

## ĆWICZENIE NR 25

## POMIARY IMPEDANCJI PĘTLI ZWARCIA

(opracował Eligiusz Pawłowski)

### 1. Cel i zakres ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z podstawowymi zagadnieniami ochrony przeciwporażeniowej oraz metodami i układami do pomiaru impedancji pętli zwarcia, miernikami impedancji pętli zwarcia i sposobami ich sprawdzania. Zakres ćwiczenia obejmuje pomiary impedancji pętli zwarcia metodą techniczną i specjalizowanymi miernikami oraz wyznaczenie błędów tych pomiarów.

**UWAGA!** Ćwiczenie skupia się przede wszystkim na metrologicznej stronie zagadnienia pomiaru impedancji pętli zwarcia, szczególnie na stosowanych metodach i układach pomiarowych oraz analizie błędów pomiaru. Bardzo istotną problematykę ochrony przeciwporażeniowej przedstawiono tutaj tylko w podstawowym zakresie, gdyż jest ona szczegółowo omawiana w ramach innych przedmiotów przewidzianych tokiem studiów. Należy również pamiętać, że ćwiczenie dotyczy tylko jednego z kilku środków ochrony przeciwporażeniowej stosowanych w praktyce i nie wyczerpuje w całości tego niezwykle ważnego zagadnienia. Studenci zainteresowani tą tematyką oraz wszystkie osoby wykonujące pomiary związane z ochroną życia i zdrowia ludzi powinni zawsze zwracać szczególną uwagę na **stosowanie aktualnie obowiązujących przepisów** w tym zakresie, tzn.: ustaw sejmowych, rozporządzeń ministerialnych i polskich norm, z których najważniejsze umieszczono w wykazie literatury do ćwiczenia.

### 2. Wprowadzenie teoretyczne

#### 2.1. Oddziaływanie prądu elektrycznego na organizm człowieka

Organizm człowieka składa się w około 60% (wagowo) z wody, w której rozpuszczone są liczne składniki mineralne ulegające dysocjacji na jony i umożliwiające tym samym przepływ prądu elektrycznego. Dlatego napięcie elektryczne przyłożone do ciała człowieka powoduje przepływ prądu, który wywołuje liczne skutki fizyczne i fizjologiczne. Głównym efektem fizycznym jest wydzielanie się ciepła w wyniku przepływu prądu elektrycznego, co może skutkować oparzeniami różnego stopnia, a nawet zwęgleniem, czyli całkowitym, nieodwracalnym zniszczeniem tkanki biologicznej. Każdy zewnętrznym wymuszony przepływ prądu elektrycznego przez ludzkie ciało zakłóca również działanie układu nerwowego człowieka, który wykorzystuje do przesyłania informacji stosunkowo niewielkie impulsy elektryczne. Wywołuje to różnorodne skutki fizjologiczne, takie jak odczucie bólu, mimowolne skurcze mięśni, zaburzenia oddychania, zaburzenia czynności serca i inne. Wszystkie te efekty łącznie i każdy z osobna stwarzają **poważne zagrożenie dla zdrowia i życia człowieka**. Badania nad skutkami przepływu prądu elektrycznego przez ciało człowieka pozwoliły na sformułowanie przepisów i wymagań odnośnie środków ochrony przeciwporażeniowej, opracowanie skutecznych procedur ratowania osób porażonych prądem elektrycznym oraz zaprojektowanie licznych przyrządów na potrzeby medycyny, fizjoterapii, sportu itp. Wiedza ta znalazła niestety również mniej chlubne zastosowania, jak wykonywanie kary śmierci na krześle elektrycznym albo tortury więźniów.

Pierwsze opisane eksperymenty oddziaływania elektryczności na organizmy żywe pochodzą z XVIII wieku [1]. Pierwsze dokładniejsze badania właściwości elektrycznych ciała człowieka wykonano na początku XX wieku. W 1925 roku austriacki lekarz Stefan Jelinek, który dokumentował elektryczne urazy ciała człowieka dla Instytutu Medycyny Sądowej w

Wiedniu, opracował pierwszy podręcznik o porażeniach człowieka prądem elektrycznym, przeznaczony dla inżynierów i lekarzy [2]. W 1934 roku Henryk Freiberger opublikował książkę z wynikami swoich badań z elektropatologii [3], która na wiele lat stała się podstawową literaturą z zakresu oddziaływania prądu elektrycznego na organizm człowieka. Przedstawił on w niej wyniki pomiarów rezystancji ciała człowieka przeprowadzone na żywych ludziach napięciem do 30 V i na zwłokach ludzkich napięciem do 5 kV, określił wartość pojemności skóry człowieka oraz zaproponował aktualny do dziś schemat zastępczy impedancji ciała człowieka (rys. 3). W latach 40-tych i 50-tych XX wieku wiele prac z tego zakresu opublikował amerykański badacz Charles Dalziel [4], który zaproponował dla celów ochrony przeciwporażeniowej modelową wartość impedancji ciała człowieka 1000  $\Omega$ .

Te i kolejne badania wielu naukowców stanowiły podstawę do opracowania w 1974 roku przez Międzynarodową Komisję Elektrotechniczną IEC raportu nr 479-1 „Działanie prądu elektrycznego na ludzi”, który w chwili obecnej posiada już czwarte wydanie [5], uaktualnione na podstawie najnowszej wiedzy z tego zakresu. Wcześniejsze wydanie tego raportu opublikowano również w języku polskim [6]. Na podstawie wyników badań zawartych w raporcie IEC nr 479-1 opracowane zostały przepisy i normy dla celów ochrony przeciwporażeniowej. Przeanalizowano w nim przede wszystkim następujące zagadnienia:

- jakie są skutki przepływu prądu elektrycznego przez ciało człowieka ?
- jak impedancja ciała człowieka zależy od wartości napięcia i innych parametrów ?
- jak można ograniczyć ryzyko porażenia prądem elektrycznym ?

Z raportu wynika, że skutki porażenia elektrycznego zależą przede wszystkim od wartości **prądu** przepływającego przez ciało człowieka i **czasu** jego przepływu. Istotny jest również rodzaj prądu (stały/przemienny) i jego częstotliwość oraz droga przepływu przez ciało człowieka - szczególnie niebezpieczny jest przepływ przez klatkę piersiową i serce. Natomiast wartość prądu przepływającego przez ciało człowieka zależy od wartości napięcia i impedancji ciała człowieka, zgodnie z prawem Ohma. Impedancja ciała człowieka jest nieliniowa (zmienia się w funkcji napięcia) oraz jest silnie zależna od warunków środowiskowych, przede wszystkim od wilgotności. Z analizy raportu IEC nr 479-1 wynikają dwie możliwości ochrony człowieka przed porażeniem elektrycznym:

1. należy **ograniczyć wartość napięcia** do takiej wartości, aby wartość prądu płynącego przez ciało człowieka była na tyle mała, aby nie powodowała żadnych negatywnych skutków,
2. gdy zastosowanie bezpiecznego, odpowiednio niskiego napięcia, nie jest możliwe, należy **ograniczyć czas przepływu prądu** przez ciało człowieka.

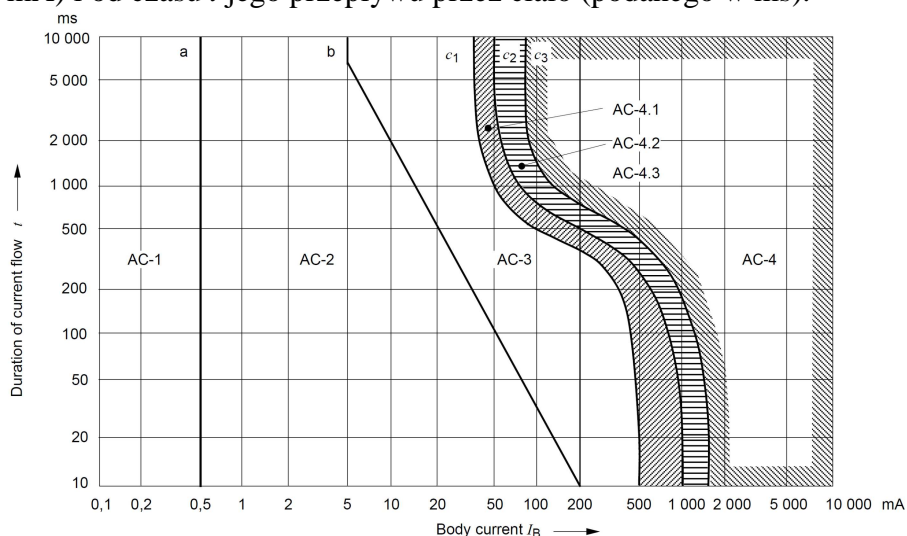
W raporcie zwrócono uwagę na trzy, bardzo niebezpieczne dla zdrowia i życia ludzi, **bezpośrednie** skutki przepływu prądu przez ciało człowieka:

- mimowolne, niekontrolowane **skurcze mięśni**, które mogą uniemożliwić samodzielne uwolnienie się osoby porażonej spod działania napięcia, a w obrębie klatki piersiowej mogą spowodować zaburzenia oddychania,
- **migotanie (fibrylacja) komór serca**, powodujące zaburzenie rytmu serca i w skrajnym przypadku całkowite jego zatrzymanie, a przy braku skutecznej reanimacji - zgon,
- **efekt cieplny** powodujący mniej lub bardziej poważne uszkodzenia naskórka, a przy dużym natężeniu prądu mogą wystąpić również poważne oparzenia i zwęglenia skóry oraz organów wewnętrznych.

Poza powyższymi, bezpośrednimi skutkami porażenia, mogą wystąpić również skutki **pośrednie**, takie jak np.: oparzenie łukiem elektrycznym, metalizacja skóry roztopionymi cząstkami metalu, uszkodzenia wzroku poprzez oślepienie łukiem elektrycznym, uszkodzenie słuchu, urazy mechaniczne w wyniku upadku człowieka z wysokości lub upuszczenia trzymany ciężkich przedmiotów na części ciała własnego lub innej osoby.

Na rys. 1 przedstawiono możliwe skutki bezpośredniego oddziaływania na organizm człowieka prądu przemiennego (AC), sinusoidalnego, o częstotliwości 15÷100 Hz, dla

przepływu prądu na drodze: lewa ręka – obie stopy. Wyróżniono na nim cztery strefy czasowo - prądowe określające różne skutki, jakie może wywołać prąd elektryczny przepływający przez ciało człowieka, w zależności od wartości skutecznej  $I_B$  tego prądu (podanego w mA) i od czasu  $t$  jego przepływu przez ciało (podanego w ms).



Rys.1. Strefy czasowo – prądowe skutków oddziaływania prądu przemiennego o częstotliwości 15÷100 Hz na organizm człowieka (droga przepływu prądu: lewa ręka – stopy) wg. raportu IEC nr 479-1 [5]

Strefy te są określone następująco [5]:

- **strefa AC-1** (do 0,5 mA, ograniczona linią *a*) – możliwe odczuwanie przepływu prądu, lecz zwykle bez wywoływania żadnych reakcji. Większość dorosłych ludzi nie odczuwa przepływu prądu o wartości natężenia do 0,5 mA, ale jest to cechą indywidualną osoby. **Progu odczuwania prądu elektrycznego** (*current perception threshold, CPT*) na potrzeby zabezpieczeń przeciwporażeniowych **nie określa się**, gdyż nie stwarza on zagrożenia i jest w dużym stopniu zależny od powierzchni styku elektrycznego ze skórą, wilgotności, ciśnienia, temperatury oraz indywidualnych predyspozycji fizjologicznych osoby.

- **strefa AC-2** (powyżej 0,5 mA, pomiędzy liniami *a* - *b*) – odczuwanie przepływu prądu i prawdopodobne mimowolne skurcze mięśni, ale zwykle bez żadnych szkodliwych skutków elektrofizjologicznych. Prąd przemienny o wartości skutecznej 0,5 mA, niezależnie od czasu (pionowa linia *a*) jest to **próg reakcji na prąd elektryczny** (*threshold of reaction*). W miarę wzrostu natężenia prądu występują: mrowienie w palcach, drętwienie, skurcze włókien mięśniowych i nasilające się uczucie bólu. Im wyższa wartość prądu i dłuższy czas jego przepływu, tym liczniejsze włókna mięśni dłoni ulegają skurczowi, również tzw. skurczowi tężcowemu, który trwa tak długo, jak długo płynie prąd. Efekt ten może **uniemożliwić samodzielne uwolnienie się osoby porażonej spod działania prądu**. Ukośny przebieg linii *b* pokazuje, że istnieje zależność reakcji organizmu zarówno od wartości prądu, jak i od czasu jego przepływu - przy większym natężeniu prądu płynącego w krótszym czasie występują te same lub podobne odczucia i reakcje, co przy mniejszym natężeniu, ale w czasie dłuższym. Przebieg linii *b* określa **próg samouwolnienia** (*threshold of let-go*).

- **strefa AC-3** (pomiędzy liniami *b* - *c1*) – silne mimowolne skurcze mięśni, trudności w oddychaniu, odwracalne zakłócenia w pracy serca, możliwe zatrzymanie pracy serca. Prąd o wartości 5 mA jest to **prąd rażenia długotrwałego**, który może płynąć przez ciało człowieka dowolnie długo nie stwarzając żadnego zagrożenia (górną, pionową część linii *b*). Skutki przepływu prądu wzrastają wraz ze wzrostem wartości prądu (dolną, ukośną część linii *b*). Zazwyczaj nie należy się spodziewać uszkodzenia organizmu. Obserwuje się nasilenie bólu, wzrost ciśnienia krwi oraz skurcze tężcowe mięśni poprzecznie prążkowanych i skurcze mięśni oddechowych, co może wywołać niedotlenienie organizmu, trudności z oddychaniem,

zwiększenie ilości dwutlenku węgla we krwi oraz zakwaszenie tkanek, a w konsekwencji tego sinicę skóry i błon śluzowych. Zwykle są to **skutki fizjologiczne odwracalne, bez uszkodzeń organizmu**, lecz istnieje również duże prawdopodobieństwo pojawienia się odwracalnych zakłóceń w pracy serca, włącznie z migotaniem przedsionków serca i przejściową blokadą pracy serca bez wystąpienia migotania komór, nasilające się wraz ze wzrostem natężenia prądu i czasem jego przepływu. W skrajnych przypadkach może wystąpić zawał mięśnia sercowego. Przyjmuje się, że **prąd o natężeniu 30 mA powoduje początek paraliżu dróg oddechowych** (górną część linii  $c_1$ ). Linia  $c_1$  oznacza graniczne wartości prądów **niefibrylacyjnych**, tzn. nie wywołujących migotania (fibrylacji) komór serca.

- **strefa AC-4** (powyżej linii  $c_1$ ) – mogą pojawić się skutki patofizjologiczne takie jak zatrzymanie akcji serca, zatrzymanie oddychania, oparzenia lub inne uszkodzenie tkanek. Generalnie występują te same skutki prądu rażenia, co w strefie AC-3, ale nasilające się wraz ze wzrostem natężenia prądu i czasu jego przepływu, oraz dodatkowo może wystąpić migotanie (fibrylacja) komór serca. Z przebiegu linii  $c_1$  wynika, że **prąd przemienny o wartości 30 mA i większej stwarza poważne niebezpieczeństwo śmiertelnego porażenia człowieka**, jeśli nie zostanie odpowiednio szybko wyłączony. Prawdopodobieństwo fibrylacji komór serca wzrasta wraz ze wzrostem wartości prądu i czasu jego przepływu,

- w strefie **AC-4.1** (pomiędzy liniami  $c_1 - c_2$ ) prawdopodobieństwo fibrylacji komór serca wzrasta do ok. 5%, tzn. fibrylacja komór serca wystąpi średnio u co 20 osoby.

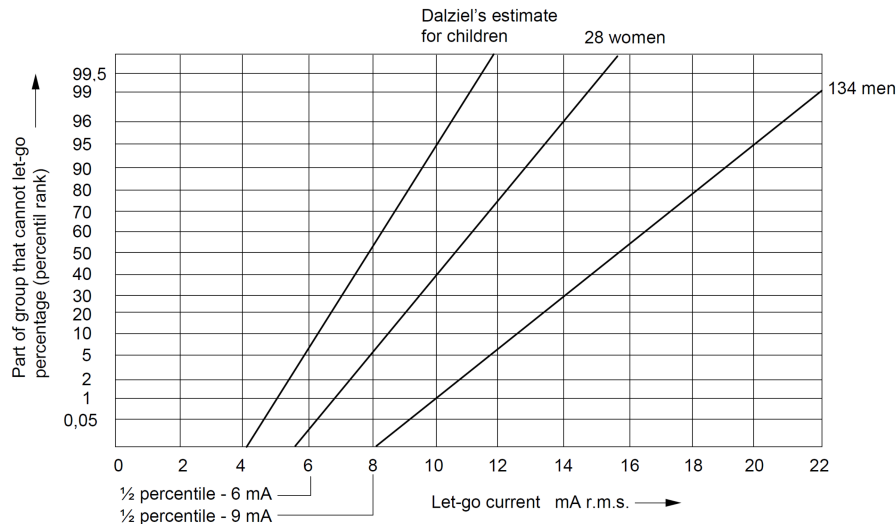
- w strefie **AC-4.2** (pomiędzy liniami  $c_2 - c_3$ ) prawdopodobieństwo fibrylacji komór serca wzrasta do ok. 50%,

- w strefie **AC-4.3** (powyżej linii  $c_3$ ) prawdopodobieństwo fibrylacji komór serca przekracza 50%. tzn. fibrylacja komór serca wystąpi co najmniej u połowy osób znajdujących pod działaniem prądu elektrycznego w tych warunkach.

