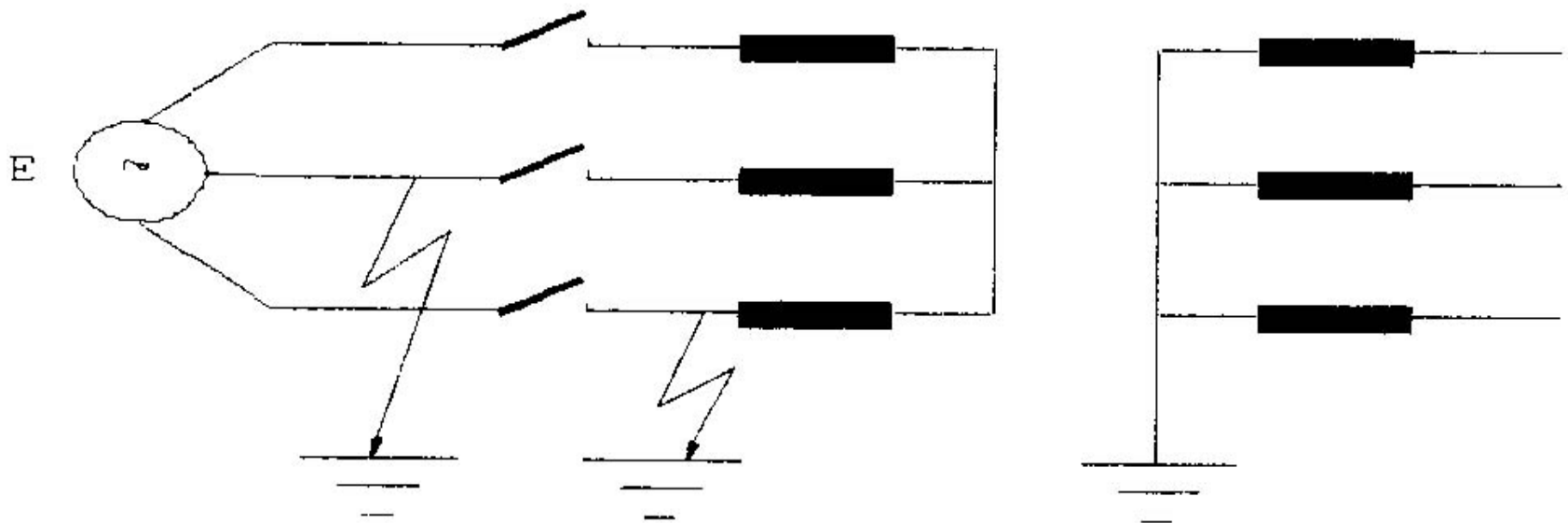
Rys. 8.3. Uproszczony schemat zastępczy sieci z izolowanym punktem zerowym

Wymagania te wynikają z możliwości samoistnego zgaszenia łuku elektrycznego w przypadku, gdy zwarcie ma charakter łukowy. Gdy przewidywane prądy jednofazowego zwarcia doziemnego przekraczają podane wyżej wartości to wówczas należy stosować środki ograniczające prąd zwarciov.

Układ sieci z izolowanym punktem zerowym ma poważne wady, do których należy zaliczyć:

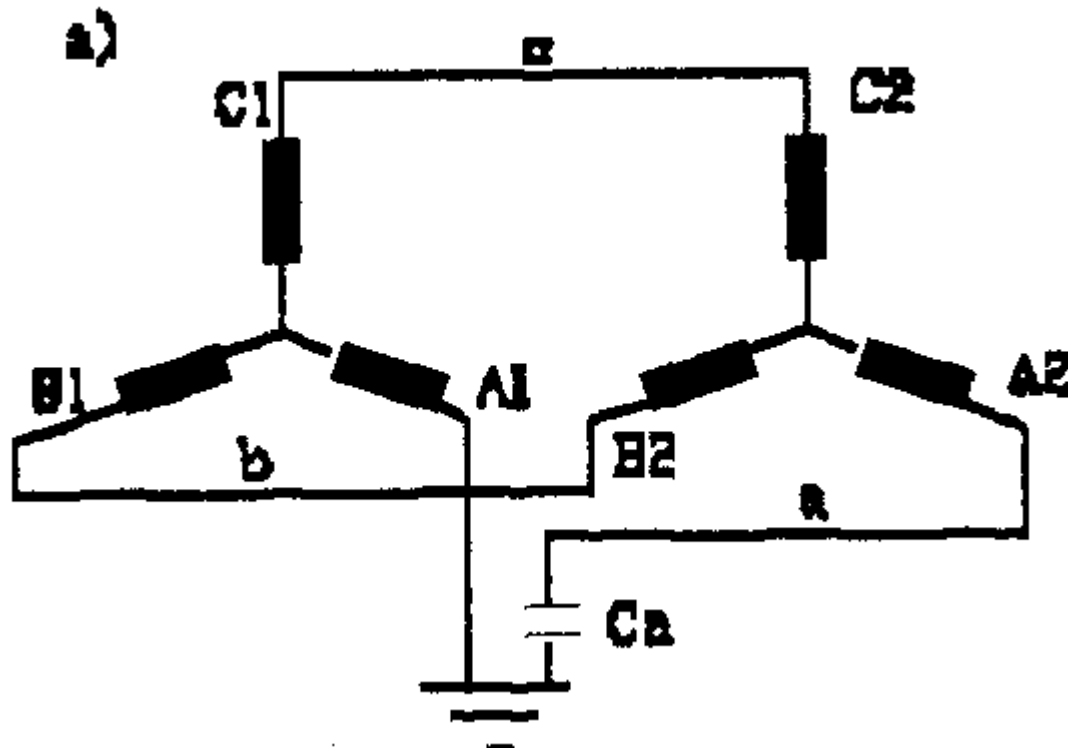
- występowanie na fazach zdrowych (bez zwarcia) wzrostu napięcia do wartości napięcia międzyprzewodowego, czyli do przepięcia o krotności $k = \sqrt{3} \approx 1.73$;
- wzrost napięcia w punktach gwiazdowych transformatorów do wartości napięcia fazowego;

- występowanie dużych przebiegów na izolacji międzystykowej wyłączników; przykładowo, w układzie jak na rysunku 8.4, gdy mała elektrownia pracuje na linię ŚN o izolowanym punkcie gwiazdowym, przy zwarcia doziemnym jednej fazy np. za wyłącznikiem, na izolację międzystykową wyłączników faz zdrowych działa przebieg o krotności $k \approx 1.73$. W przypadku gdy dodatkowo wystąpi zwarcie przed wyłącznikiem na jednej z dwóch faz zdrowych, na izolacji międzystykowej wystąpi przebieg o krotności $k = 2 \cdot \sqrt{3} \approx 3.5$. Zatem izolacja międzystykowa aparatów ŚN musi spełniać bardzo wysokie wymagania;
- skłonność sieci z izolowanym punktem zerowym do powstawania w nich przebiegów ferrorezonansowych.

