PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY

OPEN ACCESS

Piotr PAZIEWSKI[1], Marek SUPRONIUK[2], Bogdan PERKA[3], Karol PIWOWARSKI[4]
ORCID: [1]0000-0002-6566-4620, [2]0000-0003-3723-6116, [3]0000-0003-4762-4833, [4]0000-0001-5922-2706
DOI: XXXXXXXXXX

Opracowanie programu badań w ramach laboratorium z przedmiotu Pomiary w Elektroenergetyce

Development of a research program as part of the laboratory course in the subject of Power System Measurements

[1] mgr inż. Piotr Paziewski, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Systemów Elektronicznych, e-mail: piotr.paziewski@wat.edu.pl
[2] dr hab. inż. Marek Suproniuk, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Systemów Elektronicznych, e-mail: marek.suproniuk@wat.edu.pl
[3] dr inż. Bogdan Perka, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Systemów Elektronicznych, e-mail: bogdan.perka@wat.edu.pl
[4] mgr inż. Karol Piwowarski, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Systemów Elektronicznych, e-mail: karol.piwowarski@wat.edu.pl

Adres do korespondencji: piotr.paziewski@wat.edu.pl

Streszczenie: Artykuł omawia znaczenie i zakres pomiarów wykonywanych w systemach elektroenergetycznych. Autorzy podkreślają, że precyzyjne pomiary są kluczowe dla zapewnienia bezpieczeństwa, efektywności energetycznej oraz niezawodności działania instalacji. W artykule omówiono podstawowe typy badań prowadzonych w laboratorium, w tym pomiar impedancji pętli zwarcia (IPZ), ocenę skuteczności ochrony przeciwporażeniowej, badania uziemień oraz pomiary rezystywności gruntu. Szczególną uwagę poświęcono także analizie jakości energii elektrycznej, która ma istotne znaczenie dla funkcjonowania urządzeń oraz stabilności sieci.

Słowa kluczowe: pomiary elektroenergetyczne, impedancja pętli zwarcia, jakość energii elektrycznej, rezystancja uziomu

Abstract: The article discusses the importance and scope of measurements performed in power systems. The authors emphasize that precise measurements are crucial for ensuring safety, energy efficiency, and the reliable operation of installations. The article covers the basic types of tests conducted in the laboratory, including loop impedance measurement, assessment of the effectiveness of electric shock protection, grounding tests, and soil resistivity measurements. Special attention is also given to the analysis of power quality, which plays a significant role in the performance of devices and the stability of the grid.

Keywords: power system measurements, loop impedance, power quality, ground resistance

Wstęp

W elektroenergetyce pomiary odpowiadają na pytanie o możliwość bezpiecznego, efektywnego i niezawodnego użytkowania systemów elektroenergetycznych, budynków mieszkalnych, przemysłowych oraz użyteczności publicznej. Ich znaczenie jest szczególnie istotne w kontekście zapewnienia ciągłości dostaw energii elektrycznej, jakości energii oraz ochrony zdrowia i życia użytkowników urządzeń elektrycznych. W obliczu dynamicznego rozwoju technologii oraz wzrastającej złożoności sieci elektroenergetycznych, precyzyjne i rzetelne pomiary stają się nieodzownym narzędziem w diagnozowaniu i optymalizacji działania instalacji elektrycznych [1], [2].

Pomiary instalacji elektrycznych mają na celu zweryfikowanie możliwości bezpiecznego korzystania z instalacji elektrycznej czy urządzenia elektrycznego. Odpowiednio zaprojektowana, wykonana i utrzymywana instalacja powinna gwarantować niezakłócone dostarczanie energii elektrycznej oraz eliminować ryzyko porażenia, pożaru, przepięć czy zakłóceń w pracy urządzeń. Skuteczność ochrony przeciwporażeniowej warunkuje bezpieczeństwo użytkowników w przypadku awarii instalacji lub uszkodzeń izolacji. Błędy w projektowaniu lub eksploatacji systemów ochronnych mogą prowadzić do porażenia prądem elektrycznym, dlatego weryfikacja ich skuteczności w warunkach laboratoryjnych ma ogromne znaczenie dydaktyczne i praktyczne [3].