W chwili rażenia, zamiast miarowych, okresowych skurczów komór pojawiają się skurcze niemiarowe, nieokresowe, o częstotliwości 400 do 600 na min. Jednocześnie ciśnienie krwi gwałtownie maleje i jej przepływ może być zatrzymany, co spowoduje w pierwszej kolejności niedotlenienie mózgu, a po czasie około 10 s - utratę przytomności. Jeżeli proces będzie trwał dłużej, po dalszych 20 s nastąpi zatrzymanie oddychania i **początek śmierci klinicznej. Rażonego człowieka można jeszcze uratować, jeżeli udzieli mu się skutecznej pomocy przed upływem 3 do 5 min, tzn. przed upływem czasu, jaki bez dopływu tlenu może przeżyć kora mózgowa człowieka.**

**Śmierć człowieka** rażonego prądem elektrycznym o wartości wywołującej migotanie komór serca lub skurcz tężcowy mięśni oddechowych następuje nie na skutek bezpośredniego uszkodzenia tych organów, ale z powodu zakłócenia naturalnych procesów życiowych. Dla czasów trwania przepływu prądu krótszych od 200 ms fibrylacja komór serca może wystąpić tylko we wrażliwej części cyklu pracy serca, który przypada na załamek T, odpowiadający repolaryzacji komór. Przy przepływie prądu inną drogą niż: lewa ręka – obie stopy (rys. 1), progowe wartości prądów mogące wywołać fibrylację komór serca ulegają zwiększeniu, a odpowiednie współczynniki podano w raporcie [5].

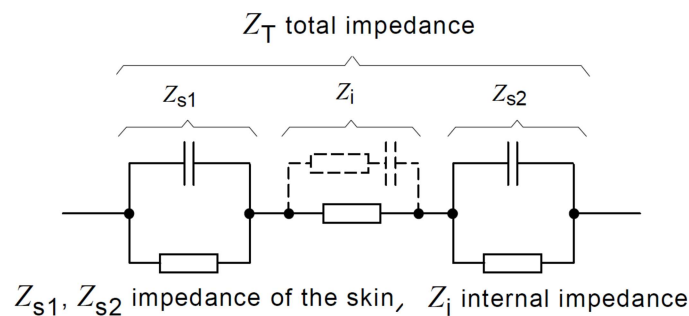
Omawiając zależności przedstawione na rys. 1 należy dodatkowo zwrócić uwagę na przebieg linii  $b$ , która określa **próg samouwolnienia** (*threshold of let-go*), tzn. taką wartość prądu rażenia, przy której człowiek jest w stanie samodzielnie uwolnić się spod działania napięcia, pomimo skurczów mięśni. Dla dorosłego mężczyzny raport [5] określa prąd samouwolnienia (*let-go current*) na 10 mA wartości skutecznej, ale dla całej populacji ludzi przyjmuje się wartość 5 mA. Na rys. 2 przedstawiono wartości prądu samouwolnienia dla różnych grup ludzi, na którym widać, że dla niektórych mężczyzn może on być nawet wyższy od 22 mA, podczas gdy dla dzieci największa wartość nie przekracza 12 mA. Należy zwrócić uwagę, że kolejne edycje raportu IEC [6], [5] podają coraz niższą wartość prądu samouwolnienia.



Rys.2. Prąd samouwolnienia (*let-go current*) dla prądu przemiennego o częstotliwości 50/60 Hz [5]

Dla prądu stałego również wyznaczono cztery strefy czasowo - prądowe DC-1 ... DC-4, określające różne skutki, jakie może wywołać prąd elektryczny stały przepływający przez ciało człowieka [5], przy czym **odpowiednie wartości prądów stałych są większe niż dla prądów przemiennych**. Dla prądu stałego próg reakcji na prąd elektryczny określono na 2 mA, a prąd rażenia długotrwałego na 30 mA, nie określa się natomiast progu samouwolnienia. Odpowiednio większe są również wartości prądu stałego przy których może wystąpić fibrylacja komór serca. Wynika z tego istotny wniosek, że **prąd przemienny stwarza większe ryzyko porażenia od prądu stałego, jest więc bardziej niebezpieczny !**

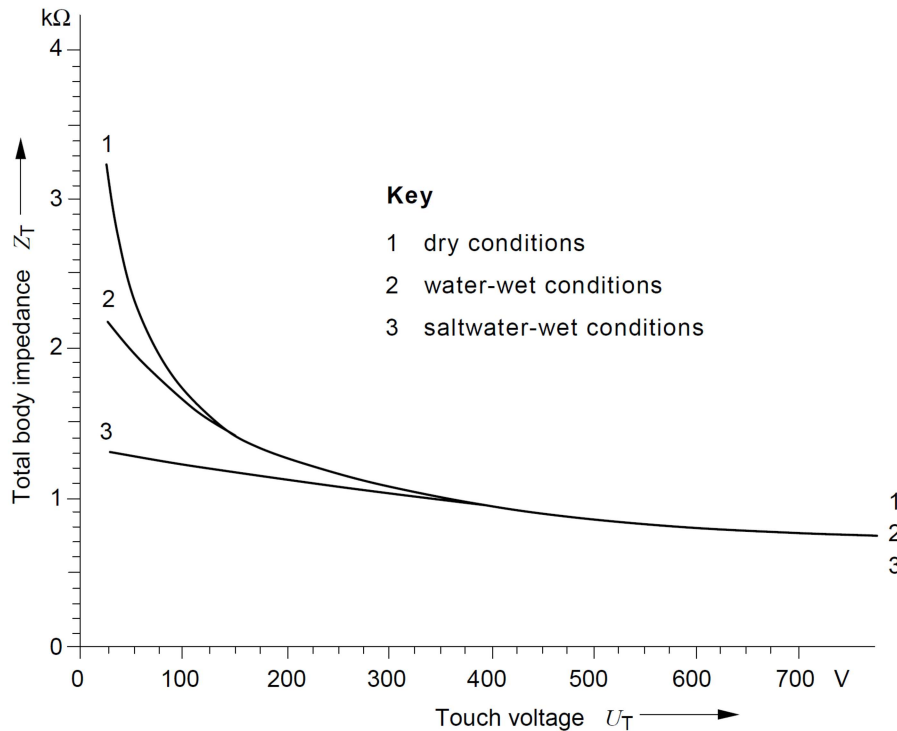
Znając skutki przepływu prądu przez ciało człowieka, należy ustalić zależność tego prądu od wartości napięcia, które jest przyczyną przepływu prądu wywołującego porażenie. Wartość tego prądu wynika z prawa Ohma, a więc zależy od wartości przyłożonego napięcia i od impedancji ciała człowieka. Schemat zastępczy impedancji ciała człowieka opracowany na początku XX wieku przez Freibergera [3] i obowiązujący do dziś przedstawia rys. 3 [5], [6].



Rys.3. Schemat zastępczy impedancji ciała człowieka wg Freibergera [3] oraz raportu IEC [5], gdzie:  $Z_T$  – impedancja całkowita,  $Z_i$  – impedancja wewnętrzna ciała,  $Z_s$  – impedancja skóry

Impedancja ciała człowieka ma charakter rezystancyjno-pojemnościowy: organy wewnętrzne człowieka mają charakter rezystancyjny, natomiast skóra posiada charakter rezystancyjno-pojemnościowy. Na przedstawionym schemacie zastępczym impedancję skóry w punktach wpływu i wypływu prądu ( $Z_{s1}$  i  $Z_{s2}$ ) reprezentują równoległe połączenia rezystancji i pojemności. Impedancję wewnętrzną  $Z_i$  reprezentuje tylko rezystancja. Dodatkowe elementy RC narysowane linią przerywaną reprezentują efekt naskórkowości występujący przy wyższych częstotliwościach, gdy prąd płynie przede wszystkim po powierzchni skóry i tylko w niewielkiej części przepływa przez organy wewnętrzne człowieka. Impedancja całkowita ciała człowieka  $Z_T$  jest sumą impedancji skóry  $Z_{s1}$  i  $Z_{s2}$  oraz impedancji wewnętrznej  $Z_i$ . Szczególną właściwością tkanek żywych jest nieliniowe

zmniejszanie się ich impedancji wraz ze wzrostem napięcia. Na podstawie licznych badań komisja IEC w swoim raporcie [5] określiła zależność zmian impedancji ciała człowieka od napięcia, przedstawioną w postaci wykresu na rys. 4.



Rys.4. Impedancja całkowita ciała człowieka  $Z_T$  dla 50% populacji ludzi, w funkcji napięcia prądu przemiennego 50/60 Hz na drodze ręka - ręka dla różnych warunków środowiskowych i dużej powierzchni kontaktu [5]

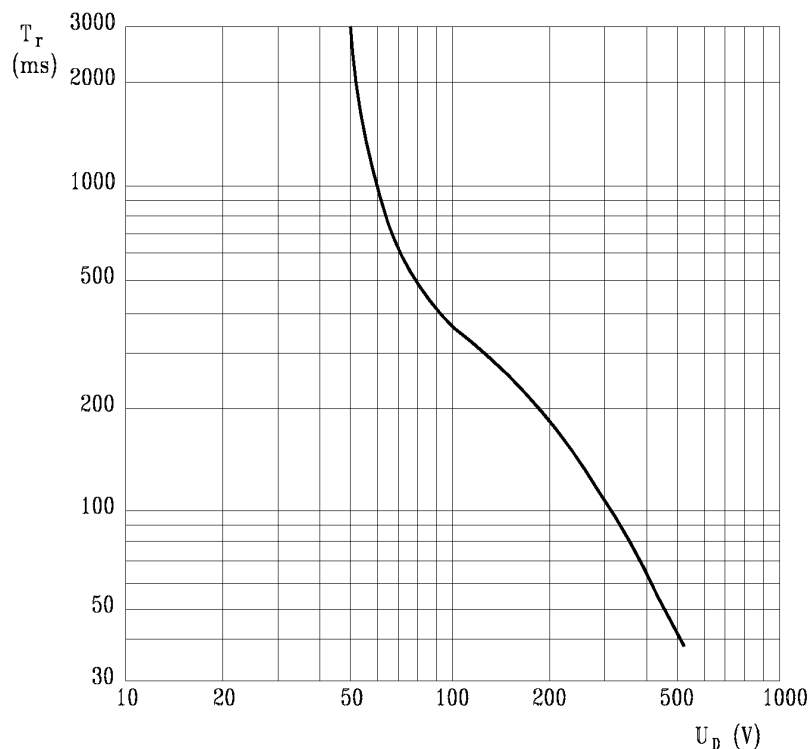
Wartość impedancji ciała człowieka zawiera się w szerokich granicach - od kilkuset  $\Omega$  do kilkunastu  $k\Omega$ . i jest zależna od wartości napięcia, częstotliwości, powierzchni styku skóry z przewodnikiem oraz wilgotności skóry, która w dużym stopniu zależy od wilgotności otoczenia oraz od indywidualnych cech osobowych, w tym również od stanu psychicznego. Wykres na rysunku 4 przedstawia impedancję ciała człowieka dla 50% populacji ludzi, w funkcji napięcia prądu przemiennego 50/60 Hz na drodze ręka - ręka dla różnych warunków środowiskowych i dużej powierzchni kontaktu ( $100\text{ cm}^2$ ). Należy zauważyć, że dla małych napięć impedancja w warunkach dużej wilgotności jest znacznie mniejsza niż dla warunków suchych. Dla większych napięć impedancja zmniejsza się i w mniejszym stopniu zależy od wilgotności. Na podstawie takich rozważań, na potrzeby analizy zjawiska porażenia elektrycznego i jego skutków, przyjęto dwie podstawowe klasy warunków środowiskowych oznaczonych jako W1 i W2:

- **warunki środowiskowe normalne W1**, w których wartość impedancji ciała ludzkiego mierzonej w stosunku do ziemi jest **nie mniejsza niż 1000  $\Omega$** . Do środowisk normalnych W1 zalicza się: lokale mieszkalne, biurowe, sale widowiskowe, szpitalne, szkolne itp.,

- **warunki środowiskowe szczególne W2**, w których wartość rezystancji ciała człowieka mierzona w stosunku do ziemi jest **mniejsza niż 1000  $\Omega$** . Do środowisk szczególnych W2 zalicza się: tereny otwarte, łazienki i natryski, sauny, obory, chlewnie, pomieszczenia produkcyjne o wilgotności względnej większej niż 75 % oraz o temperaturze wyższej niż  $35^\circ\text{C}$  lub mniejszej niż  $-5^\circ\text{C}$ . W takich warunkach środowiskowych pomieszczenia są zwykle wilgotne, wilgotna jest również skóra człowieka, a podłogi (podłoża) charakteryzują się małą rezystancją.

Dodatkowo wyróżnia się **warunki środowiskowe specjalne W3**, do których zalicza się np. baseny kąpielowe lub wnętrza metalowych zbiorników, w których rezystancja ciała

człowieka mierzona w stosunku do ziemi jest **mniejsza niż 200  $\Omega$** . Na podstawie przebiegu linii  $c_1$  (rys. 1) pokazującej graniczne wartości prądów niefibrylacyjnych, po uwzględnieniu zależności impedancji ciała człowieka od napięcia (rys. 4), można wyznaczyć (na podstawie prawa Ohma) dla każdego warunków środowiskowych zależność maksymalnego czasu trwania rażenia  $T_r$  w funkcji napięcia dotykowego  $U_D$ , dla których nie występuje ryzyko śmiertelnego porażenia człowieka. Zależność taką dla warunków normalnych W1 przedstawia rysunek 5 z którego wynika, że dla warunków W1 czas trwania rażenia napięciem przemiennym o wartości 50 V może być dowolnie długi. Dlatego **50 V jest przyjęte jako wartość napięcia bezpiecznego  $U_L$  dla warunków środowiskowych normalnych W1**. Wartości napięć bezpiecznych  $U_L$  dla różnych warunków środowiskowych można wyznaczyć analogicznie, zostały one zestawione w tabeli 1 (w dalszej części instrukcji).



Rys.5. Zależność maksymalnego czasu trwania rażenia  $T_r$  w funkcji napięcia dotykowego  $U_D$  dla warunków środowiskowych normalnych W1 [5]

Podsumowując przedstawione w tym rozdziale informacje, a w szczególności zależności widoczne na rys. 1 i rys. 4 oraz wynikający z nich wykres na rys. 5, można sformułować następujące wnioski, istotne z punktu widzenia ochrony przeciwporażeniowej:

1. można określić takie wartości napięć bezpiecznych, które w danych warunkach środowiskowych nie spowodują przepływu prądu o wartości niebezpiecznej dla człowieka w dowolnie długim czasie,

2. dla napięć wyższych od wartości bezpiecznych w danych warunkach środowiskowych można określić czas, po którym najpóźniej musi zostać wyłączone napięcie rażeniowe, aby nie doszło do porażenia człowieka.

Wartości napięć bezpiecznych dla różnych warunków środowiskowych zestawiono w tabeli 1, natomiast maksymalne czasy wymaganego samoczynnego wyłączenia zasilania dla różnych wartości napięć i różnych warunków środowiskowych przedstawiono w tabeli 2. Tabele te zamieszczono w dalszej części instrukcji (w rozdziale 2.4), gdzie również szczegółowo je omówiono.

## 2.2. Podstawy ochrony przeciwporażeniowej

Przez porażenie prądem elektrycznym rozumie się skutki patofizjologiczne spowodowane przepływem prądu elektrycznego przez ciało ludzkie lub ciało zwierzęcia [10].

Ponieważ porażenie prądem elektrycznym niesie dla człowieka niestety bardzo poważne, realne **ryzyko utraty zdrowia lub życia**, to odpowiednie wymagania w zakresie ochrony przeciwporażeniowej zostały sformułowane w obowiązujących przepisach. Przepis jest dokumentem ustalającym obowiązujące reguły prawne, przyjętym przez organ władzy. Akty prawa powszechnego, czyli ustawy i rozporządzenia, mają powszechny charakter obligatoryjny, dotyczą wszelkich osób fizycznych i prawnych, które z tytułu swojej osobowości i/lub działalności wchodzi w zakres właściwości danego aktu prawnego. W zakresie budowy i eksploatacji obiektów technicznych akty prawa powszechnego określają w pierwszym rzędzie **wymagania dotyczące bezpieczeństwa ludzi i ochrony zdrowia**, bezpieczeństwa zwierząt, ochrony mienia oraz ochrony środowiska. Określają też sposoby i tryb sprawdzania, czy te wymagania są respektowane.