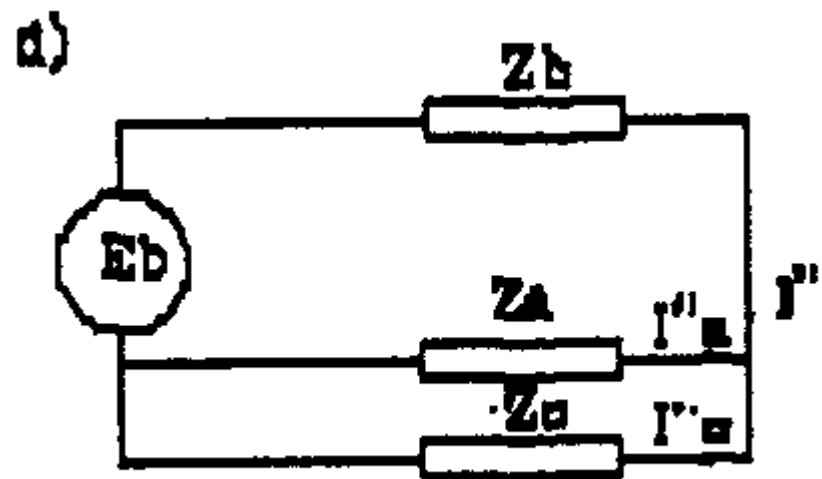
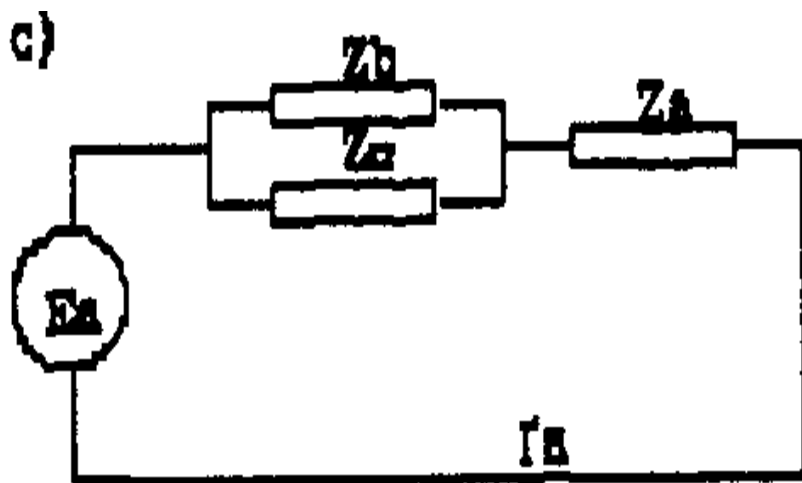
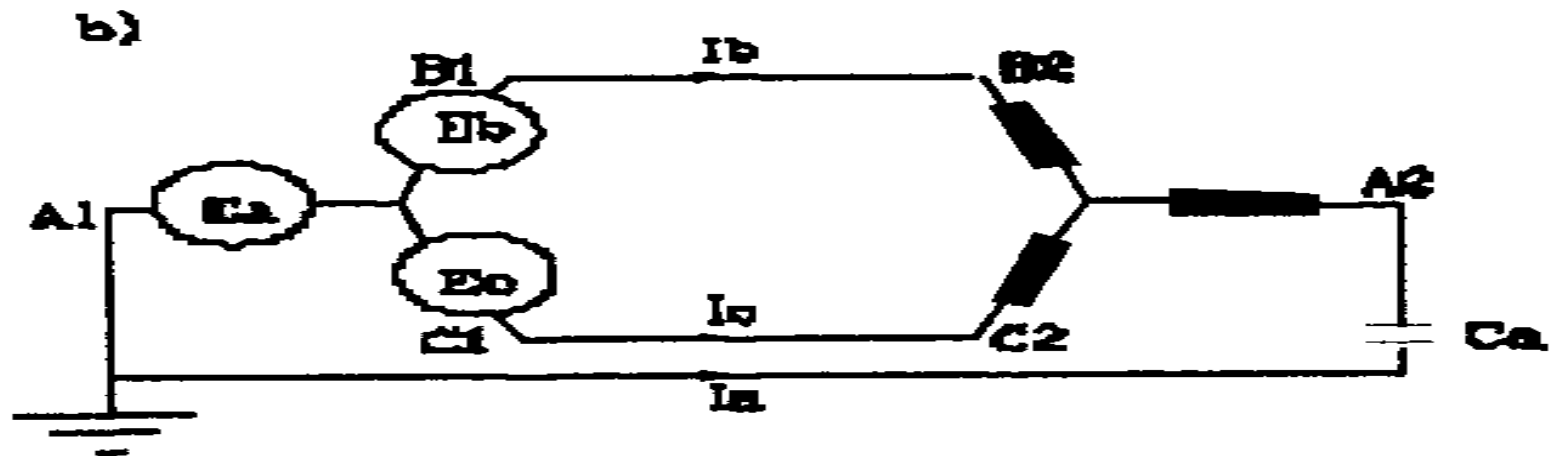


8.3.2. Przepięcia ferorezonansowe w sieci z izolowanym punktem zerowym

Przykładowo dany jest schemat jak na rysunku 8.5a, gdzie pokazano linię łączącą duży transformator T_1 z niewielkim, nie obciążonym transformatorem rozdzielczym T_2 . W takim przypadku można, z pewnym przybliżeniem, traktować transformator T_1 jako sztywne źródło napięcia a transformator T_2 jako czysto indukcyjne obciążenie (dławik).



Na rysunku 8.5b zestawiono schemat zastępczy dla rozważanego przypadku. Posługując się metodą superpozycji uzyskuje się cząstkowe schematy zastępcze jak na rysunkach 8.5cd.



Dodając prądy płynące w fazie **a** pod wpływem każdego z napięć fazowych, przy założeniu, że w fazach zdrowych są jednakowe indukcyjności $\mathbf{L}_b = \mathbf{L}_c = \mathbf{L}$ czyli że $\mathbf{Z}_b = \mathbf{Z}_c = \mathbf{Z} = \omega \mathbf{L}$ uzyskuje się:

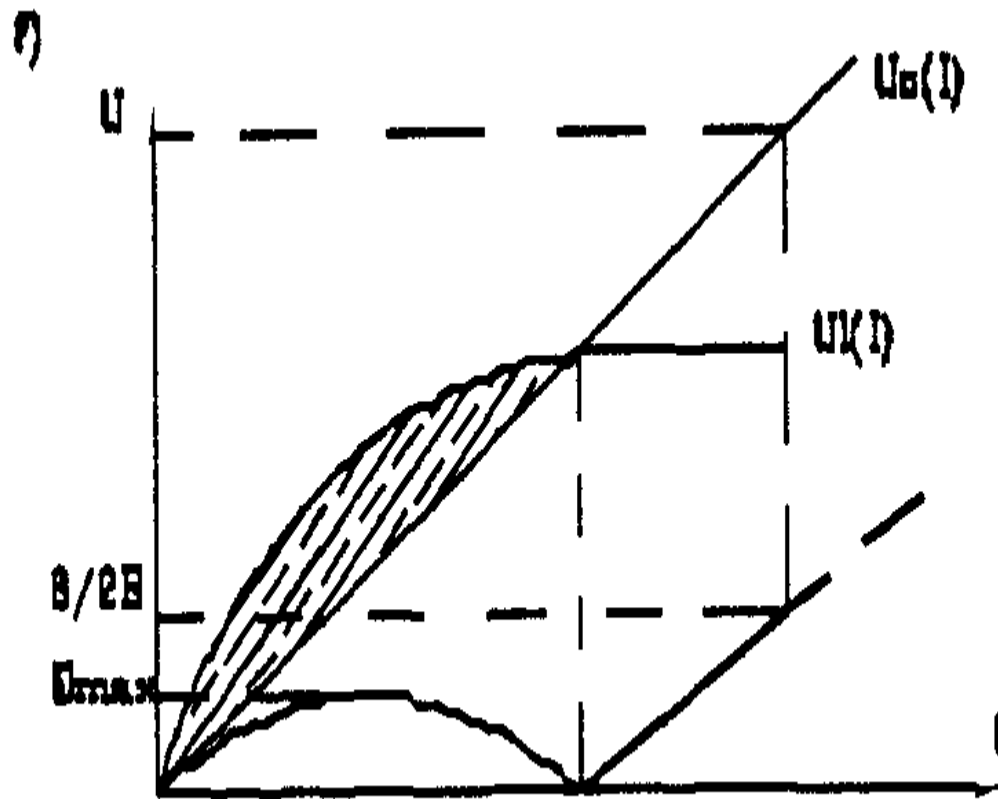
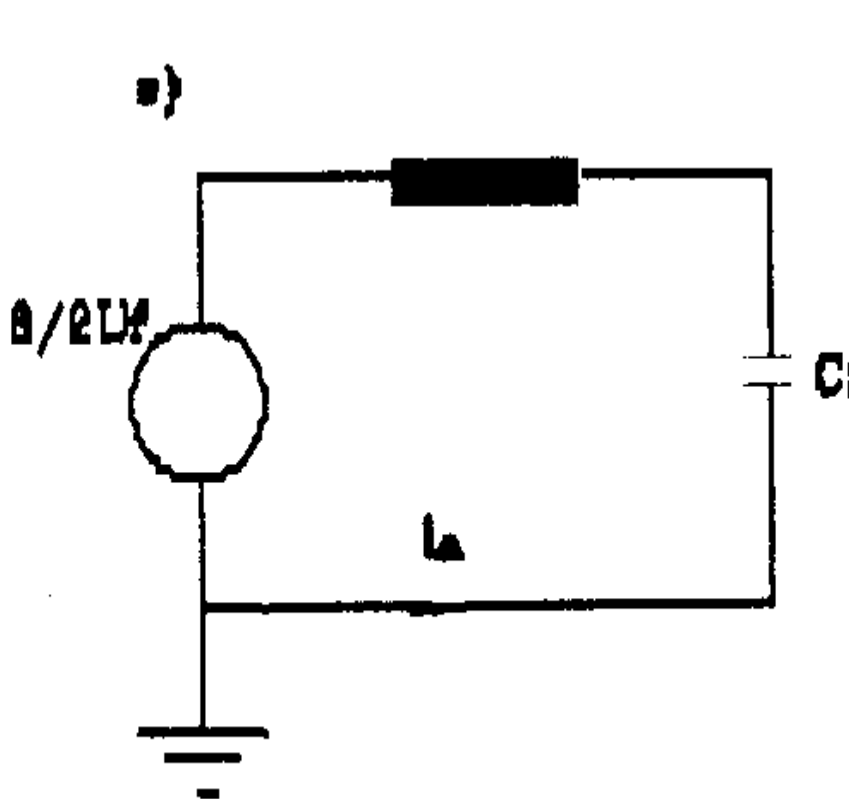
$$\begin{aligned}
 I_a &= \frac{E_a}{Z_a + \frac{Z}{2}} - \frac{E_b}{Z + \frac{Z \cdot Z_a}{Z + Z_a}} \frac{Z}{Z + Z_a} - \frac{E_c}{Z + \frac{Z \cdot Z_a}{Z + Z_a}} \frac{Z}{Z + Z_a} = \\
 &= \frac{E_a}{Z_a + \frac{Z}{2}} - \frac{E_b}{2 \cdot Z_a + Z} - \frac{E_c}{2 \cdot Z_a + Z} = \frac{E_a - \frac{E_b + E_c}{2}}{Z_a + \frac{Z}{2}}
 \end{aligned} \tag{8.5}$$