Obowiązek przeprowadzania okresowych kontroli instalacji elektrycznych w Polsce wynika z art. 62 ust. 1 pkt 2 ustawy Prawo budowlane (Dz.U. 1994 nr 89 poz. 414 z późn. zm.), który nakłada na właścicieli i zarządców obiektów budowlanych obowiązek co najmniej raz na 5 lat dokonywania kontroli stanu technicznego instalacji elektrycznej i piorunochronnej. W przypadku niektórych obiektów narażonych na szczególne warunki eksploatacji przeglądy instalacji wymagane są corocznie np. budynki o podwyższonym ryzyku pożarowym, magazyny z materiałami wybuchowymi, obiekty narażone na pył, wilgoć lub skrajne temperatury. Przeglądy te muszą obejmować pomiary sprawności połączeń, ciągłości przewodów ochronnych, skuteczności ochrony przeciwporażeniowej oraz badania stanu izolacji przewodów. Pomiary te powinny być przeprowadzane zgodnie z wymaganiami norm: PN-HD 60364-6:2016-07 („Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 6: Sprawdzanie"), PN-EN 61557 („Sprzęt do badania, pomiarów lub monitorowania środków ochrony stosowanych w instalacjach elektrycznych niskiego napięcia") oraz dokumentami technicznymi branżowymi SEP [10]. Jednym z często pomijanych, lecz istotnych powodów prowadzenia okresowych pomiarów, są wymagania firm ubezpieczeniowych. W przypadku szkód spowodowanych wadliwą instalacją elektryczną (np. pożaru, porażenia lub awarii sprzętu), towarzystwa ubezpieczeniowe wymagają udokumentowanego przeglądu technicznego oraz aktualnego protokołu z badań. Brak takich dokumentów może skutkować odmową wypłaty odszkodowania lub znacznym jego ograniczeniem. Z punktu widzenia zarządcy budynku, wykonanie pomiarów to również forma udokumentowania tzw. należytej staranności, co może mieć kluczowe znaczenie w postępowaniu sądowym lub podczas dochodzenia roszczeń regresowych. Jak zauważa Wiater [1], dokumentacja z pomiarów pełni rolę technicznego świadectwa potwierdzającego stan instalacji w danym momencie.

Dzięki regularnym pomiarom możliwe jest również wykrycie przeciążeń, asymetrii napięć, spadków napięcia czy nieprawidłowości w pracy urządzeń odbiorczych. Ich identyfikacja pozwala nie tylko zapobiegać awariom, ale również wpływa na poprawę efektywności energetycznej i minimalizację strat technicznych w instalacji. Dla zakładów przemysłowych oznacza to redukcję kosztów oraz zwiększenie niezawodności dostaw energii, co ma kluczowe znaczenie z punktu widzenia produkcji i jakości usług [2].

Wykonywanie pomiarów instalacji elektrycznych to zadanie wymagające nie tylko znajomości przepisów i norm technicznych, ale także odpowiednich kwalifikacji zawodowych i uprawnień. Błędy popełnione podczas pomiarów mogą skutkować niewłaściwą oceną stanu instalacji, co z kolei prowadzi do zagrożeń dla zdrowia i życia ludzi, a także może pociągać za sobą konsekwencje prawne i finansowe dla właścicieli obiektów oraz samych wykonawców. Zgodnie z obowiązującymi przepisami w Polsce, pomiary instalacji elektrycznych mogą wykonywać wyłącznie osoby posiadające aktualne świadectwa kwalifikacyjne w zakresie eksploatacji urządzeń, instalacji i sieci elektroenergetycznych. Natomiast do podpisania protokołu z przeprowadzonych pomiarów wymagane są kwalifikacje w zakresie dozoru. Dokumentem potwierdzającym te kwalifikacje jest świadectwo kwalifikacyjne, wydawane na podstawie Rozporządzenia Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 1 lipca 2022 r. w sprawie szczegółowych zasad stwierdzania posiadania kwalifikacji przez osoby zajmujące się eksploatacją urządzeń, instalacji i sieci (Dz.U. 2022 poz. 1392) [4].

Oprócz wymogów formalnych, osoba wykonująca pomiary powinna posiadać także praktyczne umiejętności w zakresie:

- obsługi przyrządów pomiarowych (mierniki rezystancji izolacji, cęgowe mierniki prądu upływu, analizatory sieci, mierniki impedancji pętli zwarcia itd.),
- znajomości norm i przepisów dotyczących ochrony przeciwporażeniowej oraz badania instalacji (np. PN-HD 60364, PN-EN 61557),
- interpretacji wyników pomiarów oraz sporządzania protokołów zgodnych z obowiązującymi wymaganiami,
- identyfikowania nieprawidłowości w instalacji i formułowania zaleceń technicznych [5].