Obowiązująca w Polsce ustawa "Prawo budowlane" [7] wymaga, aby obiekty budowlane w czasie ich użytkowania poddawane były przez właściciela lub zarządcę kontroli okresowej, co najmniej raz na 5 lat, polegającej między innymi na **badaniu instalacji elektrycznej** i piorunochronnej w zakresie stanu sprawności połączeń, osprzętu, zabezpieczeń i środków **ochrony od porażen**, oporności izolacji przewodów oraz uziemień instalacji i aparatów.

Rozporządzenie Ministra [8] wymaga, aby instalacja i urządzenia elektryczne w budynkach zapewniały między innymi **ochronę przed porażeniem prądem elektrycznym**, przepięciami łączeniowymi i atmosferycznymi, powstaniem pożaru, wybuchem i innymi szkodami. W tym celu **w instalacjach elektrycznych należy stosować oddzielny przewód ochronny i neutralny w obwodach rozdzielczych i odbiorczych oraz urządzenia ochronne różnicowoprądowe lub inne środki ochrony przeciwporażeniowej odpowiednie do rodzaju i przeznaczenia budynku bądź jego części**. W obwodach odbiorczych należy również stosować wyłączniki nadprądowe zabezpieczające przed skutkami przeciążeń i zwarc.

Analizując problematykę ochrony przeciwporażeniowej należy zwrócić uwagę, że wszystkie wyroby przemysłu elektrotechnicznego, z których budowane są sieci energetyczne oraz różnego rodzaju aparaty i maszyny elektryczne, przyrządy pomiarowe itp. generalnie wykonywane są z dwóch rodzajów materiałów: przewodzących prąd elektryczny oraz materiałów izolacyjnych. Elementy wykonane z materiałów przewodzących prąd elektryczny mogą być oczywiście przeznaczone do przewodzenia prądu (przewody elektryczne, styki, zaciski itp.), ale mogą również stanowić różnego rodzaju elementy konstrukcyjne, których przeznaczeniem nie jest przewodzenie prądu elektrycznego, lecz zapewnienie odpowiednich właściwości mechanicznych (obudowy, wsporniki, słupy energetyczne itp.). Z tego względu rozróżniamy tzw. części czynne, części przewodzące dostępne oraz części przewodzące obce.

**Część czynna** jest to przewód lub część przeznaczona do pracy pod napięciem w warunkach normalnych (tzn. bez wystąpienia uszkodzenia), łącznie z przewodem neutralnym N, lecz za wyjątkiem przewodu ochronnego PE.

**Część przewodząca dostępna** jest to część przewodząca urządzenia, której można dotknąć, ale nie będąca normalnie pod napięciem i która może znaleźć się pod napięciem, jeżeli zawiedzie izolacja podstawowa (czyli po wystąpieniu jakiegoś uszkodzenia). Typowym przykładem części przewodzącej dostępnej jest metalowa obudowa urządzenia elektrycznego lub tylko metalowa część obudowy wykonanej w większości z materiału izolacyjnego, np. śruby skręcające obudowę, metalowa podstawa obudowy wykonanej z plastiku itp.

**Część przewodząca obca** jest to część przewodząca nie będąca częścią instalacji elektrycznej lub urządzenia i mogąca przyjmować potencjał elektryczny, zwykle potencjał elektryczny lokalnej ziemi. Tutaj przykładem mogą być wszelkiego rodzaju nieelektryczne



instalacje w budynkach (wodociągowa, gazowa, kanalizacyjna, c.o.), metalowe elementy konstrukcyjne budynków, zbrojenia wyrobów betonowych, metalowe ogrodzenia, bramy itp.

Przewody elektryczne będące częściami czynnymi to przewody liniowe i przewód neutralny. **Przewód liniowy** (oznaczany symbolem **L**) jest to przewód fazowy w układach AC lub przewód biegunowy w układach DC, będący w czasie normalnej pracy sieci pod napięciem i przeznaczony do przesyłu energii elektrycznej, ale nie będący ani przewodem neutralnym, ani przewodem środkowym, ani przewodem ochronnym. **Przewód neutralny** (oznaczany symbolem **N**) jest to przewód połączony galwanicznie z punktem neutralnym (tzn. wspólnym punktem połączonego w gwiazdę układu wielofazowego albo uziemionym punktem środkowym układu jednofazowego) i mogący brać udział w rozdziale energii elektrycznej. Podobnie **przewód środkowy** jest to przewód połączony elektrycznie z punktem środkowym (tzn. wspólnym punktem między dwoma symetrycznymi elementami obwodu elektrycznego, których przeciwległe końce są przyłączone do różnych przewodów liniowych należących do tego samego obwodu), przewidziany w rozdziale energii elektrycznej. Natomiast **przewód ochronny** (oznaczany symbolem **PE**) jest to przewód przeznaczony do zapewnienia bezpieczeństwa, na przykład do ochrony przed porażeniem prądem elektrycznym. Stosowany są również przewód ochronno – neutralny (oznaczany symbolem **PEN**), jest to przewód łączący funkcje przewodu ochronnego uziemniającego PE oraz przewodu neutralnego N.

Podstawowa zasada ochrony przed porażeniem elektrycznym została sformułowana w Polskiej Normie [9] następująco:

**Części czynne niebezpieczne nie powinny być dostępne, a części przewodzące dostępne nie powinny być niebezpieczne, zarówno w warunkach normalnego użytkowania** (tzn. dla urządzeń sprawnych, użytkowanych zgodnie z zasadami eksploatacji), **jak również w przypadku pojedynczego uszkodzenia** (np. w wyniku uszkodzenia izolacji podstawowej i zwarcia przewodu fazowego z metalową, przewodzącą obudową urządzenia). Ochrona w warunkach normalnych jest zapewniona ochroną podstawową, a ochrona w warunkach pojedynczego uszkodzenia jest zapewniona ochroną dodatkową (ochroną przy uszkodzeniu).

Porażenie może więc nastąpić w chwili, gdy człowiek dotknie się do części przewodzącej będącej pod napięciem wyższym od napięcia bezpiecznego w danych warunkach (tab. 1), w czasie przekraczającym dopuszczalne wartości (tab. 2). Z punktu widzenia ochrony przeciwporażeniowej rozróżniamy dotyk bezpośredni i pośredni. **Dotyk bezpośredni** jest to dotknięcie przez człowieka lub zwierzę **części czynnych**. **Dotyk pośredni** jest to dotknięcie przez człowieka lub zwierzę **części przewodzących dostępnych**, które w stanie uszkodzenia znalazły się **pod napięciem**. W prawidłowo skonstruowanym i całkowicie sprawnym urządzeniu **dotyk bezpośredni i pośredni nie powinny być możliwe**.

Z tego właśnie względu rozróżniamy dwa rodzaje ochrony przeciwporażeniowej: podstawową i dodatkową. **Ochrona przeciwporażeniowa podstawowa** jest to zespół środków technicznych chroniących przed zetknięciem się człowieka lub zwierzęcia z częściami czynnymi w warunkach **braku uszkodzenia**, czyli chroniących przed dotykiem bezpośrednim. **Ochrona przeciwporażeniowa dodatkowa**, zwana również ochroną przeciwporażeniową przy uszkodzeniu, jest to zespół środków technicznych chroniących przed porażeniem prądem elektrycznym **przy pojedynczym uszkodzeniu**, głównie z uwagi na uszkodzenie izolacji podstawowej, czyli jest to zabezpieczenie przed dotykiem pośrednim. W niektórych sytuacjach stosowana jest również **ochrona przeciwporażeniowa uzupełniająca**, jest to zespół środków technicznych uzupełniających ochronę podstawową i/lub ochronę przy pojedynczym uszkodzeniu. Norma [9] definiuje również **środek ochrony wzmocnionej**, jest to środek ochrony zapewniający niezawodność ochrony nie niższą niż uzyskiwana za pomocą dwóch niezależnych od siebie środków ochrony przeciwporażeniowej.

Z chwilą wystąpienia uszkodzenia, na częściach przewodzącym dostępnych może pojawić się napięcie. **Napięcie dotykowe** jest to napięcie pojawiające się między dwoma punktami jednocześnie dostępnymi nie należącymi do obwodu elektrycznego (np.: metalowa obudowa urządzenia i ziemia) w przypadku uszkodzenia izolacji (np.: zwarcie przewodu fazowego do obudowy urządzenia), które można jednocześnie dotknąć dwiema częściami ciała (np.: dwiema rękami lub ręką i stopą). Wartość napięcia dotykowego zależy od napięcia roboczego oraz od rezystancji pomiędzy częścią przewodzącą dostępną urządzenia a ziemią. **Napięcie dotykowe rażeniowe** jest to spadek napięcia na ciele ludzkim podczas przepływu prądu rażeniowego. Zazwyczaj napięcie dotykowe rażeniowe jest niższe od napięcia dotykowego, ze względu na rezystancje występujące na drodze przepływu prądu rażeniowego. Dzięki temu jedną z możliwości ochrony przeciwporażeniowej jest izolacja stanowiska pracy od ziemi.

### 2.3. Podstawowa ochrona przeciwporażeniowa

Ochrona podstawowa (ochrona przed dotykiem bezpośrednim) zapewnia ochronę urządzeń, instalacji i wyposażenia w warunkach normalnych, tzn. przy braku uszkodzenia i eksploatowanych zgodnie z przeznaczeniem, uniemożliwiając kontakt ciała człowieka z czynnymi częściami elektrycznymi [10].

Wyróżnia się następujące środki ochrony podstawowej:

1. izolacja podstawowa części czynnych,
2. przegrody lub obudowy,
3. przeszkody, bariery,
4. umieszczenie poza zasięgiem ręki.

**Izolacja podstawowa**, zapobiegająca dotykowi niebezpiecznych części czynnych, powinna być wykonana trwale w taki sposób, aby jej **usunięcie** było możliwe **tylko przez zniszczenie** oraz powinna być odporna na wilgoć, ciepło, drgania oraz zapylenie, na jakie może być narażona w warunkach eksploatacji. Materiały takie jak: farby, lakiery, emalie lub materiały włókniste, nie są uznawane za izolację podstawową, odpowiednią do ochrony przed porażeniem elektrycznym.

**Przegrody lub obudowy** zastosowane w celu zapewnienia ochrony podstawowej powinny **zapobiegać rozmyślnemu dotykowi do części czynnych**. Powinny one być trwale zamocowane, a usunięcie ich powinno być możliwe jedynie przy użyciu narzędzi lub po wyłączeniu napięcia z części czynnych znajdujących się wewnątrz nich.

**Przeszkody i bariery** mają za zadanie uniemożliwić niezamierzone zbliżenie ciała i **niezamierzone dotknięcie części czynnych** w trakcie normalnej obsługi urządzeń czynnych. Natomiast środki te nie chronią przed zamierzonym dotykiem spowodowanym rozmyślnym działaniem. Mogą być usuwane bez użycia narzędzia lub klucza (zamki nie są wymagane), jednak muszą być zabezpieczone przed niezamierzonym usunięciem.

**Umieszczenie części czynnych poza zasięgiem ręki** (ochrona przez uniedostępnienie) powinno zapobiegać niezamierzonemu jednoczesnemu dotknięciu przez człowieka części czynnych, pomiędzy którymi może wystąpić napięcie niebezpieczne. W instalacji niskiego napięcia za części które nie są równocześnie dostępne uważa się takie części, które są od siebie **oddalone więcej niż 2,5 m**.

### 2.4. Dodatkowa ochrona przeciwporażeniowa

System ochrony przeciwporażeniowej przewiduje ochronę urządzenia również w przypadku pojedynczego uszkodzenia np. w wyniku uszkodzenia izolacji podstawowej (zwarcie przewodu fazowego L z przewodzącą obudową). Stosuje się w tym przypadku odpowiedni **środek ochrony przy uszkodzeniu** (ochrona dodatkowa). Zadaniem ochrony przy uszkodzeniu jest więc niedopuszczenie do porażenia prądem elektrycznym w przypadku uszkodzenia izolacji podstawowej lub jej zniszczenia.

Do ochrony przy uszkodzeniu, zgodnie z normą [10] należy stosować, niezależnie od środków ochrony podstawowej, jeden lub więcej środków ochrony przy uszkodzeniu, biorąc pod uwagę narażenia środowiskowe. Norma dopuszcza do stosowania następujące środki ochrony przy uszkodzeniu (ochrony dodatkowej):

- 1) samoczynne wyłączenie zasilania (wymaga użycia przewodu ochronnego PE),
- 2) izolacja podwójna, izolacja wzmocniona, ochronna osłona izolacyjna,
- 3) separacja elektryczna obwodu pojedynczego odbiornika,
- 4) napięcie bardzo niskie ze źródła bezpiecznego (SELV oraz PELV).

Środki ochrony przy uszkodzeniu wymienione w pkt. 2, 3 i 4 nie wymagają użycia przewodu ochronnego PE. Natomiast środek ochrony przez samoczynne wyłączenie zasilania wymaga dołączenia części przewodzących dostępnych do przewodu ochronnego PE. Do niedawna połączenie takie nazywane było **zerowaniem ochronnym**, co było logicznie uzasadnione tylko przy stosowaniu przewodu ochronno-neutralnego PEN, będącego jednocześnie "przewodem zerowym sieci". Przy stosowaniu oddzielnego przewodu ochronnego PE, sformułowanie "zerowanie ochronne" jest mylące i należy go unikać. W aktualnych przepisach nie jest ono używane.

**Niniejsze ćwiczenie dotyczy problematyki pomiarów odbiorczych i kontrolnych związanych z pierwszym z wymienionych tu środków ochrony przy uszkodzeniu, czyli samoczynnym wyłączeniem zasilania. Pozostałe środki ochrony dodatkowej nie będą tu szczegółowo omawiane, będą one analizowane w ramach innych przedmiotów przewidzianych tokiem studiów.**

Norma [10] definiuje samoczynne wyłączenie zasilania jako spowodowanie przerwy w jednym lub większej liczbie przewodów linii, w wyniku samoczynnego zadziałania urządzenia ochronnego w przypadku uszkodzenia. Ochrona przeciwporażeniowa dodatkowa przez samoczynne wyłączanie zasilania jest skuteczna, jeżeli w razie uszkodzenia izolacji podstawowej (zwarcia L-PE) następuje samoczynne wyłączenie zasilania w wymaganym czasie. Tabela 2 podaje największy dopuszczalny czas samoczynnego wyłączania zasilania w obwodach odbiorczych o prądzie znamionowym nie przekraczającym 32 A w zależności od napięcia względem ziemi  $U_o$ .

Tabela 1. Napięcia bezpieczne  $U_L$  w różnych warunkach środowiskowych [10]

Rodzaj prądu	Napięcie bezpieczne $U_L$ (V) w warunkach		
	normalnych W1	szczególnych W2	specjalnych W3
Prąd przemienny	50	25	12
Prąd stały	120	60	30

Tabela 2. Największy dopuszczalny czas samoczynnego wyłączania zasilania w sekundach w obwodach odbiorczych o prądzie znamionowym nie przekraczającym 32 A [10]

Układ	$50 \text{ V} < U_o \leq 120 \text{ V}$		$120 \text{ V} < U_o \leq 230 \text{ V}$		$230 \text{ V} < U_o \leq 400 \text{ V}$		$U_o > 400 \text{ V}$	
	AC	DC	AC	DC	AC	DC	AC	DC
<b>TN</b>	0,8	<sup>1)</sup>	<b>0,4</b>	<b>5</b>	0,2	0,4	0,1	0,1
<b>TT</b>	0,3	<sup>1)</sup>	<b>0,2</b>	<b>0,4</b>	0,07	0,2	0,04	0,1

<sup>1)</sup> Wyłączenie może być wymagane z innych powodów niż zagrożenie porażeniem.

Jak widać w tabeli 2, wymagania stawiane układom przeciwporażeniowym zależą od układu pracy sieci. Układ pracy sieci opisuje relację pomiędzy przewodami tworzącymi daną sieć a ziemią. Poszczególne układy sieci oznacza się za pomocą symboli złożonych z dwóch,

trzech lub czterech liter pochodzących od słów zaczerpniętych z języka francuskiego. Pierwsza litera oznacza związek pomiędzy układem sieci a ziemią:

- T oznacza bezpośrednie połączenie jednego punktu układu sieci z ziemią. Najczęściej łączy z ziemią punkt neutralny sieci, w praktyce jest to zazwyczaj punkt neutralny transformatora zasilającego (T oznacza *terre* - ziemia);

- I oznacza izolowanie od ziemi wszystkich części czynnych, to znaczy mogących się znaleźć pod napięciem w warunkach normalnej pracy, przy czym jeden punkt układu sieci może być połączony z ziemią poprzez impedancję lub bezpiecznik iskiernikowy (I oznacza *isolation* - izolowane, oddzielone).

Druga litera oznacza związek pomiędzy częściami przewodzącymi dostępnymi a ziemią:

- T oznacza bezpośrednie połączenie elektryczne podlegających ochronie części przewodzących dostępnych z ziemią (z uziomem o odpowiednich parametrach), niezależnie od uziemienia punktu neutralnego układu sieci;

- N oznacza bezpośrednie połączenie elektryczne podlegających ochronie części przewodzących dostępnych z uziemionym punktem układu sieci zasilającej, zazwyczaj z uziemionym punktem neutralnym transformatora zasilającego (N oznacza *neutre* - neutralny, obojętny).