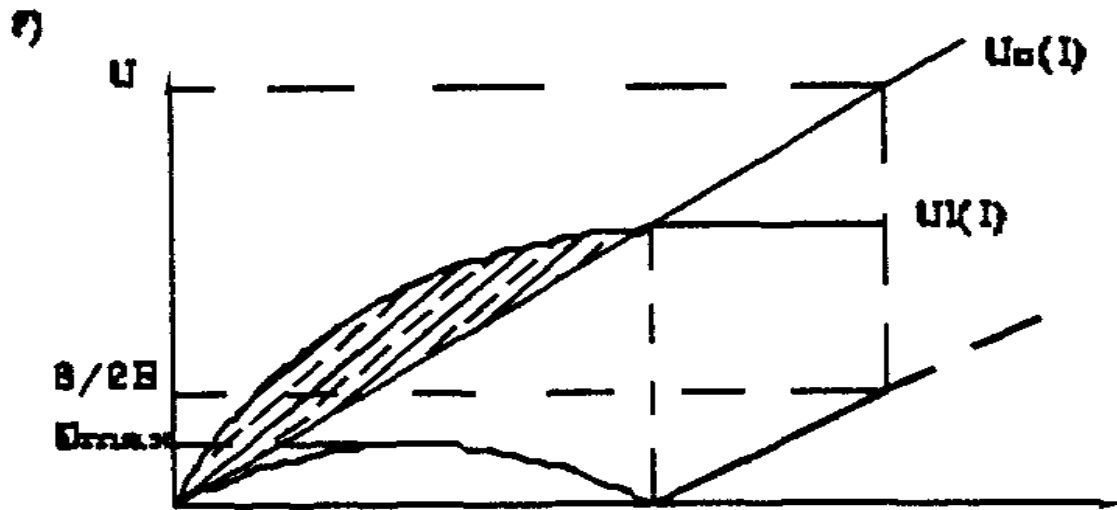
W przypadku symetrycznego źródła trójfazowego $\underline{\mathbf{E}}_a = \underline{\mathbf{E}}_b = \underline{\mathbf{E}}_c = \underline{\mathbf{U}}_f$, gdzie $\underline{\mathbf{U}}_f$ jest napięciem fazowym, stąd:

$$I_a = \frac{1.5 \cdot U_f}{Z_a + \frac{Z}{2}} = \frac{1.5 \cdot U_f}{Z_{ca} + 1.5 \cdot Z_L} \tag{8.6}$$

gdzie $\underline{\mathbf{Z}}_a = \underline{\mathbf{Z}}_L + \underline{\mathbf{Z}}_{Ca}$.

Zatem ostateczny schemat zastępczy będzie miał postać jak na rysunku 8.5e. Jest to typowy schemat ferrezonansu, dla którego wykresy napięć w funkcji prądu mają postać jak na rysunku 8.5f.





Analizując schemat z rysunku 8.5e oraz przebiegi napięciowe z rysunku 8.5f można wyodrębnić następujące zjawiska:

- na fazie uszkodzonej wystąpi gwałtowny wzrost napięcia o krotności:

$$k_{ferr} = \frac{U_c}{E} = 4 \div 5 \quad (8.7)$$

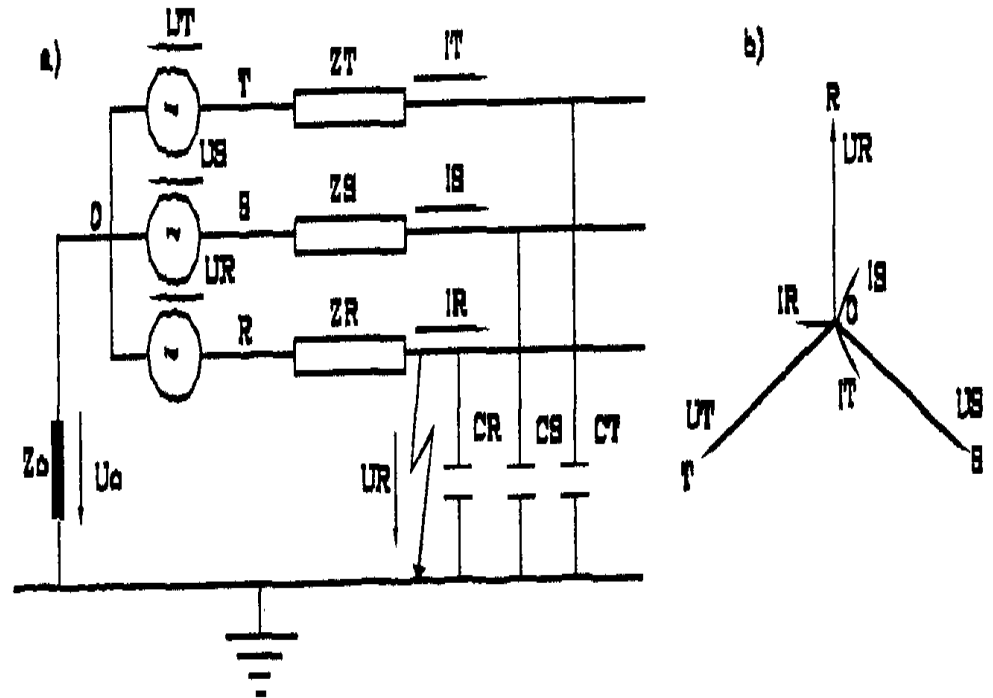
gdzie $E = U_f = \frac{U_m}{\sqrt{3}}$; przepięcie to zazwyczaj uszkadza izolację

- wskutek gwałtownego wzrostu napięcia między zaciskami A_1 i A_2 transformatorów i wskutek zmiany fazy tego napięcia u odbiorców zmieni się kolejność faz, tzn. pracujące maszyny elektryczne zechcą wirować w przeciwną stronę, przy czym zaistnieje to w sposób udarowy.

W praktyce, na szczęście nie jest to przypadek zbyt częsty. Znacznie łagodzą zjawisko rezystancje obwodu i już przy niewielkim obciążeniu transformatora T_2 ferrorezonans nie wystąpi. Należy jednak uznać, że sieci z izolowanym punktem zerowym są wprawdzie bardzo proste i tanie lecz bardzo awaryjne.

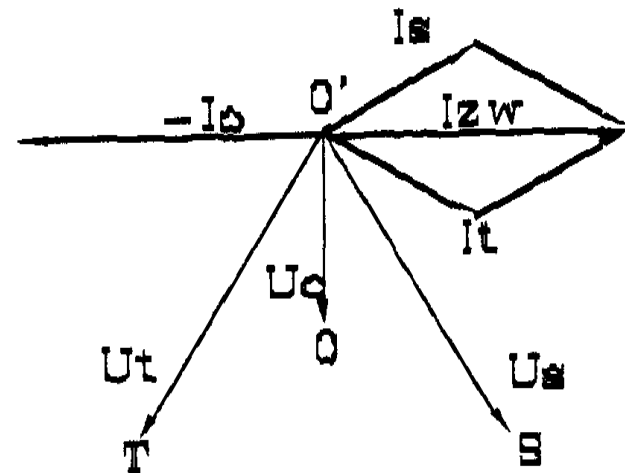
8.3.3. Kompensacja prądów ziemnozwarciowych