Wykonawcy pomiarów ponoszą pełną odpowiedzialność za rzetelność przeprowadzonych badań oraz poprawność sporządzonych protokołów. Niewłaściwe pomiary, brak aktualnych kwalifikacji lub błędne wnioski mogą skutkować odpowiedzialnością cywilną, a w przypadku szkód – także karną.

Aby przygotować przyszłą kadrę do poprawnego wykonywania pomiarów instalacji elektrycznych oraz przygotować do zdania egzaminu na kwalifikacje SEP w zakresie pomiarów opracowano dla studentów specjalności elektroenergetyka studiujących w Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego przedmiot Pomiary w Elektroenergetyce. Na ćwiczeniach laboratoryjnych realizowanych w ramach tego przedmiotu studenci zdobywają praktyczne umiejętności z zakresu przeprowadzania pomiarów oraz interpretacji wyników, co stanowi niezbędny element ich przyszłej pracy zawodowej. Ćwiczenia obejmują m.in. badanie skuteczności ochrony prze-

ciwporażeniowej, pomiary uziemienia i wyznaczanie rezystywności gruntu, a także analizę parametrów jakościowych energii elektrycznej za pomocą nowoczesnych analizatorów. Zajęcia laboratoryjne są również okazją do zapoznania się z aktualnymi normami i wymaganiami technicznymi, co wzmacnia kompetencje techniczne oraz świadomość odpowiedzialności zawodowej przyszłych inżynierów [6]. Wspomniany program badań laboratoryjnych nie tylko odzwierciedla aktualne potrzeby branży elektroenergetycznej, ale również wpisuje się w szerokie działania edukacyjne mające na celu podnoszenie jakości kształcenia i przygotowania inżynierów do wyzwań współczesnej elektroenergetyki.

Zdaniem autorów artykułu, opisy stanowisk dydaktycznych stanowią istotny element w obszarze tematyki elektrotechnicznej (oraz w kontekście czasopisma). Ze względu na charakter publikacji, artykuł nie będzie miał wysokiego poziomu naukowego, lecz raczej poznawczy. Jego celem jest umożliwienie nauczycielom zapoznania się z treścią, tak aby mogli ewentualnie wykorzystać ją w swoich zajęciach.

Obliczanie układów uziemień

Stosowane we współczesnych budynkach oraz budowlach układy uziemiające spełniają najczęściej następujące funkcje: ochronną, funkcjonalną lub odgromową. Stosowane są łączenia poszczególnych funkcji np. ochronno – funkcjonalna. Układ taki jest badany w opisywanym programie ćwiczeń laboratoryjnych. Badany układ zarówno w części nadziemnej jak i podziemnej wykonany jest z ocynkowanej taśmy stalowej FeZn 20x3 mm. W części podziemnej ułożona taśma stalowa FeZn 30x4 mm, zagłębiona jest w gruncie na głębokości około 1 metra. Taśma ta jest zabudowana dookoła budynku, dla którego jest przeznaczony badany układ uziemieniowy. Połączenie pomiędzy częścią nadziemną i podziemną wykonane jest poprzez złącze stalowe odgromowe. Złącza wykorzystywane są jako punkty kontrolno – pomiarowe (rysunek 1).

Rys. 1. Widok ściany budynku ze złączami kontrolno–pomiarowymi układu uziemiającego

Otokowy układ uziemieniowy badany w ramach ćwiczenia laboratoryjnego jest wykonany z taśmy FeZn w kształcie prostokąta o wymiarach 15 x 21 metrów (rysunek 2). Część nadziemna układu zawiera cztery zwody pionowe wykonane również z taśmy FeZn.

Przy znajomości rezystywności gruntu, w którym uziom jest zabudowany można wyznaczyć w sposób analityczny rezystancję uziemienia R_E. Zależności analityczne umożliwiające obliczenie rezystancji uziemienia różnią się w zależności od źródła literaturowego i określenie, który wzór jest najdokładniejszy jest trudne. Z doświadczenia autorów wynika, że różnice w postaci wzorów analitycznych mogą wynikać z różnych założeń upraszczających stosowanych przez autorów tych wzorów dotyczących na przykład proporcji wymiarów i kształtów konstrukcji uziomów.