Trzecia i czwarta litera (jeśli występują), oznaczają związek pomiędzy przewodem neutralnym N i przewodem ochronnym PE:

- S oznacza, że w sieci występują dwa niezależne przewody: przewód ochronny PE oraz przewód neutralny N (S oznacza *separè* - rozdzielone, osobne);

- C oznacza, że w jednym przewodzie ochronno-neutralnym PEN zostały połączone dwie funkcje: przewodu neutralnego N i ochronnego PE (C oznacza *combinè* - wspólny);

- C-S oznacza, że w pierwszej części sieci, licząc od strony zasilania zastosowany jest przewód ochronno-neutralny PEN, a w drugiej, dalszej od strony zasilania, zastosowany jest osobny przewód neutralny N i przewód ochronny PE.

Dla sieci niskiego napięcia (czyli do 1kV) wyróżnia się następujące układy sieci:

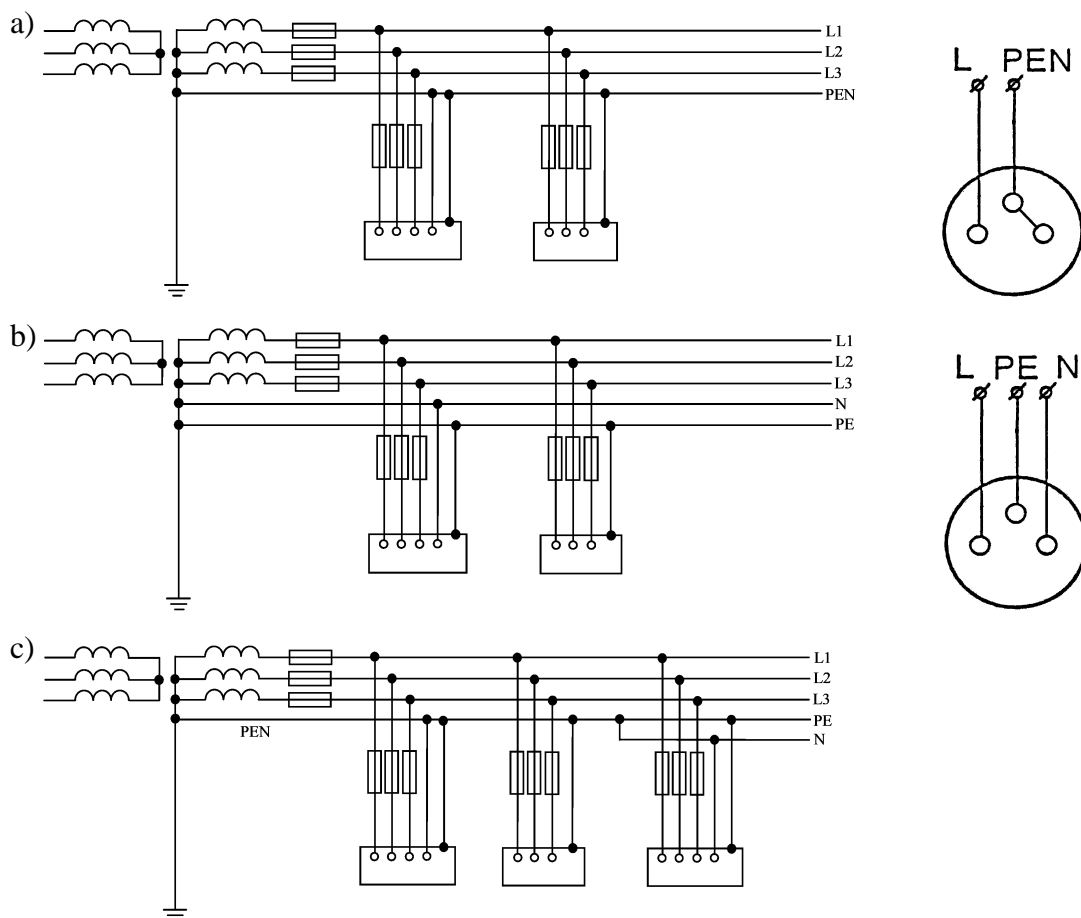
- układ TN-C,
- układ TN-S,
- układ TN-C-S,
- układ TT,
- układ IT.

W Polsce najczęściej w sieciach niskiego napięcia stosowane są układy typu TN, przy czym w sieciach elektroenergetycznych zasilających z reguły są stosowane czteroprzewodowe układy TN-C ze wspólnym przewodem ochronno-neutralny PEN, natomiast w instalacjach elektrycznych w budynkach najczęściej stosowane są układy pięcioprzewodowe TN-S, z oddzielnymi przewodami N i PE, lub układy mieszane TN-C-S. We wszystkich układach TN punkt neutralny układu jest bezpośrednio uziemiony, a części przewodzące dostępne instalacji elektrycznej są z nim połączone przewodami ochronnymi PE lub przewodami ochronno-neutralnymi PEN, w wyniku czego pętla zwarciowa jest w całości metaliczna.

Schematy układów sieci typu TN przedstawiono na rysunku 6. W układzie TN-C punkt neutralny transformatora jest uziemiony, a części przewodzące dostępne urządzeń są podłączone z ziemią poprzez sieć zasilającą za pomocą wspólnego przewodu PEN. Należy podkreślić, iż taka instalacja może być zastosowana wyłącznie jeśli przewód PEN ma co najmniej przekrój  $10 \text{ mm}^2$  (dla miedzi), a więc bardzo gruby! Należy przy tym zwrócić uwagę na fakt, że w Polsce w wielu starych budynkach występują sieci czteroprzewodowe nie spełniające wymagań układu TN-C. Takie „stare” układy sieciowe powinny być sukcesywnie remontowane i wymieniane na układy zgodne z obowiązującymi obecnie przepisami. W układzie sieciowym TN-S punkt neutralny transformatora jest uziemiony, a części

przewodzące dostępne urządzeń są podłączone z ziemią poprzez przewód ochronny PE. W układzie sieciowym TN-C-S punkt neutralny transformatora jest uziemiony, a części przewodzące dostępne urządzeń są połączone z ziemią poprzez sieć zasilającą: w pierwszej części - bliższej transformatora - poprzez wspólny przewód ochronno-neutralny PEN, a w części dalszej - poprzez wydzielony przewód ochronny PE.

Rzadziej stosowane są układy TT oraz IT. W układzie TT punkt neutralny sieci jest bezpośrednio uziemiony, a części przewodzące dostępne instalacji elektrycznej są połączone z osobnym uziemieniem, w wyniku czego pętla zwarciova obejmująca część przewodzącą dostępną zamyka się przez ziemię. Jest to istotna różnica w stosunku do układów TN, w których pętla zwarciova jest w całości metaliczna. W układzie IT punkt neutralny jest izolowany od ziemi, albo uziemiony poprzez bezpiecznik iskiernikowy lub poprzez dużą impedancję, a części przewodzące dostępne instalacji elektrycznej są uziemione indywidualnie, grupowo albo zbiorowo. Wynika stąd wniosek, że pętla zwarciova w układzie IT ma zupełnie inne właściwości w stosunku do układów TN i TT.



Rys.6. Układy sieciowe TN: a) układ czteroprzewodowy TN-C ze wspólnym przewodem ochronno-neutralnym PEN, b) układ pięcioprzewodowy TN-S z oddzielnym przewodem ochronnym PE i neutralnym N, c) układ mieszany TN-C-S, po prawej stronie prawidłowe połączenia gniazd wtykowych jednofazowych

## 2.5. Uzupełniająca ochrona przeciwporażeniowa

W warunkach zwiększonego zagrożenia porażeniem, jeżeli zastosowane środki ochrony przeciwporażeniowej nie mogą być skuteczne, powinny być zastosowane odpowiednio dobrane środki ochrony uzupełniającej ochronę podstawową i/lub ochronę przy uszkodzeniu.

**Ochrona uzupełniająca ochronę podstawową** (czyli przed dotykiem bezpośrednim) polega na zainstalowaniu w obwodzie chronionym wyłącznika różnicowoprądowego (RCD – *residual current device*) wysokoczułego o prądzie wyzwalającym  $I_{\Delta n}$  nie większym od

30 mA. Według normy [9] **w wyłączniki różnicowoprądowe wysokoczułe**, dla celów ochrony przeciwporażeniowej uzupełniającej, **powinny być wyposażone**:

- a) wszelkie obwody gniazd wtyczkowych o prądzie znamionowym nie przekraczającym 20 A, przeznaczone do użytkowania przez osoby niewykwalifikowane (osoby postronne),
- b) wszelkie obwody odbiorcze do zasilania na wolnym powietrzu urządzeń przenośnych o prądzie znamionowym nie przekraczającym 32 A,
- c) instalacje użytkowane w warunkach szczególnego zagrożenia.

**Ochrona uzupełniająca ochronę przy uszkodzeniu** (czyli przed dotykiem pośrednim), polega na wykonaniu ochronnych połączeń wyrównawczych dodatkowych (miejscowych). Ich rola polega na ograniczeniu długotrwale utrzymującego się napięcia dotykowego do poziomu dopuszczalnego, wynikającego z tabeli 1.

### 3. Impedancja pętli zwarcia i jej pomiary

#### 3.1. Zasada pomiaru impedancji pętli zwarcia

Ochrona dodatkowa przez samoczynne wyłączenie zasilania powinna niezawodnie zadziałać przy wystąpieniu zwarcia pomiędzy częścią czynną a częścią przewodzącą dostępną (czyli np. pomiędzy przewodem fazowym L a metalową obudową połączoną z przewodem PE, zgodnie z rysunkiem 6). Zabezpieczenie to będzie skuteczne, jeśli spowoduje wyłączenie napięcia dotykowego wyższego niż napięcie bezpieczne (tab. 1) w czasie na tyle krótkim, aby nie wystąpiły skutki niebezpieczne dla zdrowia i życia człowieka (tab. 2). Wymaganie to będzie spełnione, jeśli każde zwarcie w wyniku którego pojawi się niebezpieczne napięcie dotykowe spowoduje przepływ prądu na tyle dużego, aby odpowiednio szybko zadziałały układy samoczynnego wyłączania zasilania. Wynika stąd wniosek, że ochrona przez samoczynne wyłączenie zasilania wymaga spełnienia dwóch warunków:

1. **stworzenie odpowiedniej drogi przepływu prądu zwarciovego**, zwanej pętlą zwarcia,
2. **zastosowanie odpowiednich urządzeń ochronnych** do samoczynnego wyłączania prądu zwarciovego poprzez wyłączenie zasilania.

Pętla zwarcia powinna mieć odpowiednio małą impedancję dla uzyskania odpowiednio dużego prądu zwarciovego, co wymaga ułożenia przewodów ochronnych PE (lub PEN) łączących wszystkie części przewodzące dostępne z punktem neutralnym sieci (w układzie sieciowym TN) lub z ziemią (w układzie sieciowym TT). Jako urządzenia ochronne samoczynnie wyłączające zasilanie stosowane są:

- urządzenia ochronne przetężeniowe, do których zaliczamy bezpieczniki topikowe oraz wyłączniki samoczynne z wyzwalaczami nadprądowymi,
- urządzenia ochronne różnicowoprądowe, do których zaliczamy wyłączniki różnicowoprądowe RCD (*Residual Current Device*) - wymagają one jednak oddzielnego przewodu ochronnego PE, nie mogą więc być skutecznie stosowane w układzie sieci TN-C.

Czas zadziałania urządzenia ochronnego zależy od wartości prądu przez nie płynącego. Wartość prądu przy wystąpieniu zwarcia można obliczyć z prawa Ohma na podstawie wartości napięcia dotykowego i zmierzonej wartości impedancji pętli zwarcia. Porównując spodziewaną wartość prądu zwarciovego z charakterystyką czasowo-prądową urządzenia wyłączającego można sprawdzić, czy zabezpieczenie przeciwporażeniowe jest skuteczne.

Należy zwrócić uwagę, że **pomiary** impedancji pętli zwarcia są jednym z elementów (drugim są tzw. **ogłędziny** [10]) szerszego zagadnienia, jakim jest sprawdzanie stanu technicznego. **Sprawdzanie stanu technicznego** instalacji elektrycznych jest wymagane po zakończeniu budowy, przebudowy lub remontu instalacji jako **sprawdzanie odbiorcze** oraz w określonych odstępach czasu w trakcie jej eksploatacji jako **sprawdzanie okresowe**. Metodyka jednego i drugiego sprawdzania jest niemal jednakowa, ale zakres sprawdzania

odbiorczego jest szerszy. Często można spotkać się z **mylnym przekonaniem**, że pomiary impedancji pętli zwarcia służą odpowiedniemu doborowi urządzenia zabezpieczającego. Jest to całkowicie błędne rozumowanie! **Pomiary impedancji pętli zwarcia służą sprawdzeniu, czy istniejące zabezpieczenie będzie skuteczne przy wystąpieniu uszkodzenia.** Odpowiedni dobór zabezpieczenia przeprowadza się wcześniej, już na etapie projektowania. Następnie sieć jest budowana zgodnie z projektem i sprawdzanie odbiorcze ma za zadanie ustalić, czy wybudowana sieć ma parametry zgodne z projektem. Natomiast sprawdzanie okresowe ma za zadanie ustalić, czy sieć zachowuje swoje parametry po pewnym czasie eksploatacji (zależnie od wymagań przepisów co roku, co 5 lub co 10 lat). **Jeśli wyniki pomiarów wskazują, że zabezpieczenie jest nieskuteczne, nie wolno zamieniać go na inne, lecz należy wyłączyć sieć z użytkowania i przeprowadzić jej remont**, gdyż jest ona niesprawna technicznie i ma parametry niezgodne z projektem.

Zabezpieczenie przeciwporażeniowe realizowane poprzez samoczynne wyłączenie zasilania uznaje się za skuteczne, gdy zmierzona impedancja pętli zwarcia  $Z_p$  spełnia następujący warunek:

$$Z_p \leq Z_{p \max} = \frac{U_0}{I_a} = \frac{U_0}{k I_n} , \quad (1)$$

tzn. gdy jest mniejsza lub równa pewnej wartości maksymalnej  $Z_{p \max}$ , określonej przez napięcie fazowe sieci  $U_0$  i prąd  $I_a$  zapewniający zadziałanie urządzenia ochronnego w wymaganym czasie (tab. 2). Wartość prądu  $I_a$  wyznacza się jako wielokrotność  $k$  prądu znamionowego  $I_n$  urządzenia ochronnego na podstawie jego charakterystyki czasowo-prądowej. Przeciętnie przyjmuje się dla bezpieczników topikowych wielokrotność  $k=6 \div 12$  (zależnie od typu bezpiecznika),  $k=5$  dla wyłączników z wyzwalaczami nadprądowymi z charakterystyką B,  $k=10$  z charakterystyką C oraz  $k=20$  z charakterystyką D.

Z pomiarowego punktu widzenia impedancja pętli zwarcia jest impedancją wewnętrzną źródła zasilania w danym punkcie sieci. Do pomiaru tej impedancji zgodnie z przepisami można stosować zasadniczo dwie metody [10]:

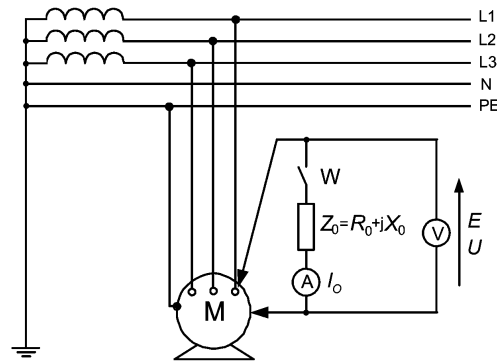
1. usunięcie źródła zasilania z obwodu (przez odłączenie zasilania od uzwojenia pierwotnego transformatora i zwarcie zacisków tego uzwojenia), a następnie pomiar dowolną metodą impedancji pętli  $Z_p$  jako biernego dwójnika,
2. pozostawienie źródła zasilania w sieci i wyznaczenie impedancji  $Z_p$  na podstawie pomiaru spadku napięcia na impedancji wewnętrznej źródła obciążonego prądem  $I_O$  o znanej wartości.

Pierwsza z tych metod, aczkolwiek dopuszczona przez przepisy, jest rzadko stosowana ponieważ jest technicznie bardzo kłopotliwa. Dlatego powszechnie stosowana jest druga z metod, według której opracowano szereg różnych typów mierników, pozwalających wykonać pomiar szybko i łatwo. W literaturze metoda ta znana jest pod dwoma nazwami: **metoda sztucznego zwarcia** oraz **metoda spadku napięcia**. Pewną odmianą tej metody jest również **techniczna metoda pomiaru impedancji pętli zwarcia**, wykorzystywana w niniejszym ćwiczeniu.