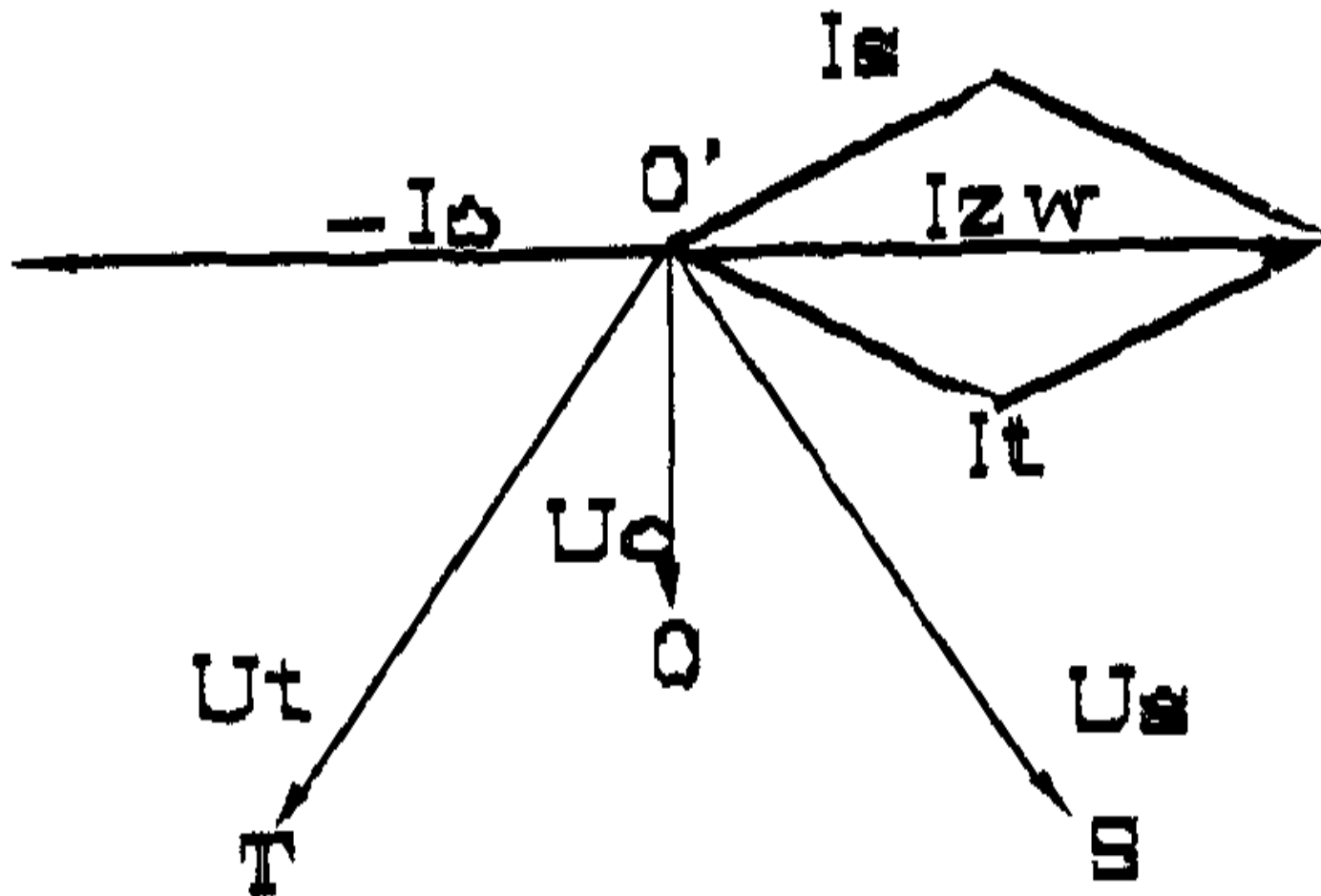
W przypadku gdy prąd zwarcia przekracza podane w rozdziale 8.3.1 wartości dopuszczalne jest konieczne stosowanie środków ograniczających jego wartość. Jeśli w sieci z izolowanym punktem zerowym wystąpi jednofazowe zwarcie doziemne to w obwodzie popłynie pojemnościowy prąd zwarcia (rys. 8.6) będący sumą prądów w fazach zdrowych.



Rys. 8.6. Kompensacja ziemnozwarciowa:

- a) obwód sieci z izolowanym punktem zerowym,
- b) wykres wskazowy przed zwarciem fazy R,
- c) wykres wskazowy po zwarciu fazy R





$$I_{zw} = I_S + I_T = I_S \cdot 2 \cdot \cos(30^\circ) = \sqrt{3} \cdot I_S = \sqrt{3} \cdot U_S \cdot \varpi \cdot C \quad (8.8)$$

przy czym prąd I_S płynie pod wpływem napięcia $U_S = U_m = \sqrt{3} \cdot U_f$, stąd:

$$I_{zw} = \sqrt{3} \cdot U_f \cdot \sqrt{3} \cdot \varpi \cdot C = 3 \cdot \varpi \cdot C \cdot U_f \quad (8.9)$$

Zatem by skompensować ten prąd należy wprowadzić do obwodu prąd indukcyjny równy co do wartości bezwzględnej prądowi I_{zw} , czyli:

$$I_{ind} = I_{zw} \quad \text{lub} \quad \frac{U_0}{\omega \cdot L} = 3 \cdot U_f \cdot \omega \cdot C$$

a ponieważ $U_0 = U_f$ stąd, dla uzyskania pełnej kompensacji prądu zwarcia jednofazowego, musi zostać spełniony warunek:

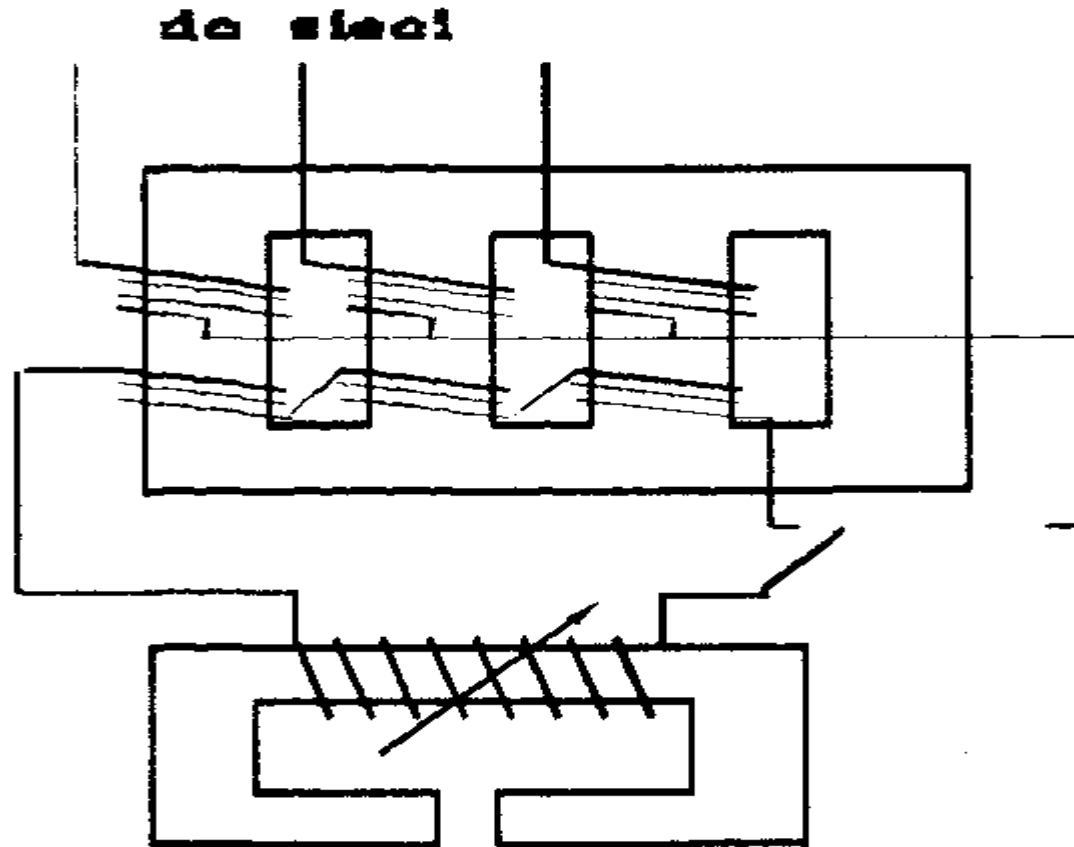
$$\omega \cdot L = \frac{1}{3 \cdot \omega \cdot C} \quad (8.10)$$

W układach praktycznych oczywiście taka idealna kompensacja jest niemożliwa ze względu na prądy czynne, które nie dają się skompensować. Realizacja praktyczna warunku (8.10) polega na dołączeniu do zacisku gwiazdowego transformatora odpowiedniej cewki zwanej dławikiem Petersena. Zastosowanie kompensacji daje następujące korzyści:

- a) samorzutne wygaszanie łuku w przypadku zwarć łukowych;
- b) likwidacja przepięć i niebezpieczeństw ferorezonansu;
- c) wzrost bezpieczeństwa ze względu na zmniejszenie prądów zwarcia, a tym samym napięć krokowych w pobliżu miejsca zwarcia.

Wadą jest konieczność regulacji indukcyjności dławika wraz ze zmianami konfiguracji sieci (czyli ze zmianami pojemności sieci). Współcześnie w dobie automatyzacji stosuje się regulatory nadążające np. za zmianami asymetrii sieci, które warunkują wielkość napięcia punktu gwiazdowego transformatora. Układ dostraja się zwykle na przewagę indukcyjności, co ogranicza możliwości spotęgowania skutków niesymetrii napięciowej sieci.

Cewkę Petersena można podłączyć tylko do punktów gwiazdowych transformatorów o dużej mocy i odpowiedniej konstrukcji rdzenia (rdzeń trójkolumnowy) lub posiadającego przynajmniej jedno uzwojenie połączone w trójkąt. Gdy takie warunki nie mogą być spełnione lub gdy punkt gwiazdowy jest niedostępny to można zastosować np. tzw. transformator Baucha (rys. 8.7). Jest to jednakże układ ogólnie droższy mimo iż sam dławik jest tańszy.