Do obliczeń analitycznych rezystancji uziemienia R_E przyjęto następujący wzór stosowany w normie PN-EN 50522, a zaczerpnięty z pozycji literaturowej [7]

(1) $$R_E = \frac{\rho_E}{\pi^2 D} \ln \frac{2\pi D}{d}$$

przy czym $D = \frac{L}{\pi}$

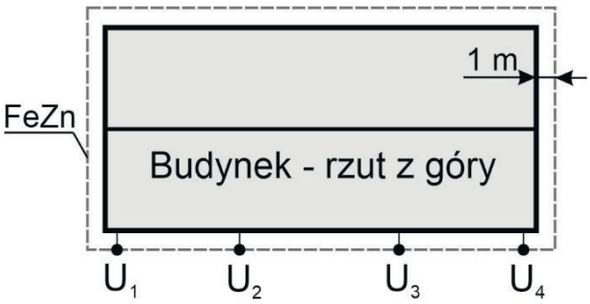
gdzie:

ρ_E – zmierzona lub przyjęta rezystywność gruntu [Ω·m],

L – długość elementu poziomego [m],

D – połowa szerokości taśmy FeZn.

Zależność (1) jest obarczona wadą polegającą na braku uwzględnienia głębokości zabudowania uziomu a wiadomo, że parametr ten ma wpływ na wartość R_E.



Rys. 2. Szic badanego układu uziemiającego budynku

W nieobowiązującej już normie PN-86/E-05003/01 do przybliżonych obliczeń rezystancji uziemienia uziomu otokowego stosowano następujący wzór [8]:

(2) $$R_E = \frac{0{,}6\rho_E}{\sqrt{A}}$$

gdzie:

A – powierzchnia objęta obrysem uziomu otokowego [m^2]

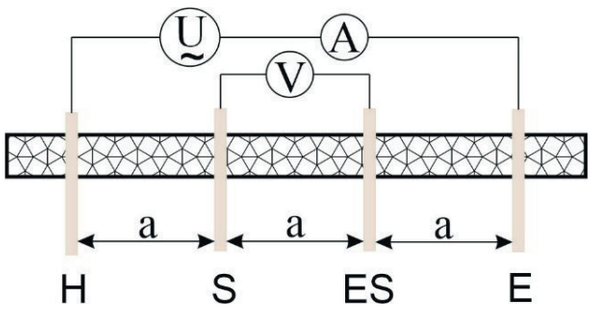
Zależność (2) jest dużym uproszczeniem.

Wzór ten opiera wynik obliczeń na wymiarach pętli utworzonej przez uziom oraz rezystywności

gruntu. Porównanie wyników dla uziemienia o podobnych rozmiarach i wykonanego z takiej samej taśmy FeZn, pokazuje dość dużą różnicę pomiędzy zastosowanymi wzorami. Przy rezystywności gruntu ρ_E = 100 Ωm oraz uziomu otokowego o wymiarach prostokąta 15 x 21 metrów, wynik otrzymany z zależności (1) wynosi R_E = 4,25 Ω, a z zależności (2) R_E = 1,69 Ω. Wyniki różnią się więc prawie trzykrotnie. Zwiększając dziesięciokrotnie wymiary prostokątnej powierzchni gruntu objętej otokiem uziemienia różnica wyników zmniejsza się do dwukrotności. Sprawia to, że decydując się na wybór zależności stosowanej do obliczeń rezystancji uziemienia należy brać pod uwagę ich przybliżony i uproszczony w założeniach charakter. Niezależnie od wyboru zależności analitycznej, każdorazowo obliczenia powinny być poprzedzone pomiarem rezystywności gruntu.

Pomiary rezystywności gruntu

Układ uziemieniowy poddany badaniu w części podziemnej ułożony był na głębokości około 1 metra. Na podstawie obserwacji z odkrywki wykonanej do głębokości około 40 cm, grunt można zaklasyfikować jako glebę bielicową wytworzoną z piasków gliniastych. Średnią rezystywność takiego gruntu można przyjąć na poziomie 200 Ωm [8]. Do pomiaru rezystywności wykorzystywany był miernik MPI-530 (prod. SONEL). Zastosowany miernik do pomiaru rezystywności gruntu wykorzystuje metodę Wennera [9]. Pomiar tą metodą polega na odpowiednim rozmieszczeniu czterech zewnętrznych sond pomiarowych jak przedstawia to rysunek 3.