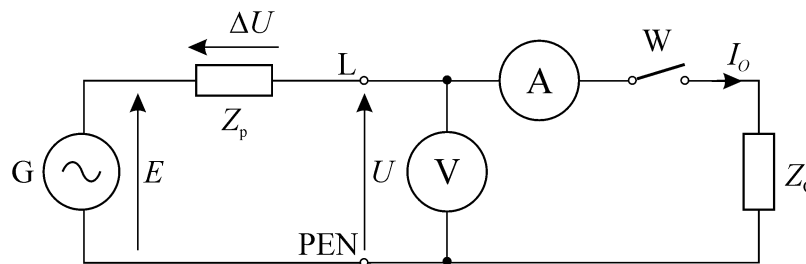
Pomiar impedancji pętli zwarcia odbywa się w każdym z punktów, w których może pojawić się zagrożenie porażeniem. Na rysunku 7 przedstawiono zasadę pomiaru impedancji pętli zwarcia na przykładzie silnika dołączonego do trójfazowej sieci zasilającej. Pomiaru dokonuje się pomiędzy częścią czynną (przewodem fazowym L) a częścią przewodzącą dostępną (np. obudową silnika na rysunku 7). W przypadku sprawdzania gniazd zasilających (które powinny być prawidłowo połączone wg rysunku 6) pomiary wykonujemy pomiędzy przewodem fazowym L a przewodem ochronnym PE (w sieci TN-S) lub PEN (w sieci TN-C).

Zasada pomiaru impedancji pętli zwarcia  $\underline{Z}_p = R_p + jX_p$  metodą sztucznego zwarcia polega na zmierzeniu zespolonego spadku napięcia  $\Delta \underline{U}$  na tej impedancji podczas przepływu prądu pomiarowego  $I_o$ , wywołanego dołączeniem do sieci impedancji obciążenia  $Z_o = R_o + jX_o$ . Na rysunku 8 przedstawiono odpowiedni schemat zastępczy, a na rysunku 9 wynikający z niego wykres wskazowy. Wektor napięcia  $\underline{E}$  na nieobciążonej sieci jest sumą dwóch wektorów: napięcia  $\underline{U}$  na impedancji obciążenia  $\underline{Z}_o$  i spadku napięcia  $\Delta \underline{U}$  na impedancji pętli zwarcia  $\underline{Z}_p$ :

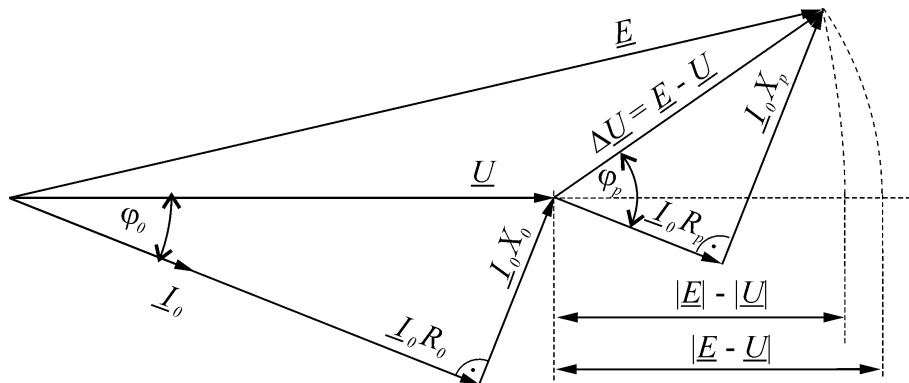
$$\underline{E} = \underline{U} + \Delta \underline{U} = \underline{U} + I_o \underline{Z}_p \quad (2)$$



Rys.7. Pomiar impedancji pętli zwarcia w miejscu dołączenia silnika do sieci, metodą sztucznego zwarcia



Rys.8. Schemat zastępczy układu do pomiaru impedancji pętli zwarcia metodą sztucznego zwarcia



Rys.9. Wykres wskazowy dla pomiaru impedancji pętli zwarcia metodą sztucznego zwarcia, kąty fazowy  $\varphi_o$  obciążenia niezgodny z kątem fazowym  $\varphi_p$  mierzonej impedancji

Ponieważ jednak z punktu widzenia wymagania skuteczności zadziałania zabezpieczenia przeciwporażeniowego (1) nie jest konieczne zmierzenie zespolonej impedancji pętli zwarcia  $\underline{Z}_p = R_p + jX_p$ , lecz wystarczająca jest tylko znajomość wartości modułu  $Z_p$  tej impedancji, to możemy ją wyznaczyć po przekształceniu zależności (2):

$$Z_p = \frac{|\underline{E} - \underline{U}|}{I_o} \quad (3)$$



Praktyczna realizacja pomiaru wg zależności (3) napotyka jednak na dwie istotne trudności. Po pierwsze, woltomierz (rys. 8) mierzy jedynie wartości modułów napięć  $|\underline{E}|$  i  $|\underline{U}|$ , podczas gdy w zależności (3) występuje moduł różnicy geometrycznej wektorów napięć  $|\underline{E} - \underline{U}|$ . W praktyce więc impedancję pętli zwarcia wyznacza się z zależności:

$$Z_p = \frac{|\underline{E}| - |\underline{U}|}{I_o}, \quad (4)$$

którą można zrealizować w praktyce. Różnicę arytmetyczną wskazań woltomierzy przy pomiarze napięć w sieci nieobciążonej i obciążonej  $|\underline{E}| - |\underline{U}|$  nazywamy **stratą napięcia**, w odróżnieniu od różnicy geometrycznej wektorów tych napięć  $\underline{E} - \underline{U}$ , którą nazywamy **spadkiem napięcia**  $\Delta\underline{U}$ . Ponieważ wektory  $\underline{E}$ ,  $\underline{U}$  i  $\Delta\underline{U}$  (rys. 9) stanowią boki trójkąta, to zawsze suma długości dwóch z nich będzie większa od długości trzeciego. Słuszna jest zatem zależność:

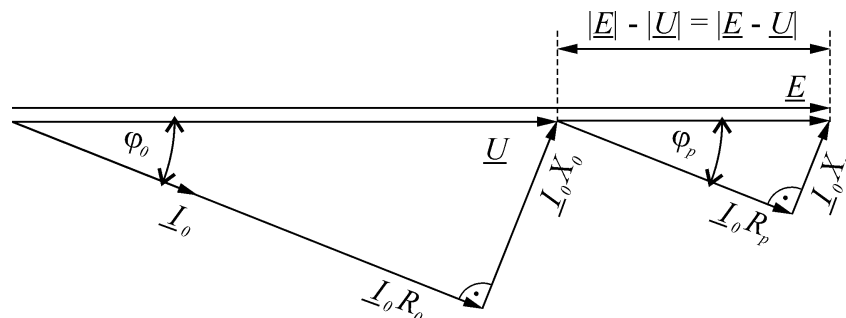
$$|\underline{E} - \underline{U}| \geq |\underline{E}| - |\underline{U}|, \quad (5)$$

z której wynika, że zastąpienie różnicy geometrycznej w zależności (3) różnicą arytmetyczną w zależności (4) skutkuje powstaniem błędów pomiaru impedancji pętli zwarcia. Z postaci nierówności (5) wynika, że jest to błąd ujemny, a więc niebezpiecznie zaniżający wartość impedancji pętli zwarcia  $Z_p$ , co może spowodować niewłaściwą ocenę spełnienia warunku (1) dla sieci, dla której ten warunek w rzeczywistości nie jest spełniony. Wartość tego błędu zależy od różnicy kątów fazowych mierzonej impedancji pętli zwarcia  $\varphi_p$  i impedancji obciążenia  $\varphi_o$  (rys. 13). Szczegółowo zagadnienie błędów pomiaru impedancji pętli zwarcia będzie rozpatrzone w dalszej części instrukcji.

Błąd wynikający z niezgodności argumentów obu impedancji można wyeliminować wykonując pomiar tak, aby różnica arytmetyczna wskazań woltomierzy przy pomiarze napięć w sieci nieobciążonej i obciążonej  $|\underline{E}| - |\underline{U}|$  (strata napięcia) była równa różnicy geometrycznej wektorów tych napięć  $\underline{E} - \underline{U}$ , (czyli spadkowi napięcia  $\Delta\underline{U}$ ):

$$|\underline{E} - \underline{U}| = |\underline{E}| - |\underline{U}|. \quad (6)$$

Sytuacja taka będzie miała miejsce, gdy zastosujemy impedancję obciążenia  $Z_o$  posiadającą kat fazowy  $\varphi_o$  równy kątowi fazowemu  $\varphi_p$  impedancji pętli zwarcia  $Z_p$ . Na rysunku 10 przedstawiono wykres wskazowy dla takiego pomiaru.



Rys.10. Wykres wskazowy dla pomiaru impedancji pętli zwarcia metodą sztucznego zwarcia, kąt fazowy  $\varphi_o$  obciążenia oraz kąt fazowy  $\varphi_p$  mierzonej impedancji są jednakowe

Jak widać na tym wykresie, trójkąty napięć na impedancjach obciążenia i pętli zwarcia są przystające, a wektory napięć  $\underline{E}$  i  $\underline{U}$  oraz ich różnica  $\Delta\underline{U}$  są równoległe, wobec czego zależność (6) jest spełniona. Problemem jest jednak różna wartość kąta fazowego  $\varphi_p$  impedancji pętli zwarcia  $Z_p$  w różnych punktach sieci. W pobliżu transformatora zasilającego dominuje jego reaktancja, podczas gdy jego rezystancja jest stosunkowo mała, a więc kąt

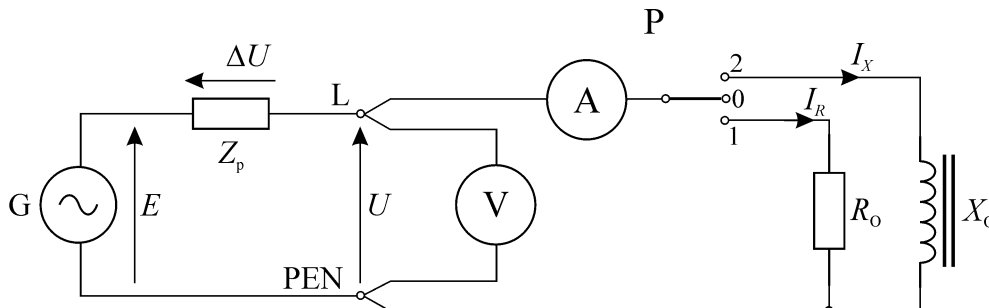
fazowy  $\varphi_p$  osiąga duże wartości rzędu 60...70°. Natomiast przewody tworzące sieć charakteryzuje przede wszystkim rezystancja, podczas gdy ich impedancja jest stosunkowo niewielka. Z tego względu, daleko od transformatora zasilającego, w sieci dominuje składnik rezystancyjny impedancji pętli zwarcia, a jej kąt  $\varphi_p$  zbliża się do zera. Dlatego optymalnym rozwiązaniem jest stosowanie impedancji obciążenia o regulowanym kącie fazowym  $\varphi_0$ .

Drugim istotnym problemem podczas praktycznej realizacji pomiaru wg zależności (4) jest brak możliwości jednoczesnego pomiaru napięć  $E$  i  $U$ , ponieważ źródło siły elektromotorycznej jest fizycznie niedostępne do bezpośredniego pomiaru i zawsze występuje nierozłącznie z szeregowo połączoną impedancją  $Z_p$ . Dlatego konieczne jest wykonanie dwóch pomiarów: najpierw przy otwartym łączniku W (rys. 8) mierzona jest wartość siły elektromotorycznej jako napięcie  $E$  na sieci nieobciążonej, a bezpośrednio potem przy zamkniętym łączniku W mierzona jest wartość napięcia  $U$ . Ponieważ jednak napięcie w sieci nie jest stabilne i zmienia się również niezależnie od wykonywanych pomiarów, to ważne jest, aby pomiary napięć  $E$  i  $U$  były robione jak najszybciej jeden po drugim. Korzystnie jest również powtórzyć kilkakrotnie pomiary i uzyskane wyniki uśrednić.

**Pomiar impedancji pętli zwarcia niesie ze sobą pewne niebezpieczeństwo.** Jeśli przewód ochronny PE jest uszkodzony (jest zerwany lub posiada dużą rezystancję, np. zbyt słabo zostały dokręcone zaciski przyłączeniowe) to wykonując pomiar metodą sztucznego zwarcia przenosimy wysoki potencjał z przewodu fazowego na części przewodzące dostępne wszystkich urządzeń dołączonych do tego samego odcinka przewodu ochronnego PE. A więc nawet w odległym punkcie sieci może niespodziewanie na obudowie jakiegoś urządzenia pojawić się niebezpieczne napięcia rażeniowe. Dlatego zawsze przed przystąpieniem do pomiaru należy sprawdzić, czy ciągłość połączeń ochronnych PE jest zachowana. W tym celu wszystkie mierniki impedancji pętli zwarcia są wyposażone w odpowiedni obwód kontrolny sprawdzający ciągłość pętli zwarcia. Dodatkowym przyciskiem najpierw dołącza się do sieci rezystor o dużej wartości (kilka k $\Omega$ ) i obserwuje wartość napięcia. Duża różnica napięć  $E$  i  $U$  przed i po naciśnięciu tego przycisku świadczy o naruszeniu ciągłości połączeń ochronnych PE i sygnalizuje, że kontynuowanie pomiaru zagraża porażeniem. W takiej sytuacji **wykonywanie pomiarów jest zabronione!**

### 3.2. Metoda techniczna pomiaru impedancji pętli zwarcia

Techniczna metoda pomiaru impedancji pętli zwarcia jest odmianą metody ze sztucznym zwarcieniem polegającą na tym, że pomiaru spadku napięcia dokonuje się dwukrotnie: raz przy obciążeniu rezystancyjnym ( $\varphi_0 \approx 0^\circ$ ) i drugi raz przy obciążeniu indukcyjnym ( $\varphi_0 \approx 90^\circ$ ). Dzięki temu niezależnie wyznacza się wartość rezystancji  $R_p$  i reaktancji  $X_p$  pętli zwarcia. Odpowiedni schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 11.



Rys.11. Schemat układu do pomiaru impedancji pętli zwarcia metodą techniczną

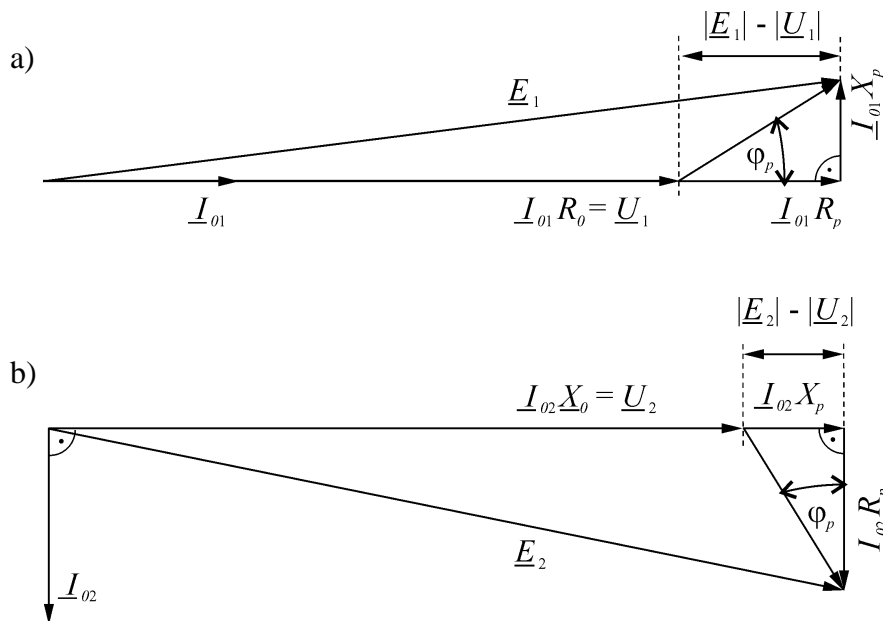
Pierwszy etap pomiaru polega na zmierzeniu napięcia  $E_1$  sieci nieobciążonej (przełącznik  $P$  w pozycji 0) i następnie napięcia  $U_1$  sieci obciążonej rezystorem  $R_0$ , czyli dla  $Z_0 = R_0$  (przełącznik  $P$  w pozycji 1). Z analizy wykresu wskazowego przedstawionego na rysunku 12

wynika, że w takiej sytuacji wektor prądu obciążenia  $I_{O1}$  jest w fazie z wektorem napięcia  $U_1$  na rezystancji obciążenia  $R_O$  i jest również w fazie ze spadkiem napięcia na rezystancji pętli zwarcia  $R_p$  (rys. 12a). Dodatkowo, ponieważ w praktyce  $Z_p \ll Z_O$ , to kąt pomiędzy wektorami  $E_1$  i  $U_1$  jest bardzo mały. Można więc przyjąć, że różnica arytmetyczna napięć  $E_1$  i  $U_1$  jest praktycznie równa spadkowi napięcia na rezystancji pętli zwarcia  $R_p$ :

$$|E_1| - |U_1| \cong I_{O1} R_p \quad (7)$$

Z pierwszego etapu pomiaru można więc na podstawie zmierzonych wartości  $E_1$  i  $U_1$ , po przekształceniu wzoru (7), wyznaczyć rezystancję pętli zwarcia  $R_p$ :

$$R_p = \frac{|E_1| - |U_1|}{I_{O1}} \quad (8)$$



Rys.12. Wykres wskazowy ilustrujący techniczną metodę pomiaru impedancji pętli zwarcia: a) dla obciążenia rezystancyjnego  $R_O$ , b) dla obciążenia reaktancyjnego indukcyjnego  $X_O$