Rys. 8.7. Transformator Baucha

8.3.4. Przepięcia asymetryczne w sieciach z uziemionym punktem zerowym

W przypadku asymetrii wywołanej zwarcie jednofazowym w sieciach trójfazowych stosuje się do analizy teorię składowych symetrycznych. W miejscu zwarcia, np. w fazie **a**, włącza się zastępcze źródło napięcia $\underline{E} = \frac{U_m}{\sqrt{3}}$, gdzie U_m jest napięciem międzyprzewodowym sieci przed zwarcie. Prąd zwarcia w fazie **a** oraz jego składowe symetryczne wynoszą:

$$I_1 = I_2 = I_0 = \frac{1}{3}I_a = \frac{E}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (8.11)$$

gdzie \underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 , \underline{Z}_0 to odpowiednie impedancje dla składowych symetrycznych widziane z miejsca zwarcia, przy czym dla składowej zerowej traktuje się trzy przewody sieci jako połączone równolegle.

W oparciu o prąd można obliczyć składowe napięcia na fazie zdrowej, np. na fazie **b**, uzyskując dla poszczególnych składowych symetrycznych:

$$\left. \begin{array}{l} a) \ U_1 = E \cdot \left(1 - \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \right) = \frac{Z_2 + Z_0}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \cdot E \\ b) \qquad \qquad \qquad U_2 = -E \cdot \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \\ c) \qquad \qquad \qquad U_0 = -E \cdot \frac{Z_0}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \end{array} \right\} \quad (8.12)$$

Stąd przechodząc do wielkości rzeczywistych można obliczyć napięcie na fazie **b**:

$$U_b = a^2 \cdot U_1 + a \cdot U_2 + U_0 \quad (8.13)$$

gdzie **a** jest operatorem obrotu $a = \exp(j120^\circ) = \cos(120^\circ) + j \sin(120^\circ)$.

Z wzoru (8.13) po prostych przekształceniach i po obliczeniu wartości bezwzględnych oraz przy założeniu, że rezystancje są pomijalnie małe, uzyskuje się krotność przebiecia przy jednofazowym zwarcu doziemnym:

$$k_{as} = \left| \frac{U_b}{E} \right| = \frac{\sqrt{X_0^2 + X_0 \cdot X_2 + X_2^2}}{X_0 + X_1 + X_2} \quad (8.14)$$

W pobliżu elektrowni można przyjąć, że jest spełniony warunek $X_1 \approx X_2$ i zawsze jest spełniona nierówność $X_0/X_1 > 1$. Przyjmując przykładowo, że $X_0/X_1 = 3$ można obliczyć $k_{as} \approx 1.25$, czyli że na fazie zdrowej wystąpi **25%** wzrostu napięcia względem napięcia fazowego.

$$k_{as} := \frac{\sqrt{3^2 + 3 + 1}}{3 + 1 + 1} \cdot \sqrt{3} \quad k_{as} = 1.249$$

W dokładniejszych obliczeniach trzeba uwzględnić rezystancje, stąd:

$$k_{as} = f\left(\frac{X_0}{X_1}; \frac{R_0}{X_1}\right) \quad (8.15)$$

Współczynnik $k_{su} = \frac{k_{as}}{\sqrt{3}}$ nosi nazwę współczynnika skuteczności uziemienia. W

cytowanym wyżej przykładzie obliczeń $k_{su} = 0.72$. Ogólnie jeśli $k_{su} < 0.8$ to mówi się o sieci skutecznie uziemionej a współczynnik k_{su} określa jaką maksymalną wartość może mieć przepięcie przy jednofazowym zwarcu z ziemią odniesione do wartości maksymalnego napięcia międzyprzewodowego sieci. Podana wyżej nierówność musi być spełniona w dowolnym punkcie sieci.

Jak widać w sieciach ze skutecznie uziemionym punktem zerowym napięcie fazowe, przy zwarcu jednofazowym, rośnie minimalnie nie osiągając napięcia międzyprzewodowego. W sieci takiej mogą natomiast wystąpić duże prądy zwarcia a co za tym idzie duże napięcia krokowe. Jednakże duże prądy zwarcia, znacznie większe od prądów roboczych, są bardzo szybko wyłączane przez zabezpieczenia nadprądowe. Takie zabezpieczenia nie mogą być stosowane w sieciach o izolowanym punkcie zerowym, gdzie prąd zwarcia jest znacznie niższy niż prądy robocze.

Dla ułatwienia sprawdzenia skuteczności uziemienia stosuje się następujące warunki:

$$\frac{X_0}{X_1} \leq 3; \quad \frac{R_0}{X_1} \leq 1 \quad (8.16)$$

Przy spełnieniu warunków $\frac{X_0}{X_1} \leq 2; \quad \frac{R_0}{X_1} \leq 0.5$ współczynnik k_{su} jest równy **0.75**.

Do problematyki współczynnika skuteczności uziemienia nawiązano również w rozdziale 12 przy omawianiu zagadnienia doboru ograniczników przepięć.

8.4. PRÓBY NAPIĘCIEM PRZEMIENNYM

8.4.1. Napięcia probiercze urządzeń ŚN

W sieciach średnich napięć gdzie przebiecia długotrwałe (zwane również dorywczymi lub czasowymi) są stosunkowo duże i gdzie izolacja elektryczna jest czasem dobierana z innych niż elektryczne względów (np. izolacja zwojowa uzwojeń transformatorów rozdzielczych ma minima technologiczne wynikające z narażeń mechanicznych podczas nawijania i montażu uzwojeń), wystarczającym sposobem kontrolowania wytrzymałości elektrycznej izolacji jest sprawdzenie jej przy napięciu przemiennym o odpowiednio dobranej, większej niż wartość znamionowa wartości napięcia.

Tak dobrane napięcia noszą nazwę **napięć probierczych**. Można więc mówić, że napięcia probiercze to po prostu sztucznie wytwarzane przebiecia.

Zatem, tak jak sklasyfikowano w rozdziale 2.3 przepięcia, tak również można podzielić napięcia probiercze na:

- przemienne napięcie probiercze;
- napięcie probiercze udarowe łączeniowe;
- napięcie probiercze udarowe piorunowe;
- stałe napięcie probiercze (w przypadku izolacji pracującej w warunkach napięcia stałego).

Czasem, np. w przypadku kabli pracujących przy napięciu przemiennym dopuszcza się próby zastępcze wykonywane przy napięciu stałym.

Tak więc dla układów izolacyjnych ŚN zasadniczym napięciem probierczym jest napięcie probiercze przemienne tzw. jednominutowe, co oznacza, że napięcie to jest utrzymywane przez 1 min i jeśli w tym czasie nie wystąpi przeskok lub przebicie to uznaje się, że układ izolacyjny posiada zadowalające właściwości z punktu widzenia wytrzymałości elektrycznej.

Wartości napięć probierczych podawane są w odpowiednich normach przedmiotowych dla określonych wyrobów. Orientacyjnie można podać następujące formuły dla napięć probierczych w poszczególnych grupach wyrobów ŚN:

| | | | |
|----|--|--------------------------------|------|
| I | Grupa kablowa | $U_{pr} = 1.5 \cdot U_n + 2.5$ | [kV] |
| II | Grupa transformatorowa (dławiki, transformatory, przekładniki napięciowe) | $U_{pr} = 2.0 \cdot U_n + 10$ | [kV] |
| II | Grupa wyłącznikowa (wyłączniki, przekładniki prądowe, wszelkiego typu izolatory) | $U_{pr} = 2.2 \cdot U_n + 20$ | [kV] |
| IV | Izolacja międzystykowa (odłączniki i podstawy bezpiecznikowe) | $U_{pr} = 3.3 \cdot U_n + 20$ | [kV] |

Traktując napięcia probiercze jako przepięcia do obliczenia ich krotności przyjmuje się, jako napięcie odniesienia, maksymalne fazowe napięcie robocze $\frac{U_m}{\sqrt{3}}$ (patrz rozdz. 2.2) gdzie dla $U_m = 1.2 \cdot U_n$ (U_n - napięcie znamionowe) czyli względem $1.2 \frac{U_n}{\sqrt{3}}$, zatem krotności napięć probierczych względem napięcia znamionowego wyniosą:

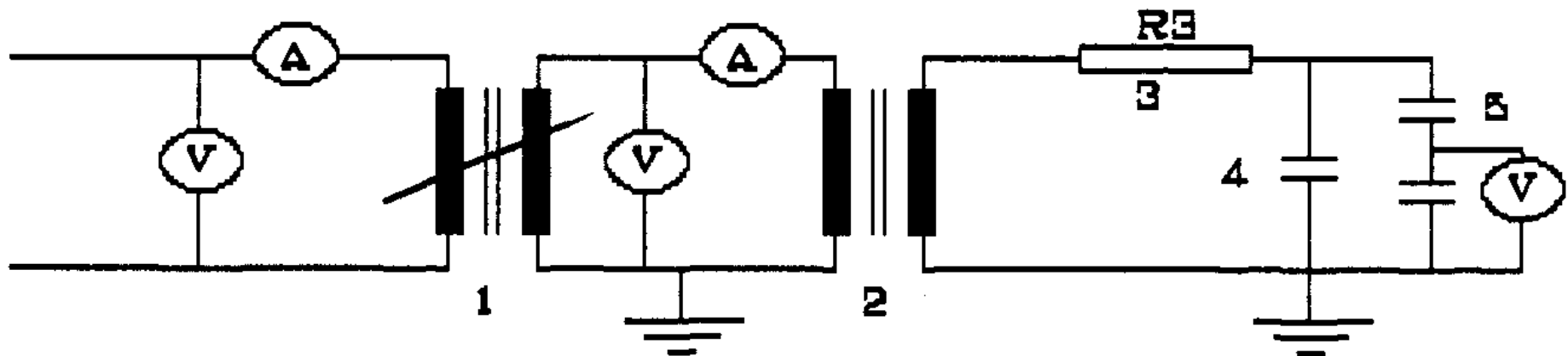
| Wzór | Przykładowy wynik dla $U_n = 15 \text{ kV}$ |
|-------------------------------------|---|
| $k_{prI} = 2.2 + \frac{3.6}{U_n}$ | 2.45 |
| $k_{prII} = 2.9 + \frac{14.5}{U_n}$ | 3.90 |
| $k_{prIII} = 3.2 + \frac{29}{U_n}$ | 5.10 |
| $k_{prIV} = 4.8 + \frac{29}{U_n}$ | 6.70 |