Rys. 3. Rozmieszczenie sond pomiarowych miernika MPI-530 w metodzie Wennera

Źródło napięcia podłączone do dwóch skrajnych elektrod H i E, które wymusza przepływ prądu w ziemi. Na podstawie wartości natężenia przepływającego prądu pomiarowego i zmierzonej różnicy potencjałów (napięcia) między środkowymi sondami S i ES obliczana jest wartość rezystancji R, która po uwzględnieniu odstępu między sondami *a* pozwala na obliczenie rezystywności ρ_E. Wynik pomiaru wyświetlany przez miernik obliczany jest na podstawie zależności:

$$\rho_E = 2\pi \cdot a \cdot R \tag{3}$$

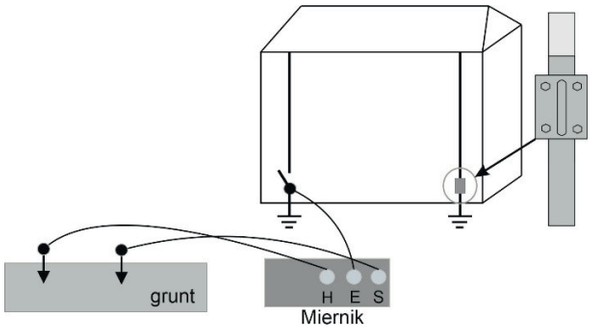
gdzie:
a – odległość pomiędzy sondami wbitymi w jednej linii w ziemię [m]

Pomiar rezystywności określa wypadkową wartość „do głębokości" w gruncie zależnej od odstępów między sondami. Najczęściej podaje się, że głębokość do jakiej wykonywany jest pomiar to h = 0,7*a*. Obydwie głębokości można uznać za poprawne [7].

Pomiar rezystancji uziemienia

Do pomiaru rezystancji uziemienia badanego układu uziomowego wykorzystano dwie metody pomiarowe: 3P, 4P. Pomiary wykonywane są pięciokrotnie, a do wyniku końcowego przyjmowana jest średnia arytmetyczna z uzyskanych wyników.

W metodzie technicznej 3P mierzony jest spadek potencjału pomiędzy badanym uziomem (E), a sondami pomocniczymi (rysunek 4): napięciową (S) do pomiaru potencjału i prądową (H), która wymusza przepływ prądu. Sondy pomocnicze rozmieszcza się w linii prostej od badanego uziomu.

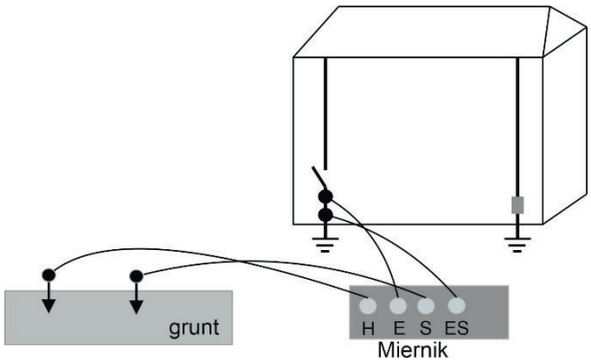


Rys. 4. Rozmieszczenie sond pomiarowych w metodzie 3P

Ogólnie zaleca się, aby odległość d była co najmniej 5-krotnie większa od długości uziomu poziomego. Sonda napięciowa powinna być umieszczona w odległości około 0,6*d*. Aby mieć pewność, że uzyskany wynik jest prawidłowy należy powtórzyć pomiar przesuwając sondę S o kilka metrów w stronę uziomu oraz w stronę sondy prądowej. Jeżeli wyniki nie różnią się więcej niż 3% to pomiar uznaje się za poprawny, natomiast jeżeli różnica w wynikach jest większa to należy zwiększyć odległość sondy prądowej.

Metoda 4P jest rozszerzeniem metody trzybiegunowej (3P). Do pomiaru rezystancji uziemienia dodatkowo wykorzystuje się przewód (ES), który pozwala

na kompensację wpływu rezystancji przewodów pomiarowych (rysunek 5).



Rys. 5. Rozmieszczenie elektrod w metodzie 4P

Dla zapewnienia odpowiedniego kontaktu z gruntem konieczne może być stosowanie większych sond niż dostarczone z miernikiem.