Drugi etap pomiaru polega na zmierzeniu napięcia  $E_2$  sieci nieobciążonej (ponownie przełącznik P w pozycji 0, ponieważ ze względu na wahania napięcia sieci zazwyczaj  $E_1 \neq E_2$ ), a następnie napięcia  $U_2$  sieci obciążonej dławikiem o reaktancji  $X_O$ , czyli dla  $Z_O = X_O$  (przełącznik P w pozycji 2). Przeprowadzając analogicznie analizę wykresu wskazowego (rys. 12b) można wywnioskować, że w takiej sytuacji wektor prądu obciążenia  $I_{O2}$  jest opóźniony w fazie o  $90^\circ$  względem wektora napięcia  $U_2$  na reaktancji obciążenia  $X_O$ , który tym razem jest w fazie ze spadkiem napięcia na reaktancji pętli zwarcia  $X_p$ . Różnica arytmetyczna napięć  $E_2$  i  $U_2$  jest więc równa spadkowi napięcia na reaktancji pętli zwarcia  $X_p$ :

$$|E_2| - |U_2| \cong I_{O2} X_p \quad (9)$$

Z drugiego etapu pomiaru można więc na podstawie zmierzonych wartości  $E_2$  i  $U_2$ , po przekształceniu wzoru (9), wyznaczyć reaktancję pętli zwarcia  $X_p$ :

$$X_p = \frac{|E_2| - |U_2|}{I_{O2}} \quad (10)$$

Ostatecznie, na podstawie uzyskanych wartości rezystancji  $R_p$  i reaktancji  $X_p$  można obliczyć moduł impedancji pętli zwarcia  $Z_p$ :

$$Z_p = \sqrt{R_p^2 + X_p^2} , \quad (11)$$

oraz jej kąt fazowy  $\varphi_p$ :

$$\varphi_p = \arccos \frac{R_p}{Z_p} . \quad (12)$$

Zaletą technicznej metody pomiaru impedancji pętli zwarcia jest niezależny pomiar rezystancji  $R_p$  i reaktancji  $X_p$ , dzięki czemu uzyskujemy dokładny wynik niezależnie od kąta fazowego  $\varphi_p$ . Dodatkowo możemy uzyskać wartość kąta fazowego  $\varphi_p$ . Wadą jest konieczność pomiaru aż czterech wartości napięć i dwóch wartości prądów, dla dwóch różnych obciążeń, oraz wykonywanie stosunkowo złożonych obliczeń. Z tych względów metoda ta jest coraz rzadziej wykorzystywana w praktyce podczas sprawdzania stanu technicznego instalacji elektrycznych, jednak z powodzeniem może być stosowana w warunkach laboratoryjnych.

#### 4. Sprawdzanie mierników impedancji pętli zwarcia

##### 4.1. Błędy mierników impedancji pętli zwarcia

Pomiar impedancji pętli zwarcia metodą sztucznego zwarcia jest obarczony błędem wynikającym z faktu, że zamiast zespolonego spadku napięcia  $\Delta \underline{U} = \underline{E} - \underline{U}$  (3) mierzona jest strata napięcia  $|\underline{E}| - |\underline{U}|$  (4), jako różnica wskazań woltomierza przy pomiarze napięcia w sieci nieobciążonej i obciążonej. Jak wynika z wykresu fazowego (rys. 9), błąd ten będzie zawsze ujemny, gdyż wektory  $\underline{E}$ ,  $\underline{U}$  oraz  $\Delta \underline{U}$  stanowią boki trójkąta, a więc zawsze suma długości dwóch z nich będzie większa od długości trzeciego. Względny błąd  $\delta Z_p$  pomiaru impedancji  $Z_p$  będzie równy:

$$\delta Z_p = \frac{Z_p - Z_{p \text{ odn}}}{Z_{p \text{ odn}}} , \quad (13)$$

gdzie  $Z_{p \text{ odn}}$  jest wartością odniesienia równą prawdziwej wartości impedancji pętli zwarcia. Błąd ten będzie równy zero, gdy kąt fazowy impedancji pętli zwarcia  $\varphi_p$  będzie równy kątowi fazowemu impedancji obciążenia  $\varphi_o$  (rys. 10), wtedy spadek napięcia będzie równy stracie napięcia  $\Delta \underline{U} = \underline{E} - \underline{U} = |\underline{E}| - |\underline{U}|$ . Głównym źródłem błędów mierników impedancji pętli zwarcia wykorzystujących metodę sztucznego zwarcia jest więc nierówność kątów fazowych impedancji mierzonej  $\varphi_p$  i impedancji obciążenia  $\varphi_o$ . Wartość tego błędu zależy od różnicy kątów  $\varphi_p - \varphi_o$  oraz od stosunku impedancji  $Z_p / Z_o$ :

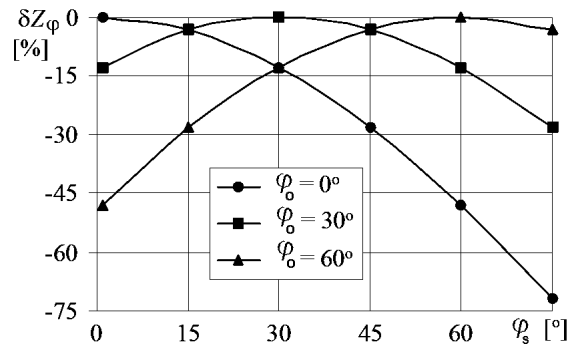
$$\delta Z_\varphi = \frac{\sqrt{1 + \kappa^2 + 2\kappa \cos(\varphi_p - \varphi_o)} - 1}{\kappa} - 1 , \quad (14)$$

gdzie:

$$\kappa = \frac{Z_p}{Z_o} . \quad (15)$$

Na rysunku 13 przedstawiono zależność (14) dla różnych wartości kątów  $\varphi_p$ ,  $\varphi_o$  oraz dla wartości impedancji  $Z_p = 1 \Omega$  i  $Z_o = 20 \Omega$ . Należy zauważyć, że błąd ten jest zawsze ujemny i może osiągać bardzo duże wartości, nawet powyżej 60%. Dlatego pomiary impedancji pętli zwarcia zazwyczaj są bardzo mało dokładne. Norma [11] dopuszcza podczas sprawdzania skuteczności zabezpieczeń przeciwporażeniowych wykonywanie pomiarów impedancji pętli zwarcia z błędami nie większymi niż 30 % (trzydzieści procentów !!!), a więc bardzo dużymi. Ujemna wartość błędów jest bardzo niekorzystna, gdyż wartość impedancji pętli zwarcia  $Z_p$  jest zaniżana, a tym samym wartość spodziewanego prądu zwarciovego jest zawyżana, co oznacza, że wyniki pomiarów mogą sugerować spełnienie warunku

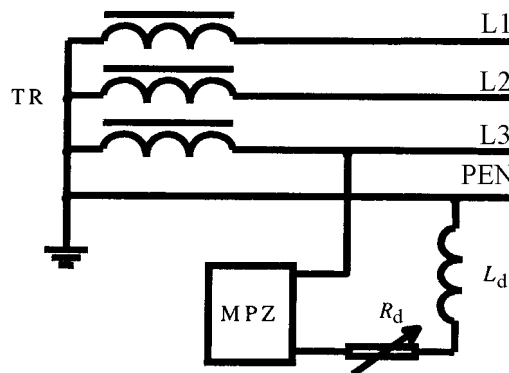
skuteczności zabezpieczenia (1), podczas gdy w rzeczywistości zabezpieczenie może być nieskuteczne. Z analizy wykresu wynika, że impedancja obciążenia  $Z_O$  powinna posiadać kąt fazowy  $\varphi_O$  zbliżony do  $30^\circ$ , gdyż wtedy błąd  $\delta Z_\varphi$  jest stosunkowo mały i nie przekracza 15 % dla kątów  $\varphi_p$  z zakresu od  $0^\circ$  do  $60^\circ$ . Z tego względu zazwyczaj producenci mierników impedancji pętli zwarcia stosują impedancję obciążenia o kącie fazowym zbliżonym do tej właśnie wartości.



Rys.13. Względny błąd pomiaru impedancji pętli zwarcia  $\delta Z$  metodą sztucznego zwarcia w zależności od kąta fazowego  $\varphi_O$  obciążenia oraz kąta fazowego  $\varphi_S$  mierzonej impedancji dla  $Z_O=20 \Omega$ ,  $Z_p=1 \Omega$

#### 4.2. Zasada sprawdzania mierników impedancji pętli zwarcia

Sposób sprawdzania mierników impedancji pętli jest opisany w zarządzeniu Prezesa GUM [13]. Na rysunku 14 przedstawiono zalecany układ pomiarowy do wyznaczania błędów miernika impedancji pętli zwarcia MPZ. Miernik należy dołączyć do sieci zasilającej poprzez impedancję dodatkową złożoną z rezystora  $R_d$  i cewki powietrznej  $L_d$ .



Rys.14. Zalecany układ pomiarowy do wyznaczania błędów mierników impedancji pętli według GUM [13]

Błędy sprawdzanego miernika MPZ oblicza się ze wzoru (13), przy czym impedancję odniesienia  $Z_{p\ odn}$  wyznacza się poprzez pomiar miernikiem wzorcowym, który powinien być co najmniej o rząd wielkości dokładniejszy od miernika sprawdzanego. Można również błąd sprawdzanego miernika MPZ wyznaczyć względem impedancji obliczonej  $Z'_{p\ obl}$  dla sieci wydłużonej dodatkowymi elementami  $R_d$  i  $L_d$ . Impedancję pętli wydłużonej  $Z'_{p\ obl}$  oblicza się na podstawie impedancji  $Z_p = R_p + jX_p$  zmierzonej bezpośrednio na zaciskach sieci oraz znanych wartości  $R_d$  i  $L_d$ :

$$Z'_{p\ obl} = \sqrt{(R_p + R_d)^2 + (X_p + X_d)^2} \quad , \quad (16)$$

przy czym:

$$X_d = 2\pi f L_d \quad . \quad (17)$$

W praktyce możemy ograniczyć się do stosowania tylko rezystora  $R_d$ , gdyż w rzeczywistej sieci wraz ze zwiększaniem jej długości rośnie przede wszystkim jej rezystancja, a indukcyjność zmienia się niewiele:

$$Z'_{p\text{obl}} = \sqrt{(R_p + R_d)^2 + X_p^2} . \quad (18)$$

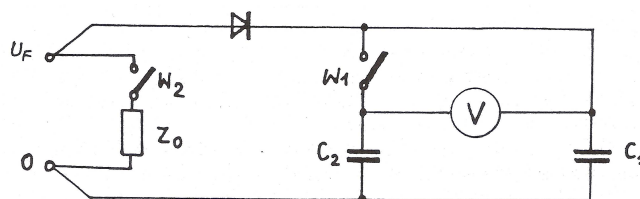
Ostatecznie błąd sprawdzanego miernika wyliczymy z zależności:

$$\delta Z'_p = \frac{Z'_p - Z'_{p\text{obl}}}{Z'_{p\text{obl}}} . \quad (19)$$

## 5. Przykładowe konstrukcje mierników impedancji pętli zwarcia

W praktyce można spotkać się z wieloma konstrukcjami mierników impedancji pętli zwarcia [18]. Wykorzystują one metodę sztucznego zwarcia, różnią się natomiast sposobem pomiaru różnicy siły elektromotorycznej  $\underline{E}$  i napięcia  $\underline{U}$  sieci obciążonej. W większości przypadków wyznaczają one różnicę modułów  $|\underline{E}| - |\underline{U}|$ , ale niektóre z nich wyznaczają moduł różnicy  $|\underline{E} - \underline{U}|$  - te są oczywiście dokładniejsze.

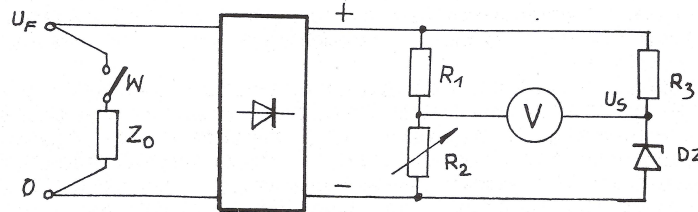
Na rysunku 15 przedstawiono uproszczony schemat miernika impedancji pętli zwarcia wykorzystującego kondensator  $C_2$  do zapamiętania wartości napięcia  $U$  podczas obciążenia sieci impedancją  $Z_0$ . W chwili początkowej po dołączeniu miernika do sieci oba łączniki: W1 i W2 są otwarte. Następnie oba łączniki zamyka się. Zamknięcie W2 skutkuje dołączeniem obciążenia  $Z_0$  powodując powstanie sztucznego zwarcia i obniżenie napięcia w sieci do wartości  $U$ . Jednocześnie, przy zamkniętym W1 oba kondensatory ładują się do napięcia  $U$ , a wskazanie woltomierza jest równe zero. Następnie otwiera się łącznik W1 i natychmiast potem W2. Wskutek odłączenia przez W2 obciążenia  $Z_0$  napięcie sieci wzrasta i doładowuje kondensator  $C_1$  do wartości  $E$ , podczas gdy przy otwartym W1 kondensator  $C_2$  zachowuje w dalszym ciągu napięcie  $U$ , czyli "pamięta" wartość  $U$ . Woltomierz wskaże więc bezpośrednio różnicę  $|\underline{E}| - |\underline{U}|$ . Wskazanie woltomierza należy odczytywać szybko, gdyż kondensator "pamiętający"  $C_2$  doładowuje się przez rezystancję woltomierza i wskazanie woltomierza maleje wykładniczo do zera. Przy znanej wartości impedancji  $Z_0$  i znamionowej wartości napięcia w sieci  $U_{zn}$  można przyjąć, że znana jest wartość prądu  $I_0 = U_{zn} / Z_0$ , a wtedy woltomierz może być wyskalowany od razu w  $\Omega$  dla wartości  $Z_p = Z_0(|\underline{E}| - |\underline{U}|) / U_{zn}$ . Metodę tę wykorzystywały krajowe mierniki starszego typu MZ-3.



Rys.15. Uproszczony schemat miernika do pomiaru impedancji pętli zwarcia z zapamiętywaniem napięcia sieci z wykorzystaniem kondensatorów  $C_1, C_2$

Na rysunku 16 przedstawiono uproszczony schemat miernika impedancji pętli zwarcia wykorzystującego diodę Zenera i regulowany dzielnik napięcia do zapamiętania wartości napięcia  $E$  sieci nieobciążonej. W pierwszym etapie pomiaru po dołączeniu miernika do sieci łącznik W jest otwarty i wyprostowane napięcie nieobciążonej sieci  $E$  przyłożone jest do regulowanego dzielnika napięcia  $R_1 | R_2$ , którego przekładnię  $m = R_2 / (R_1 + R_2)$  doregulowuje się ręcznie tak, aby jego napięcie wyjściowe  $mE$  było równe wartości napięcia  $U_Z$  na diodzie Zenera DZ. Wskaźnikiem równości napięć  $U_Z = mE$  jest woltomierz, który powinien wskazać zero. Następnie zamyka się łącznik W, który załącza obciążenie  $Z_0$ , skutkiem czego napięcie

sieci maleje do wartości  $U$  i napięcie wyjściowe dzielnika staje się równe  $mU$ , podczas gdy napięcie na diodzie zenera  $U_Z$  pozostaje równe  $mE$ . Woltomierz mierzący różnicę tych napięć wskaże więc wartość  $m(|E| - |U|)$  i może być wyskalowany bezpośrednio w  $\Omega$  dla wartości  $Z_p = (|E| - |U|) / I_0$ , przy znanej wartości obciążenia  $Z_0$  i założonej wartości napięcia znamionowego sieci  $U_{zn}$ . Metodę tę wykorzystywały krajowe mierniki typu MZK-2.



Rys.16. Uproszczony schemat miernika do pomiaru impedancji pętli zwarcia z zapamiętywaniem napięcia sieci z wykorzystaniem diody zenera  $D_Z$  i regulowanego dzielnika napięcia  $R_1, R_2$

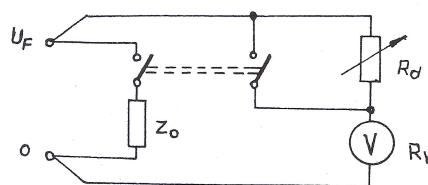
Na rysunku 17 przedstawiono uproszczony schemat miernika impedancji pętli zwarcia wykorzystującego metodę zerową. Polega ona na tym, że równocześnie z włączeniem obciążenia  $Z_0$  zwiększa się skokowo czułość woltomierza (wskutek zwarcia części rezystancji szeregowej  $R_d$  woltomierza) tak, aby jego wskazanie pozostało dokładnie bez zmian. Wymaga to doregulowania zwieranego rezystora  $R_d$ , włączonego szeregowo z woltomierzem o rezystancji  $R_V$ , podczas każdego pomiaru. Równość wskazań woltomierza oznacza jednakową wartość prądu przepływającego przez niego podczas obu etapów pomiaru, stąd :

$$\frac{U}{R_V} = \frac{E}{R_V + R_d} \quad (20)$$

Po prostych przekształceniach można wykazać, że:

$$Z_p = R_d \frac{Z_0}{R_V} \quad (21)$$

Traktując stosunek  $Z_0 / R_V$  jako stały współczynnik, można wyskalować regulowany rezystor  $R_d$  bezpośrednio dla wartości  $Z_p$  w  $\Omega$ .