8.4.2. Układy probiercze

8.4.2.1. Schemat obwodu probierczego

Typowy układ probierczy do prób napięciem przemiennym składa się z (rys.8.8):

1. niskonapięciowego regulatora napięcia o liniowej charakterystyce regulacyjnej;
2. transformatora probierczego lub kaskady transformatorów o prądzie znamionowym zwykle wynoszącym 1 A;
3. elementów tłumiących o rezystancji $5 \div 50 \Omega/\text{kV}$;
4. obiektu badanego reprezentowanego przez pojemność;
5. układu do pomiaru napięcia.

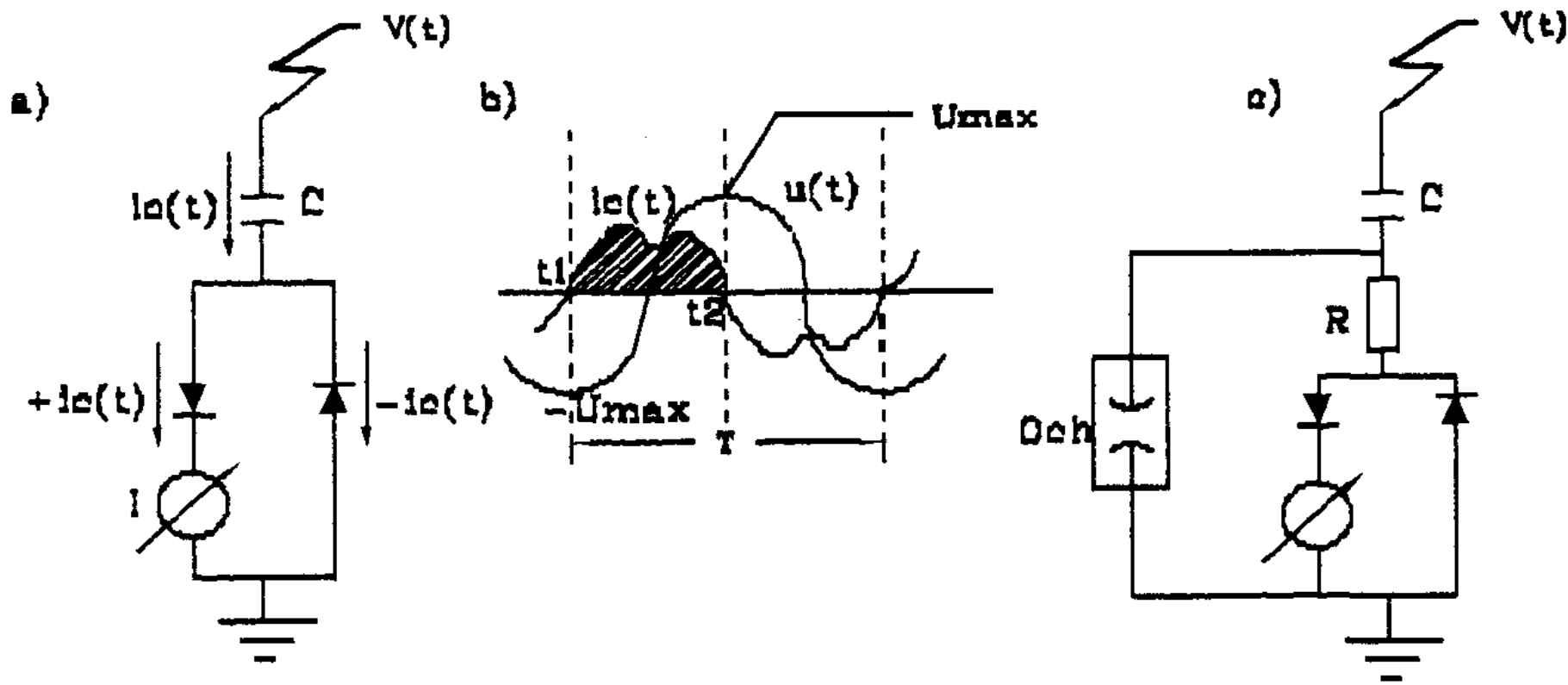


Rys. 8.8. Typowy układ laboratoryjny do prób napięciem przemiennym:
1 - regulowane źródło napięcia, 2 - transformator probierczy, 3 - rezystor tłumiący,
4 - obiekt badany, 5 - dzielnik napięcia

8.4.2.2. Pomiar napięcia

W najprostszym przypadku do pomiaru wysokiego napięcia przemiennego można wykorzystać iskiernik kulowy, dla którego przy określonej średnicy kul w normalnych warunkach atmosferycznych normy i podręczniki podają wartości napięcia przeskoku w funkcji odległości elektrod.

Współcześnie jednakże do pomiaru napięcia stosuje się mierniki wartości szczytowej o zasadzie działania zilustrowanej na rysunku 8.9.



Rys. 8.9. Miernik wartości szczytowej: a) schemat podstawowy, b) zasada pomiaru, c) schemat praktyczny

Prąd płynący przez pojemność **C** jest wyrażony zależnością:

$$i_C = C \cdot \frac{dU_C}{dt} \tag{8.17}$$

Mikroamperomierz mierzy natomiast wartość średnią prądu w czasie pół okresu:

$$I_{\acute{s}r} = \frac{1}{T} \cdot \int i_C \cdot dt = \frac{1}{T} \cdot \int C \cdot \frac{dU_C}{dt} \cdot dt = \frac{C}{T} \cdot (U_{\text{max}} + U_{\text{max}}) = \frac{2 \cdot C \cdot U_{\text{max}}}{T}$$

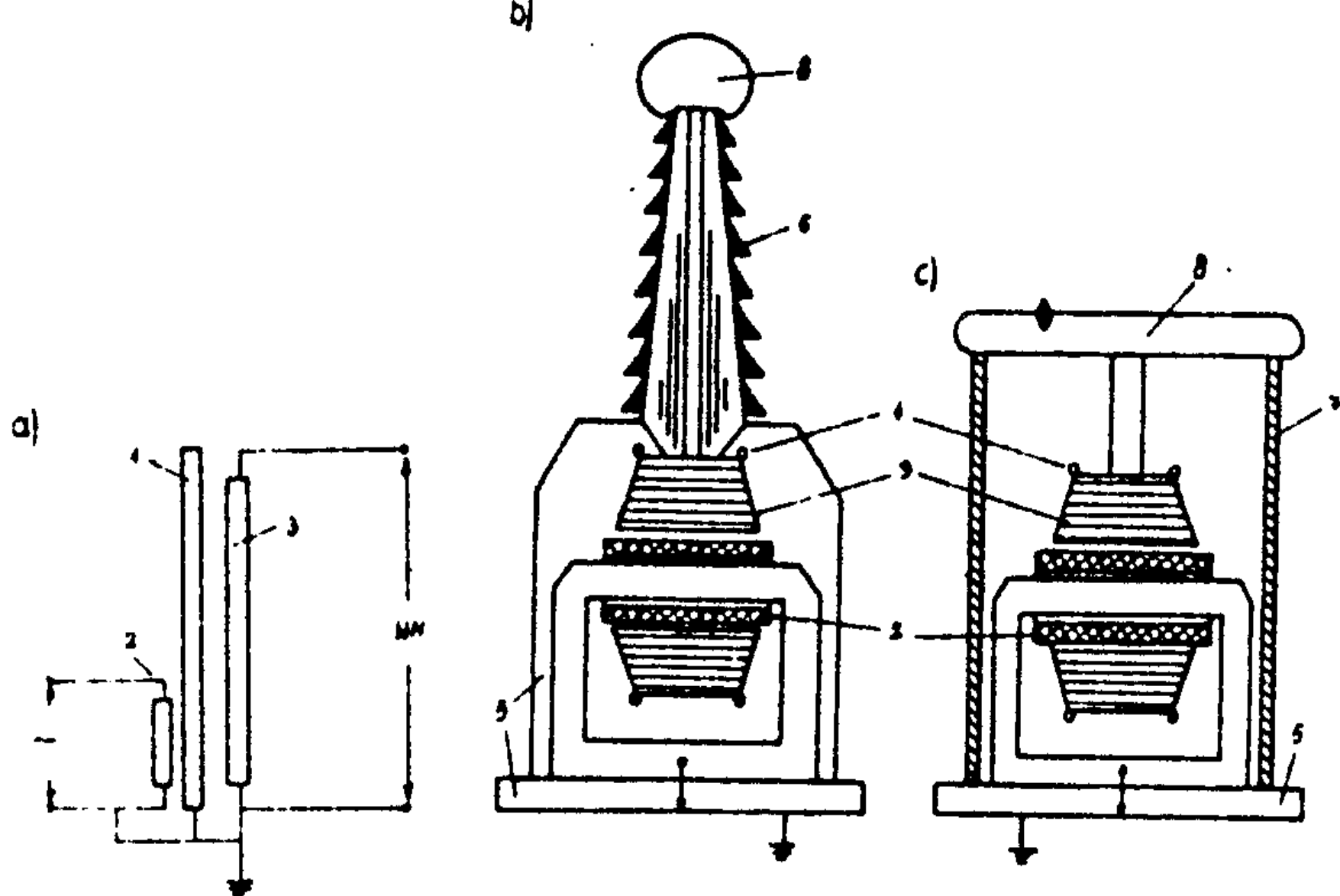
czyli $I_{\acute{s}r} = 2 \cdot C \cdot f \cdot U_{\text{max}}$ (8.18)