Pomiar impedancji pętli zwarcia

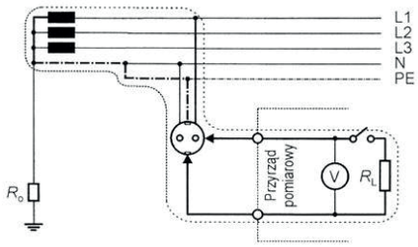
Zgodnie z obowiązującymi przepisami, każda instalacja elektryczna musi być wyposażona w skuteczne zabezpieczenia chroniące przed porażeniem prądem elektrycznym. Składa się na to ochrona podstawowa, czyli zabezpieczenie przed dotykiem bezpośrednim – odpowiednia izolacja części przewodzących prąd. Ochrona uzupełniającą, czyli zabezpieczenie nadmiarowoprądowe i różnicowoprądowe (które dodatkowo uzupełnienia ochronę przed powstaniem pożaru)

Pomiar impedancji pętli zwarcia przeprowadzany jest w celu zweryfikowania czy zastosowane zabezpieczenie nadmiarowoprądowe obwodu zadziała w odpowiednim czasie w przypadku zwarcia.

Mechanizm ten polega na samoczynnym odłączeniu zasilania w przypadku pojawienia się niebezpiecznego napięcia dotykowego na dostępnych, przewodzących częściach urządzeń elektrycznych. Części te są połączone z przewodem ochronnym instalacji. Gdy dojdzie do zwarcia między przewodem fazowym a obudową urządzenia, przez obwód faza–przewód ochronny zaczyna płynąć prąd zwarciowy. Jego przepływ powoduje zadziałanie wyłącznika nadmiarowoprądowego, który odcina zasilanie.

Aby upewnić się, że zabezpieczenia nadprądowe zadziałają w odpowiednim czasie, zgodnie z wymaganiami norm, wykonuje się pomiar impedancji pętli zwarcia. Pozwala on ocenić, czy w razie awarii użytkownicy oraz wrażliwe elementy instalacji nie będą narażeni na długotrwałe działanie niebezpiecznego napięcia dotykowego.

Metoda techniczna pomiaru opiera się na wykonaniu tzw. „sztucznego zwarcia” – miernik rejestruje napięcie bez obciążenia oraz podczas krótkotrwałego obciążenia rezystorem lub impedancją zwarciową. Na tej podstawie obliczana jest impedancja pętli zwarcia (rysunek 6) [9].



Rys. 6. Schemat przedstawiający działanie miernika impedancji pętli zwarcia [9]

W tabeli 2 zestawiono maksymalne czasy wyłączenia określone normą PN-HD 60364-4-41:2017-09 i odnoszące się do obwodów odbiorczych:

- gniazd wtyczkowych o prądzie znamionowym nieprzekraczającym 63A,
- z odbiornikami zainstalowanymi na stałe o prądzie znamionowym ≤ 32A (w zależności od układu sieci – TN lub TT)

Tabela 1. Największy dopuszczalny czas samoczynnego wyłączania zasilania [s] w obwodach AC o prądzie znamionowym ≤ 32A [11]

	$50V<U_0\leq120V$	$120V<U_0\leq230V$	$230V<U_0\leq400V$	$U_0>400V$
TN	0,8 s	0,4 s	0,2 s	0,1 s
TT	0,3 s	0,2 s	0,07 s	0,04 s

W przypadku układu TT, jeśli wyłączenie realizowane jest przez zabezpieczenie nadprądowe, a połączenia wyrównawcze są prawidłowo wykonane, dopuszcza się stosowanie czasów jak dla układu TN [11]

W ramach ćwiczeń laboratoryjnych prowadzonych w jednym z laboratoriów wykonywane są pomiary w sieci TN-S, obejmujące obwody gniazd jednofazowych i trójfazowych. Celem tych pomiarów jest ocena skuteczności ochrony przed porażeniem prądem elektrycznym poprzez samoczynne wyłączenie zasilania.

Aby prawidłowo przeprowadzić pomiar impedancji pętli zwarcia, należy wykonać trzy kluczowe etapy:

1. Wyznaczenie prądu wyłączającego I_A

Prąd wyłączający I_A należy określić, uwzględniając:

- typ układu sieci (TN, TT, IT),
- prąd znamionowy zabezpieczenia I_N,
- dopuszczalny czas wyłączenia zgodny z normą (np. tabela 1),
- napięcie znamionowe względem ziemi U_0.