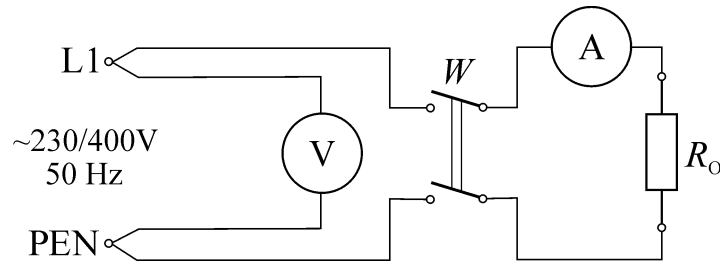


Rys.17. Uproszczony schemat miernika do pomiaru impedancji pętli zwarcia metodą zerową ze zmianą czułości woltomierza za pomocą regulowanego rezystora dodatkowego  $R_d$

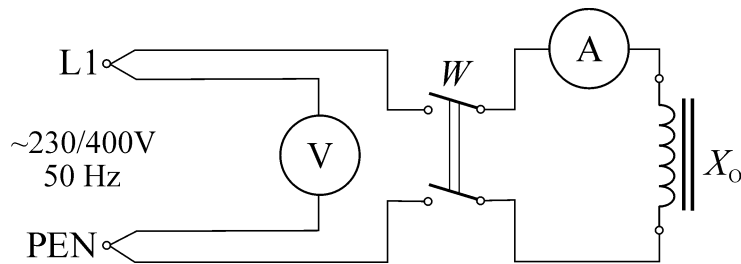
Współczesne mierniki impedancji pętli zwarcia w większym stopniu wykorzystują technikę cyfrową i układy mikroprocesorowe [14], jednak ich podstawowa zasada działania pozostaje taka sama i opiera się na metodzie sztucznego zwarcia. Istotną trudność sprawiają pomiary impedancji pętli zwarcia w sieciach z wyłącznikami różnicowoprądowymi RCD, które automatycznie wyłączają zasilanie przy sztucznym zwarcu realizowanym przez miernik impedancji pętli zwarcia. W takim przypadku na czas pomiaru należy zablokować działanie wyłącznika RCD lub zastosować miernik wykonujący pomiar w bardzo krótkim czasie, krótszym od czasu zadziałania wyłącznika RCD.

## 6. Wykonanie ćwiczenia

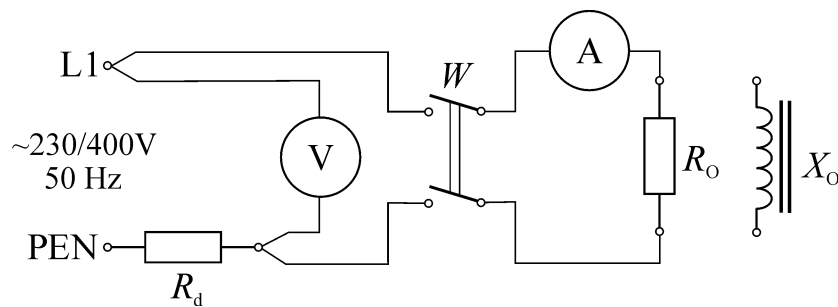
### 6.1. Układy połączeń stosowane w ćwiczeniu



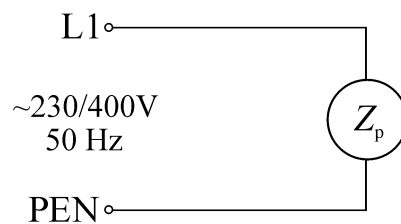
Rys.18. Pomiar impedancji pętli zwarcia metodą techniczną przy obciążeniu rezystancyjnym



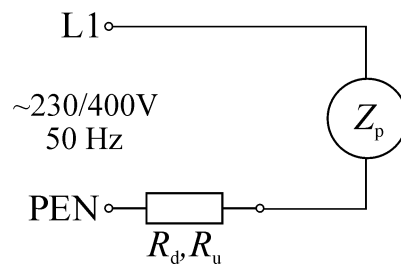
Rys.19. Pomiar impedancji pętli zwarcia metodą techniczną przy obciążeniu reaktancyjnym



Rys.20. Pomiar metodą techniczną impedancji pętli zwarcia wydłużonej rezystorem dodatkowym  $R_d$



Rys.21. Pomiar impedancji pętli zwarcia firmowym miernikiem bezpośrednio na zaciskach sieci



Rys.22. Pomiar impedancji pętli zwarcia firmowym miernikiem dla sieci wydłużonej rezystorem dodatkowym  $R_d$  oraz dla sieci z symulowanym brakiem ciągłości pętli zwarcia za pomocą rezystora  $R_u$



Oznaczenia zastosowane na schematach:

$A$  – amperomierz,

$V$  – woltomierz,

$Z_p$  – miernik impedancji pętli zwarcia,

$R_O$  – obciążenie rezystancyjne podczas sztucznego zwarcia,

$X_O$  – obciążenie reaktancyjne obciążające podczas sztucznego zwarcia,

$R_d$  – rezystancja dodatkowa przedłużająca pętlę zwarcia,

$R_u$  – rezystancja symulująca uszkodzenie sieci zasilającej - brak ciągłości pętli zwarcia,

$W$  – łącznik dwubiegunowy,

$L1$  – zacisk przewodu pierwszej fazy w sieci trójfazowej,

$PEN$  – zacisk przewodu ochronno-neutralnego w sieci o układzie TN-C.

### Uwaga !!!

- W czasie ćwiczenia **przed rozpoczęciem pomiarów** należy w protokole zapisać obok oznaczeń użytych przyrządów ich charakterystykę techniczną. Należy bezwzględnie **na każdym** przyrządzie stosowanym w ćwiczeniu odszukać jego tabliczkę znamionową (lub dołączoną do niego dokumentację techniczną) i **przepisać wszystkie** dostępne informacje, również w postaci symboli graficznych. Ze szczególną uwagą należy **zapoznać się** z danymi technicznymi wykorzystywanego miernika impedancji pętli zwarcia.

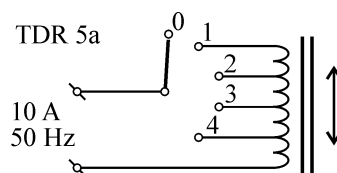
- Ze względu na wykonywanie pomiarów bezpośrednio na zaciskach sieci energetycznej 230/400 V należy zachować szczególną ostrożność. Z tego względu należy pamiętać, że **przewody połączeniowe można dołączać do zacisków L i PEN sieci zasilającej wyłącznie na wyraźne zezwolenie osoby prowadzącej ćwiczenia i tylko po uprzednim upewnieniu się, że napięcie zasilające stanowisko jest wyłączone.**

- Zawsze należy bezwzględnie **wyłączać zasilanie stanowiska po wykonaniu pomiarów** i przed przystąpieniem do zmiany układu połączeń.

- Zawsze po dokonaniu zmiany w układzie połączeń należy zgłosić układ do sprawdzenia prowadzącemu zajęcia, przed ponownym dołączeniem przewodów połączeniowych do zacisków sieci zasilającej stanowisko.

## 6.2. Przygotowanie obciążenia reaktancyjnego do pracy

Do wykonania pomiarów impedancji pętli zwarcia niezbędne jest wykorzystanie obciążenia o charakterze reaktancyjnym. Do tego celu w ćwiczeniu będzie zastosowany dławik typu TDR 5a, stosowany do regulacji prądu w obwodach pomiarowych zasilanych napięciem przemiennym 50 Hz. Indukcyjność dławika może być zmieniana skokowo oraz płynnie. Schemat dławika przedstawiono na rysunku 23.



Rys.23. Schemat ideowy dławika TDR 5a stosowanego jako obciążenie reaktancyjne

Dławik posiada uzwojenie z wyprowadzonymi czterema odczepami i przełącznik umożliwiający skokową zmianę jego indukcyjności. W pozycji "0" przełącznika obwód dławika jest rozłączony. W pozycji "1" dławik ma największą indukcyjność, a więc przy zadanym napięciu popłynie przez niego najmniejszy prąd. W pozycji "4" dławik ma najmniejszą indukcyjność i przy zadanym napięciu popłynie przez niego największy prąd. Dodatkowo, wewnątrz uzwojenia znajduje się ruchomy rdzeń ferromagnetyczny umożliwiający płynną regulację indukcyjności dławika. Położenie rdzenia regulowane jest pokrętką znajdującą się na obudowie dławika, połączoną ze śrubą prawoskrętną, której

nakrętka przymocowana jest do rdzenia. Najniższemu, dolnemu położeniu rdzenia odpowiada największa indukcyjność dławika. Obracając pokrętle regulacyjnym w prawo (czyli zgodnie z ruchem wskazówek zegara patrząc na dławik od góry) rdzeń jest wyciągany z uzwojenia w górę i indukcyjność dławika zmniejsza się, a prąd w układzie zwiększa się. Pełna regulacja indukcyjność dławika obejmuje **100 obrotów pokrętła regulacyjnego**.

Stosowanie dławika w układzie pomiarowym niesie ze sobą pewne **ryzyko przeciążenia**, ponieważ położenie rdzenia nie jest widoczne poprzez obudowę dławika. Dlatego zawsze przed rozpoczęciem pomiarów należy przełącznik przełączyć w pozycję "0" oraz ustawić maksymalną indukcyjność dławika poprzez opuszczenie rdzenia w skrajne dolne położenie. W tym celu należy obracać pokrętle regulacyjnym w lewą stronę do wystąpienia wyraźnego oporu ruchu. **Pomiary należy zawsze rozpoczynać od położenia "1" przełącznika**, z rdzeniem w skrajnym dolnym położeniu, co zapewnia maksymalną indukcyjność dławika, a więc minimalną wartość prądu w obwodzie. Dopiero w następnej kolejności można ustawiać przełącznik w kolejne pozycje i regulować położenia rdzenia, zależnie od wymaganego prądu. W celu ułatwienia posługiwania się dławikiem w tabeli 3 zamieszczono wybrane parametry dławika. Warto zwrócić uwagę, że kąt fazowy dławika jest bliski 90 stopniom, a więc dławik można praktycznie uznać za idealną indukcyjność, o pomijalnie małej rezystancji ( $X \approx Z$ ).

Tabela 3. Wybrane parametry dławika TDR 5a przy napięciu 230 V / 50 Hz

Pozycja przełącznik	Lewe skrajne położenie pokrętła				N obrotów pokrętła w prawo					$R =$
	$I_{min}$	$Z_{max}$	$\varphi$	$L_{max}$	$N$	$I_{max}$	$Z_{min}$	$\varphi$	$L_{min}$	
a	A	$\Omega$	stopnie	H	obr.	A	$\Omega$	stopnie	H	$\Omega$
0	WYŁ.	-	-	-	-	WYŁ.	-	-	-	-
1	0,1	2300	89,98	7,3248	76	10	23	83,80	0,0728	2,5
2	0,4	575	89,89	1,8312	50			86,05	0,0731	1,6
3	1,0	230	89,72	0,7325	22			86,80	0,0731	1,3
4	2,2	105	89,77	0,3329	7			88,80	0,0732	0,5

### 6.3. Pomiary impedancji pętli zwarcia metodą techniczną

#### 6.3.1. Pomiary przy obciążeniu rezystancyjnym bezpośrednio na zaciskach sieci

Zapoznać się z oznaczeniem zacisków na tablicy zasilającej stanowisko laboratoryjne i zanotować do protokołu typ układu sieci zastosowany w laboratorium.

Połączyć układ pomiarowy wg schematu na rysunku 18. Jako obciążenie rezystancyjne  $R_0$  zastosować grzejnik elektryczny dużej mocy. Na podstawie mocy znamionowej grzejnika oszacować prąd i dobrać zakres amperomierza. Wykonać kolejno kilka pomiarów na przemian: napięcia  $U$  sieci obciążonej rezystancyjnie i siły elektromotorycznej  $E$  sieci nieobciążonej. Wyniki pomiarów zapisywać w tabeli 4.

#### Uwagi do sposobu wykonywania pomiarów.

1. Impedancja pętli zwarcia jest mała, wobec czego wartości napięcia  $U$  i siły elektromotorycznej  $E$  będą bliskie sobie. Dlatego, aby wyznaczyć ich różnicę bez nadmiernych błędów, należy odczytywać wskazania mierników możliwie dokładnie. Szczególnie istotne jest, aby wskazania woltomierza odczytywać precyzyjnie z rozdzielczością  $\frac{1}{5}$  działki i nie zaokrąglić ich bardziej.

2. Po załączeniu obciążenia należy zwrócić uwagę, że wartość prądu początkowo zmniejsza się, ponieważ wraz z rozgrzewaniem się grzejnika jego rezystancja rośnie. Wynika to z faktu, że uzwojenie grzejne wykonane jest z metalu, który posiada dodatni współczynnik temperaturowy rezystancji. Dlatego przed rozpoczęciem odczytów z mierników należy odczekać, aż wartość prądu ustabilizuje się i zmiany wskazań amperomierza będą niezauważalne.

3. Aby zminimalizować błędy związane z nagrzewaniem się grzejnika, najlepiej jest najpierw odczytywać wartość napięcia  $U$  (po ustabilizowaniu się wartości prądu), a dopiero potem, po wyłączeniu obciążenia, odczytywać wartość siły elektromotorycznej  $E$ . Kolejne pomiary  $U$  i  $E$  należy wykonywać możliwie szybko, aby grzejnik nie wystygł nadmiernie w czasie pomiędzy nimi.

4. Należy również zwrócić uwagę na występujące czasem w sieci energetycznej skoki i wahania napięcia, które można łatwo zidentyfikować na podstawie znacznie różniących się kolejnych odczytach wartości  $E$  lub  $U$ . W takim przypadku należy wstrzymać się przez pewien czas z pomiarami, aż do ustabilizowania się wartości napięcia w sieci.

Tabela 4. Wyniki pomiarów i obliczeń impedancji pętli zwarcia  $Z_p$  mierzonej metodą techniczną bezpośrednio na zaciskach sieci 230/400 V

Rodzaj obciążenia	POMIARY				OBLICZENIA				
	Ip	$I_{O1}$	$U_1$	$E_1$	$\Delta U_1$	$R_p$	$R_{psr}$	$Z_p$	$\varphi_p$
		A	V	V	V	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	stopnie
$R_o$	1								
	2								
	3								
	4								
	5								
$X_o$	Ip	$I_{O2}$	$U_2$	$E_2$	$\Delta U_2$	$X_p$	$X_{psr}$		
		A	V	V	V	$\Omega$	$\Omega$		
	1								
	2								
	3								
	4								
	5								

### 6.3.2. Pomiary przy obciążeniu reaktancyjnym bezpośrednio na zaciskach sieci

Połączyć układ pomiarowy wg schematu na rysunku 19. Jako obciążenie reaktancyjne  $X_o$  zastosować regulowany dławik TDR 5a. Podczas pomiarów z użyciem dławika należy stosować się do uwag zawartych w p. 6.2. Przed pomiarami ustawić pokrętło regulacyjne dławika w lewym skrajnym położeniu i przełącznik odczepów na pozycję "0". Załączyć zasilanie, zamknąć łącznik W i przełącznik odczepów dławika ustawić na pozycję "1". Odczytać wartość prądu i porównać ją z wartością podaną w tabelce 3, upewniając się że układ pracuje prawidłowo. Dobrać pozycję przełącznika odczepów dławika i pokrętła płynnej regulacji tak, aby uzyskać wartość prądu zbliżoną do prądu pobieranego przez obciążenie rezystancyjne w poprzednim punkcie ćwiczenia. Do tego celu pomocne są dane zawarte w tabelce 3.

Po uzyskaniu odpowiedniej wartości prądu odczytać wartość napięcia  $U$  sieci obciążonej reaktancyjnie, a po otwarciu łącznika W odczytać wartość siły elektromotorycznej  $E$  sieci nieobciążonej. Powtórzyć pomiary kilkakrotnie, kontynuując ich zapis w tabeli 4.

#### Uwagi do sposobu wykonywania pomiarów.

1. Podobnie jak w poprzednim punkcie, wartości napięcia  $U$  i siły elektromotorycznej  $E$  będą bliskie sobie, więc bardzo ważne jest precyzyjne odczytywanie wskazań woltomierza z rozdzielczością  $1/5$  działki, bez nadmiernego zaokrąglania.

2. Po odpowiednim dobraniu pozycji przełącznika odczepów i pokrętła płynnej regulacji indukcyjności dławika nie należy ich zmieniać, aż do zakończenia programu ćwiczenia. Po wykonaniu wszystkich pomiarów ustawić elementy regulacyjne dławika w pozycjach początkowych.