Zatem wskazania mikroamperomierza są proporcjonalne do wartości maksymalnej napięcia o ile tylko odkształcone napięcie nie wykazuje dwóch wartości ekstremalnych.

8.4.2.3. Transformatory probiercze

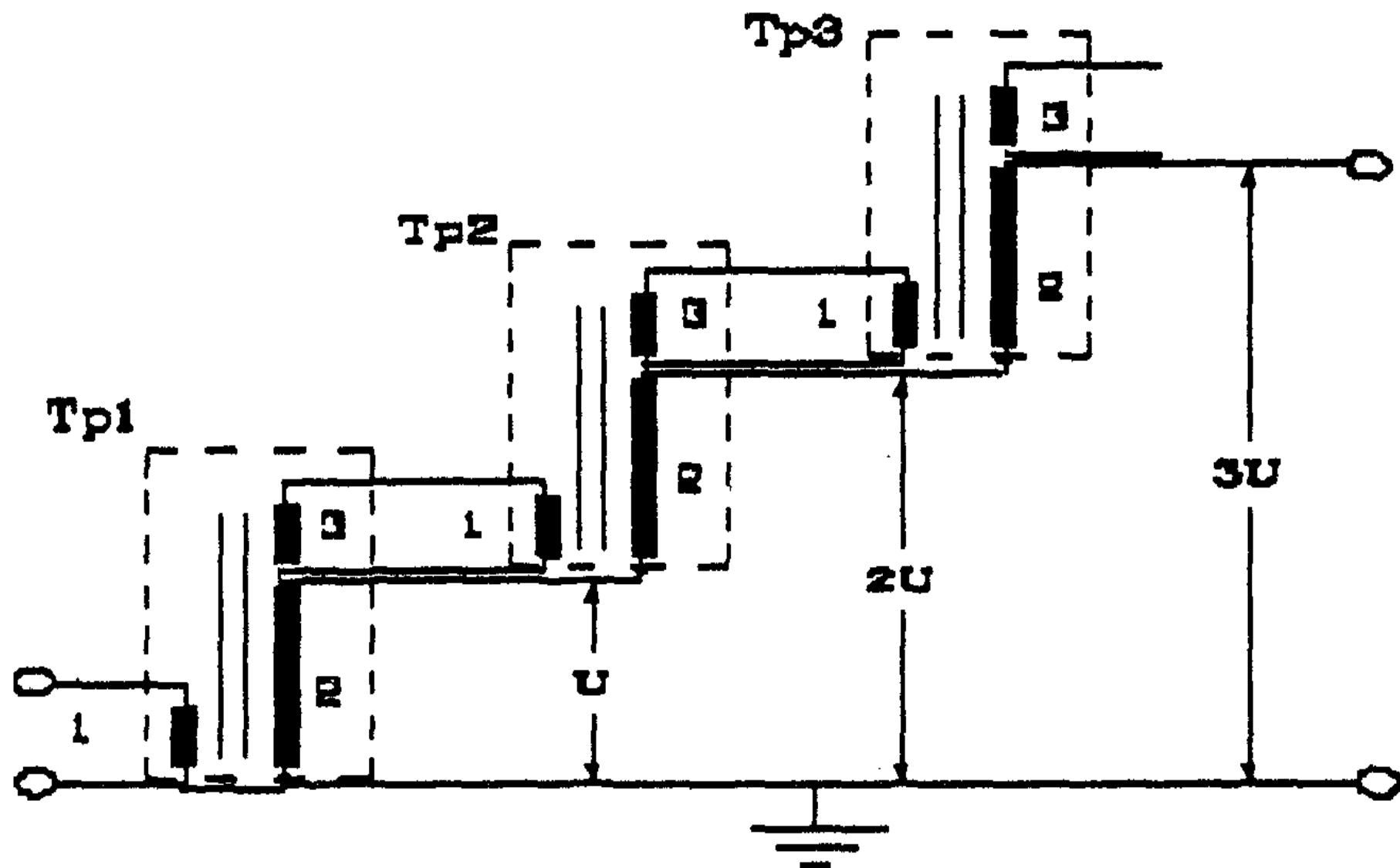
Transformatory stosowane do wytwarzania napięć probierczych zwane transformatorami probierczymi wykazują kilka specyficznych cech odróżniających je od np. transformatorów energetycznych. Są to transformatory jednofazowe o bardzo dużych przekładniach napięciowych (np. 220/100000 V lub 380/300000 V itp.) pracujące w warunkach pracy dorywczej przy niewielkich obciążeniach o charakterze pojemnościowym. Transformatory probiercze muszą zapewniać odpowiedni prąd zwarcia po stronie wysokiego napięcia (zwykle 1 A) i muszą być odporne na zwarcia. Jednocześnie nie są narażone na oddziaływania warunków atmosferycznych, gdyż pracują w pomieszczeniach laboratoryjnych. Nie są również narażone na jakiegokolwiek przepięcia sieciowe w tym także na przepięcia atmosferyczne.

Przykłady rozwiązań transformatorów probierczych podano na rysunku 8.10. Jak widać występuje zasadnicza różnica w konstrukcji transformatora w zależności od tego czy jest on w kadzi izolacyjnej czy w metalowej. W tym drugim przypadku występuje konieczność stosowania przepustu umożliwiającego wyprowadzenie wysokiego napięcia.



Rys. 8.10. Transformator probierczy: a) schemat elektryczny, b) transformator z kadzią metalową, c) transformator z kadzią izolacyjną
 1 - rdzeń, 2- uzwojenie DN, 3 - uzwojenie GN, 4 - ekran elektrostatyczny, 5 - uziemiona obudowa, 6 - przepust, 7 - kadź izolacyjna, 8 - ekran przepustu