6.3.3. Pomiary przy pętli zwarcia wydłużonej dodatkowym rezystorem

Połączyć układ pomiarowy wg schematu na rysunku 20. Jako element wydłużający pętlę zwarcia zastosować rezystor  $R_d=1,9 \Omega$ . Wykonać pomiary impedancji wydłużonej pętli zwarcia analogicznie jak w punktach 6.3.1, 6.3.2, stosując kolejno obciążenie rezystancyjne  $R_o$  (grzejnik) i reaktancyjne  $X_o$  (dławik), pamiętając o wszystkich wcześniejszych uwagach dotyczących sposobu wykonywania pomiarów. Wyniki pomiarów zapisywać w tabelce 5.

Tabela 5. Wyniki pomiarów i obliczeń impedancji wydłużonej pętli zwarcia  $Z'_p$  mierzonej metodą techniczną

Rodzaj obciążenia	POMIARY				OBLICZENIA				
	lp	$I_{O1}$	$U_1$	$E_1$	$\Delta U_1$	$R'_p$	$R'_{p\overline{s}r}$	$Z'_p$	$\varphi'_p$
		A	V	V	V	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	stopnie
$R_o$	1								
	2								
	3								
	4								
	5								
$X_o$	lp	$I_{O2}$	$U_2$	$E_2$	$\Delta U_2$	$X'_p$	$X'_{p\overline{s}r}$		
		A	V	V	V	$\Omega$	$\Omega$		
	1								
	2								
	3								
	4								
	5								

W sprawozdaniu należy:

1. Dla każdej pary wartości  $E$  i  $U$  zmierzonych w p. 6.3.1 i 6.3.2 obliczyć odpowiednio rezystancję pętli zwarcia  $R_p$  (8), reaktancję pętli zwarcia  $X_p$  (10) i ich wartości średnie. Z wartości średnich  $R_{p\overline{s}r}$ ,  $X_{p\overline{s}r}$  obliczyć impedancję pętli zwarcia  $Z_p$  (11) oraz jej kąt fazowy  $\varphi_p$  (12). Wyniki obliczeń zapisywać do tabeli 4.

2. Analogicznie, dla każdej pary wartości  $E$  i  $U$  zmierzonych w p. 6.3.3 obliczyć odpowiednio rezystancję wydłużonej pętli zwarcia  $R'_p$  (8), reaktancję wydłużonej pętli zwarcia  $X'_p$  (10), uśrednić je i z wartości średnich obliczyć impedancję wydłużonej pętli zwarcia  $Z'_p$  (11) oraz jej kąt fazowy  $\varphi'_p$  (12). Wyniki obliczeń zapisywać do tabeli 5.

3. Zestawić w tabeli 6 wyniki pomiarów i obliczeń z punktów 6.3.1, 6.3.2, 6.3.2 i na ich podstawie obliczyć błąd względny  $\delta Z'_p$  (19) pomiaru metodą techniczną impedancji wydłużonej pętli zwarcia  $Z'_p$ , przyjmując za wartość odniesienia  $Z'_{p\text{obl}}$  (18), obliczoną na podstawie impedancji pętli zwarcia  $Z_p$  zmierzonej bezpośrednio na zaciskach sieci oraz wartości rezystancji dodatkowej  $R_d$ .

Tabela 6. Zestawienie wyników pomiarów oraz obliczenie błędu pomiaru impedancji wydłużonej pętli zwarcia  $\delta Z'_p$  dla metody technicznej

WARTOŚCI Z POMIARÓW								OBLICZENIA			
$R_{p\overline{s}r}$	$X_{p\overline{s}r}$	$Z_p$	$\varphi_p$	$R'_{p\overline{s}r}$	$X'_{p\overline{s}r}$	$Z'_p$	$\varphi'_p$	$R_{p\overline{s}r}+R_d$	$X_p$	$Z'_{p\text{obl}}$	$\delta Z'_p$
$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	stopnie	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	stopnie	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	%

## 6.4. Pomiary impedancji pętli zwarcia przyrządem fabrycznym

### 6.4.1. Zapoznanie się z fabrycznym miernikiem impedancji pętli zwarcia

Ustalić typ i producenta fabrycznego miernika impedancji pętli zwarcia. Zapoznać się z instrukcją obsługi, odszukać i zanotować do protokołu najważniejsze dane: typ, producent, rok produkcji, zakresy pomiarowe, błędy, inne funkcje pomiarowe (jeśli miernik je posiada), metoda pomiaru (jeśli jest opisana w instrukcji obsługi). Zapoznać się z procedurą wykonywania pomiarów, zwrócić uwagę na sposób wstępnej kontroli ciągłości pętli zwarcia.

Jeśli na stanowisku będą dostępne dwa lub więcej mierników impedancji pętli zwarcia, należy wybrać jeden z nich do wykonania pomiarów. Do protokołu należy zanotować, czym kierowano się wybierając konkretny przyrząd do pomiarów.

**Uwaga:** instrukcje obsługi do mierników impedancji pętli zwarcia stosowanych w laboratorium są dostępne w Internecie razem z instrukcjami do ćwiczeń laboratoryjnych. **Należy bezwzględnie zapoznać się z instrukcją obsługi miernika przed zajęciami!**

### 6.4.2. Wstępne sprawdzenie sprawności sieci zasilającej

Na podstawie instrukcji obsługi miernika zanotować do protokołu sposób przeprowadzania kontroli ciągłości pętli zwarcia.

Dołączyć miernik impedancji pętli zwarcia do sieci zasilającej zgodnie ze schematem na rysunku 21. Przeprowadzić kontrolę ciągłości pętli zwarcia według instrukcji obsługi miernika. Zapisać rezultat przeprowadzonej kontroli do protokołu.

**Uwaga: jeśli kontrola wykaże brak ciągłości pętli zwarcia nie wolno kontynuować pomiarów!. Zgłosić ten fakt prowadzącemu zajęcia.**

### 6.4.3. Pomiary przyrządem fabrycznym bezpośrednio na zaciskach sieci

Zmierzyć kilkakrotnie impedancję pętli zwarcia firmowym miernikiem w układzie przedstawionym na rysunku 21. Jeśli miernik umożliwia również odczyt rezystancji, reaktancji lub kąta fazowego pętli zwarcia, również należy je wykonać. Uśrednić wyniki pomiarów. Wyniki pomiarów i obliczeń zapisać do tabeli 7.

Tabela 7. Wyniki pomiarów i obliczeń impedancji pętli zwarcia  $Z_p$  mierzonej przyrządem fabrycznym bezpośrednio na zaciskach sieci 230/400 V

POMIARY					OBLICZENIA			
lp	$Z_p$	$R_p$	$X_p$	$\varphi_p$	$Z_{pśr}$	$R_{pśr}$	$X_{pśr}$	$\varphi_{pśr}$
	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	stopnie	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	stopnie
1								
2								
3								
4								
5								

### 6.4.4. Pomiary przy pętli zwarcia wydłużonej dodatkowym rezystorem

Połączyć układ pomiarowy wg schematu na rysunku 22. Jako element wydłużający pętlę zwarcia zastosować rezystor  $R_d=1,9 \Omega$ . Wykonać pomiary impedancji wydłużonej pętli zwarcia analogicznie jak w punkcie 6.4.3 Wyniki pomiarów i obliczeń zapisać do tabeli 8.

Tabela 8. Wyniki pomiarów i obliczeń impedancji wydłużonej pętli zwarcia  $Z'_p$  mierzonej przyrządem fabrycznym

POMIARY					OBLICZENIA			
lp	$Z'_p$	$R'_p$	$X'_p$	$\varphi'_p$	$Z'_{p\acute{s}r}$	$R'_{p\acute{s}r}$	$X'_{p\acute{s}r}$	$\varphi'_{p\acute{s}r}$
	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	stopnie	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	stopnie
1								
2								
3								
4								
5								

Zestawić w tabeli 9 wyniki pomiarów i obliczeń z punktów 6.4.3, 6.4.4 i na ich podstawie obliczyć błąd względny  $\delta Z'_p$  (19) pomiaru fabrycznym miernikiem impedancji wydłużonej pętli zwarcia  $Z'_p$ . Sposób postępowania jest analogiczny do opisanego w punkcie 6.3.3.

**Uwaga:** jeśli przyrząd fabryczny pokazuje tylko wartość impedancji pętli zwarcia i nie umożliwia odczytu wszystkich pozostałych wartości występujących w tabelce 9, należy przyjąć kąt fazowy pętli zwarcia na podstawie tabelki 6 i wyliczyć brakujące wartości z odpowiednich zależności trygonometrycznych (należy je wyprowadzić samodzielnie i podać w sprawozdaniu).

Tabela 9. Zestawienie wyników pomiarów oraz obliczenie błędu pomiaru impedancji wydłużonej pętli zwarcia  $\delta Z'_p$  dla pomiarów wykonanych przyrządem fabrycznym

WARTOŚCI Z POMIARÓW								OBLICZENIA			
$R_{p\acute{s}r}$	$X_{p\acute{s}r}$	$Z_{p\acute{s}r}$	$\varphi_p$	$R'_{p\acute{s}r}$	$X'_{p\acute{s}r}$	$Z'_{p\acute{s}r}$	$\varphi'_p$	$R_{p\acute{s}r}+R_d$	$X_{p\acute{s}r}$	$Z'_{p\text{obl}}$	$\delta Z'_p$
$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	stopnie	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	stopnie	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	%

#### 6.4.5. Sprawdzenie działania układu kontroli ciągłości pętli zwarcia

Połączyć układ pomiarowy wg schematu na rysunku 22, stosując jako element symulujący uszkodzenie pętli zwarcia rezystor  $R_u \geq 1000 \Omega/50W$ . Przeprowadzić kontrolę ciągłości pętli zwarcia według instrukcji obsługi miernika. Zapisać rezultat przeprowadzonej kontroli do protokołu.

### 6.5. Opracowanie wyników pomiarów i przygotowanie sprawozdania

W sprawozdaniu należy zamieścić opis stanowiska pomiarowego oraz w punktach kolejno faktycznie zrealizowane zadania pomiarowe podając: temat zadania pomiarowego, schemat układu pomiarowego, wykaz przyrządów i ich parametry metrologiczne, tabelki z wynikami pomiarów i obliczeń, niezbędne wzory obliczeniowe, przykładowe obliczenia.

We wnioskach należy przedstawić **własne uwagi na temat zrealizowanych pomiarów**, napotkane trudności, niezrealizowane punkty programu ćwiczenia (i przyczynę) oraz ocenę uzyskanych wyników. W szczególności ustosunkować się do następujących zagadnień:

- Czy wyniki pomiarów impedancji pętli zwarcia wykonane metodą techniczną i za pomocą firmowego miernika impedancji pętli zwarcia są ze sobą zgodne ?
- Jakiej wartości prądu zwarciovego można spodziewać na stanowisku laboratoryjnym ?
- Czy zmierzona wartość impedancji pętli zwarcia pozwala stwierdzić, że ochrona przeciwporażeniowa spełnia wymagania ?
- Jaki kąt fazowy miała zmierzona impedancja pętli zwarcia i jak on wpływał na błędy pomiaru impedancji ?

- Jakie wartości błędów uzyskano w pomiarach impedancji pętli zwarcia metodą techniczną i za pomocą firmowego miernika impedancji pętli zwarcia?
- Czy uzyskane wartości błędów mieszczą się w granicach określonych w Normie ?
- Jaką metodę pomiaru wykorzystano w firmowym mierniku impedancji pętli zwarcia ?
- Jakie parametry impedancji pętli zwarcia mierzy miernik fabryczny ?
- Które wartości w tabelce 9 zostały zmierzone miernikiem fabrycznym, a które zostały wyliczone na podstawie kąta fazowego z tabelki 6 ? Jakie wzory zastosowano do tych obliczeń ?

## 7. Pytania kontrolne

1. Dlaczego jest możliwy przepływ prądu przez ciało człowieka ?
2. Jakie skutki wywołuje prąd przepływający przez ciało człowieka ?
3. Które parametry prądu decydują przede wszystkim o skutkach porażenia elektrycznego ?
4. Jakie są podstawowe możliwości ochrony człowieka przed porażeniem elektrycznym ?
5. Jakie są możliwe bezpośrednie i pośrednie skutki porażenia prądem elektrycznym ?
6. Omów strefy czasowo-prądowe oddziaływania prądu przemiennego na organizm człowieka korzystając z rysunku 1.
7. Co to jest próg reakcji na prąd elektryczny ? Jaka jest jego wartość ?
8. Co to jest próg samowolnienia ? Jaka jest jego wartość ?
9. Co to jest prąd rażenia długotrwałego ? Jaka jest jego wartość ?
10. Jakie wartości prądu przemiennego stwarzają niebezpieczeństwo śmiertelnego porażenia człowieka ? W jakim czasie przepływ prądu może spowodować śmierć kliniczną człowieka i w jakim czasie można go jeszcze skutecznie uratować podejmując akcję reanimacyjną?
11. Omów schemat zastępczy impedancji ciała człowieka i jej zależność od napięcia i warunków środowiskowych.
12. Jakimi wyróżniamy klasy warunków środowiskowych i jakie są dla nich obowiązujące wartości napięć bezpiecznych ?
13. Jakie są stosowane środki ochrony przeciwporażeniowej podstawowej i dodatkowej ?
14. Jakie znaczenie dla ochrony przeciwporażeniowej ma impedancja pętli zwarcia?
15. Jakie metody są stosowane do pomiaru impedancji pętli zwarcia ?
16. Omów metodę techniczną pomiaru impedancji pętli zwarcia.
17. W jaki sposób kąt fazowy impedancji pętli zwarcia wpływa na błędy jej pomiaru ?
18. Jakie błędy pomiaru impedancji pętli zwarcia są dopuszczalne przez Normę ?
19. Jakie metody pomiaru wykorzystują fabryczne mierniki impedancji pętli zwarcia ?
20. W jaki sposób można doświadczalnie wyznaczyć błędy pomiaru fabrycznych mierników impedancji pętli zwarcia ?
21. Wyjaśnij budowę dławika stosowanego w ćwiczeniu, omów sposób regulacji jego indukcyjności oraz zasady bezpiecznego stosowania w układach pomiarowych.
22. Jakie problemy stwarza zastosowanie grzejnika elektrycznego jako obciążenia rezystancyjnego w metodzie technicznej pomiaru impedancji pętli zwarcia ?
23. Wyjaśnij terminy angielskojęzyczne: *current perception threshold*, *threshold of reaction*, *threshold of let-go*, *let-go current*, *dry conditions*, *water-wet conditions*, *saltwater-wet conditions*.
24. Jaki jest cel wykonywania pomiarów impedancji pętli zwarcia ?
25. Dlaczego pomiar impedancji pętli zwarcia niesie ze sobą niebezpieczeństwo porażenia i jak go uniknąć ?
26. W jaki sposób i dlaczego przed pomiarami impedancji pętli zwarcia należy przeprowadzić kontrolę ciągłości pętli zwarcia ?
27. Jaką trudność podczas pomiaru impedancji pętli zwarcia sprawiają wyłączniki różnicowoprądowe RCD ? Jak można wykonać pomiary w sieci z wyłącznikami RCD ?

## 8. Literatura

- [1] Gierlotka S.: Badania impedancji ciała człowieka, Elektro.info, nr 3/2012.
- [2] Jellinek S.: Der Elektrische Unfall. Skizziert für Ingenieur und Arzt. Leipzig 1925.
- [3] Freiberger H.: Der elektrische Widerstand des menschlichen Körpers gegen technischen Gleich- und Wechselstrom. Verlag Julius Springer, Berlin 1934.
- [4] Dalziel, C.F.: Dangerous electric currents. AIEE transactions, 1946 (Vol.65), p. 579.
- [5] Technical Specification IEC TS 60479-1: Effects of current on human beings and livestock. Part 1: General aspects. Fourth edition 2005-07.
- [6] Raport techniczny IEC nr 479-1: Skutki działania prądu na ludzi i zwierzęta domowe. Część 1: Aspekty ogólne. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 1999.
- [7] Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. - Prawo budowlane. Dz.U. 1994 nr 89 poz. 414, z późniejszymi zmianami.
- [8] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. Dz.U. 2002 nr 75 poz. 690, z późniejszymi zmianami.
- [9] PN-EN 61140: 2005 Ochrona przed porażeniem prądem elektrycznym - Wspólne aspekty instalacji i urządzeń
- [10] PN-HD 60364-4-41:2009 Instalacje elektryczne niskiego napięcia - Część 4-41: Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa - Ochrona przed porażeniem elektrycznym
- [11] PN-HD 60364-6:2008 Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 6: Sprawdzanie
- [12] PN-EN 61557-3:2007E Bezpieczeństwo elektryczne w niskonapięciowych sieciach elektroenergetycznych o napięciach przemiennych do 1000 V i stałych do 1500 V - Urządzenia przeznaczone do sprawdzania, pomiarów lub monitorowania środków ochronnych - Część 3: Impedancja pętli zwarcia.
- [13] Zarządzenia Nr 13 Prezesa Głównego Urzędu Miar z dnia 30 marca 1999 r. w sprawie wprowadzenia instrukcji sprawdzania mierników oporu pętli zwarcia. Dziennik Urzędowy Miar i Probiernictwa, nr 3/1999, Warszawa 1999, str. 52.
- [14] Golijanek-Jędrzejczak A.: Przegląd sposobów pomiaru impedancji zwarcia. Pomiary Automatyka Kontrola, nr 12/2011 (Vol. 57), str.1586-1588.