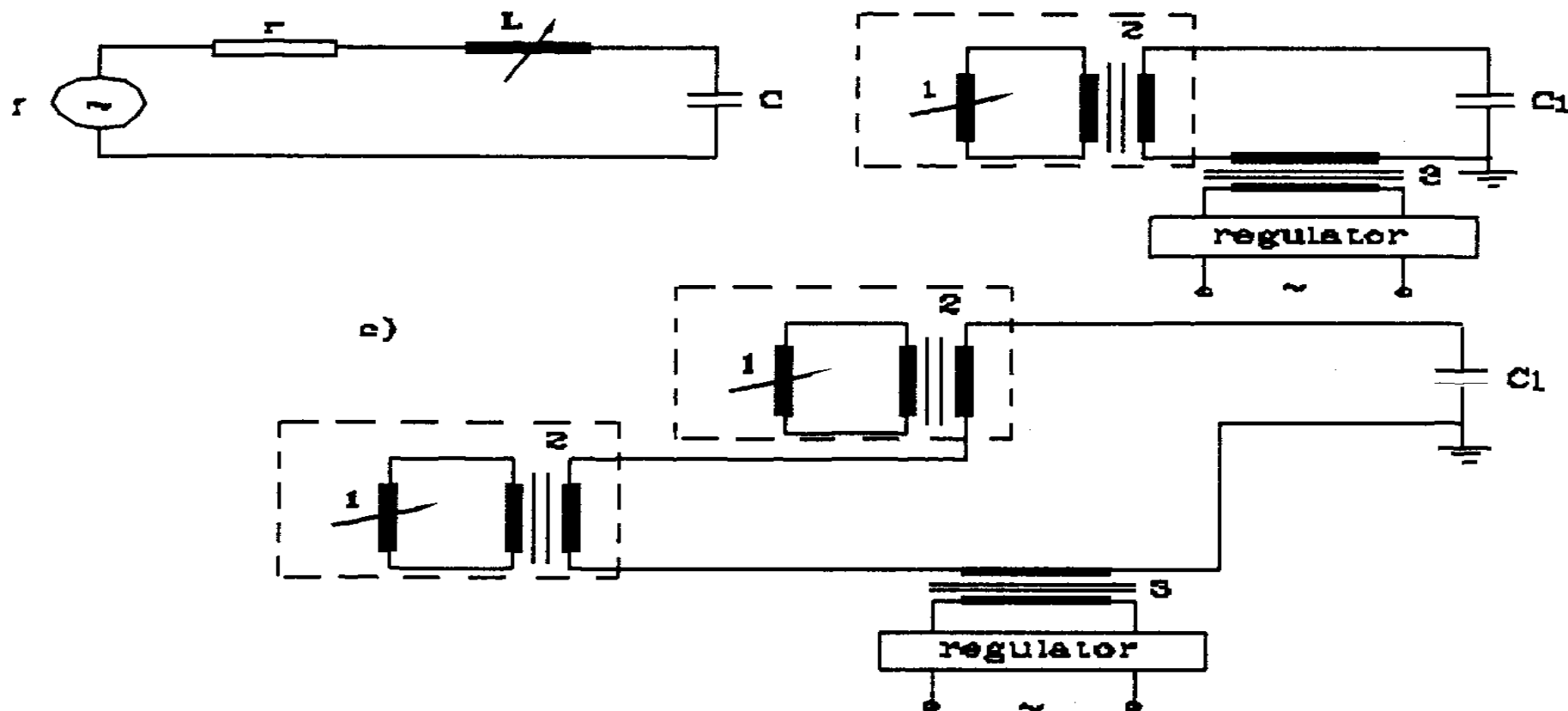
Uzyskanie napięć probierczych wyższych niż około 500 kV za pomocą pojedynczego transformatora napotyka na trudności. W laboratoriach WN potrzebne jednakże są napięcia znacznie wyższe. W takich przypadkach stosuje się tzw. kaskadowe połączenie transformatorów (rys. 8.11). W układzie kaskadowym transformator kolejnego stopnia kaskady jest zasilany z dodatkowego uzwojenia transformatora stopnia poprzedniego. Jednakże to dodatkowe uzwojenie jest już na potencjale zacisku WN, zatem cały transformator np. drugiego stopnia kaskady może być na potencjale odpowiadającym napięciu znamionowemu stopnia pierwszego musi więc być odpowiednio izolowany od ziemi a napięcie drugiego stopnia dodaje się do napięcia stopnia pierwszego itd. Na wyjściu kaskady transformatorów probierczych uzyska się napięcie będące sumą napięć poszczególnych stopni.



Rys. 8.11. Zasada kaskadowego połączenia transformatorów probierczych
 1 - uzwojenie DN, 2 - uzwojenie GN, 3 - uzwojenie zasilające następny stopień kaskady

8.4.2.4. Rezonansowe źródła napięć probierczych

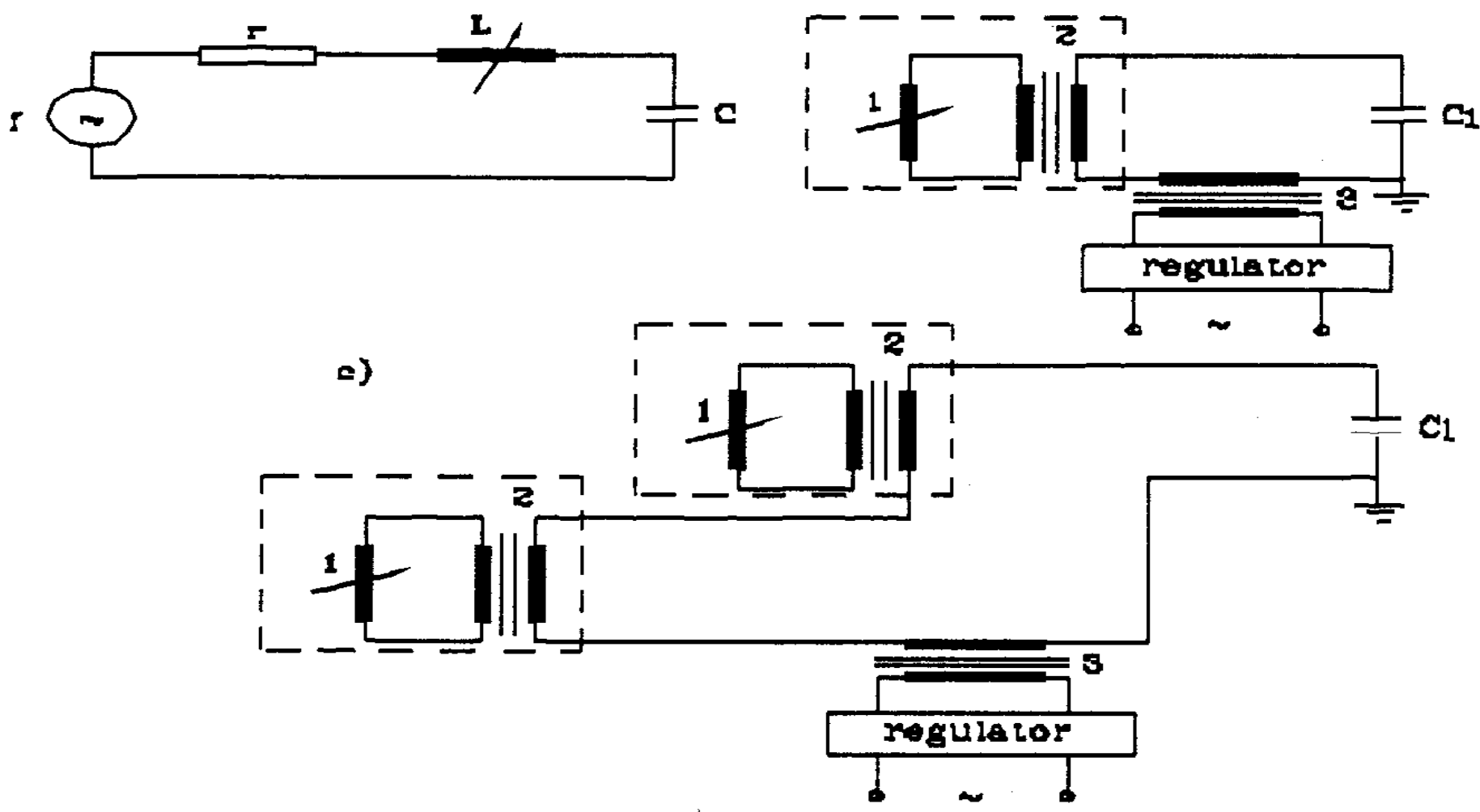
Jeśli rozważyć obwód rezonansu szeregowego jak na rysunku 8.12a to przy odpowiednim zestrojeniu indukcyjności L i pojemności C można na pojemności C uzyskać teoretycznie dowolnie duże napięcie (ograniczeniem są rezystancje obwodu). Badane układy izolacyjne stanowią obciążenie pojemnościowe, zatem obwód rezonansu szeregowego znakomicie nadaje się do wytwarzania przemiennych napięć probierczych.



Rys. 8.12. Rezonansowy układ probierczy: a) zasada działania, b) układ z pojedynczym transformatorem, c) układ kaskadowy

1 -regulowana indukcyjność, 2 -transformator pośredniczący, 3 -regulowane źródło prądu

Rozwiązania praktyczne pokazano na rysunkach 8.12bc.



Rys. 8.12. Rezonansowy układ probierczy: a) zasada działania, b) układ z pojedynczym transformatorem, c) układ kaskadowy
 1 -regulowana indukcyjność, 2 -transformator pośredniczący, 3 -regulowane źródło prądu

Stosowanie obwodów rezonansu szeregowego jako źródeł przemiennych napięć probierczych posiada następujące zalety:

1. w obwodzie rezonansowym następuje eliminacja zjawisk rezonansowych, dla innych niż podstawowa, harmonicznym napięcia oraz występuje tłumienie składowych harmonicznym występujących w napięciu zasilającym. Daje to nieodkształcone napięcie podstawowej harmonicznym wzmocnione 20 do 50-krotnie;
2. moc zasilania może stanowić tylko około 5% wymaganej mocy głównego obwodu probierczego;
3. przy wystąpieniu wyładowania w obiekcie badanym nie rozwija się silny energetycznie łuk elektryczny. Pałący się łuk jest jedynie skutkiem rozładowania pojemności obciążenia. Jest to szczególnie istotne przy badaniu kabli, gdzie łuk mógłby spowodować duże uszkodzenia. Łuk w obwodzie rezonansowym ulega samowygaszeniu wskutek gwałtownego spadku napięcia spowodowanego rozstrojeniem układu. Możliwe jest więc opóźnienie wyłączenia obwodu zasilania co daje możliwość powtórnego wyładowania jeśli jest to przeskok zewnętrzny;
4. istnieje łatwość przełączania z układów szeregowych w równoległe co daje możliwość zmian zakresów prądowych i napięciowych;
5. istnieje możliwość automatycznego dostrajania obwodu przy zmianach częstotliwości zasilania lub pojemności obciążenia w czasie prób długotrwałych (np. wielodobowych czy wielomiesięcznych). Zapewnia to stałość warunków próby.