Do wyznaczenia I_A wykorzystuje się charakterystyki czasowo-prądowe odpowiedniego zabezpiecze-

nia – wyłącznika nadprądowego typu B, C lub D, bądź wkładki topikowej.

(4) $$I_A = I_N \cdot k$$

gdzie k to współczynnik zależny od charakterystyki zabezpieczenia.

2. Obliczenie dopuszczalnej impedancji pętli zwarcia Z_S

Na podstawie wyznaczonego prądu I_A oblicza się maksymalną wartość impedancji pętli zwarcia Z_S, przy której możliwe jest skuteczne zadziałanie zabezpieczenia:

Dla układu TN:

(5) $$Z_S \leq \frac{U_0}{I_A}$$

Dla układu TT:

(6) $$Z_S \cdot I_A \leq U_0$$

Dla układu IT:

(7) $$2 \cdot I_A \cdot Z_S \leq U$$

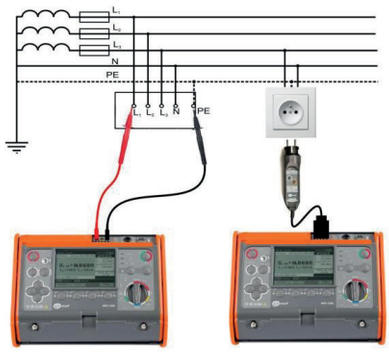
gdzie:
Z_S – impedancja pętli zwarcia,
I_A – prąd wyłączający,
U_0 – napięcie znamionowe względem ziemi,
U – napięcie międzyfazowe (dla układu IT).

3. Wykonanie pomiaru impedancji pętli zwarcia

Pomiar przeprowadza się za pomocą miernika impedancji pętli zwarcia (rysunek 7). Otrzymana wartość Z_S nie może przekraczać wartości obliczonej w poprzednim kroku. Spełnienie tego warunku oznacza, że w przypadku zwarcia popłynie wystarczająco duży prąd zwarciowy, który spowoduje zadziałanie zabezpieczenia w wymaganym czasie, zapewniając skuteczną ochronę przeciwporażeniową [9].

Pomiary jakości energii elektrycznej

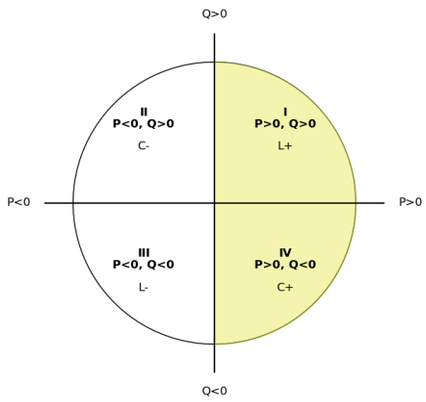
Jakość energii elektrycznej to zestaw parametrów napięcia, prądu i częstotliwości, które opisują warunki zasilania w systemie elektroenergetycznym. Wysoka jakość energii jest ważna dla prawidłowego działania urządzeń elektrycznych i elektronicznych. Jej pogorszenie może powodować straty finansowe, awarie sprzętu i zakłócenia w procesach technologicznych. Pomiar jakości energii pozwala wykrywać i analizować zjawiska zakłócające. Zgodnie z normą PN-EN 50160, podstawowe parametry jakości energii to: częstotliwość napięcia zasilającego, wartość skuteczna napięcia, zapady i przerwy napięcia, przepięcia, harmoniczne, migotanie światła oraz asymetria napięć. Do pomiaru jakości energii używa się specjalnych analizatorów. Rejestrują one parametry napięcia i prądu w czasie rzeczywistym. Dane są analizowane za pomocą specjalistycznego oprogramowania, które identyfikuje i pokazuje trendy, wykrywa anomalie i tworzy raporty. Dokładność pomiarów zależy od klasy urządzenia, częstotliwości próbkowania i warunków środowiskowych [12], [14].



Rys. 7. Sposób przyłączenia miernika do badanej sieci w układzie TN [16]

W laboratorium wykorzystywany jest analizator Sonel PQM-707. To przenośne urządzenie klasy S, zgodne z normą IEC 61000-4-30. Służy do pomiarów w sieciach niskiego napięcia (do 760 V). Umożliwia analizę napięć i prądów w każdej fazie, mocy czynnej, biernej (indukcyjnej i pojemnościowej), pozornej, mocy odkształceń, współczynników mocy (cosφ, tgφ, PF), częstotliwości, harmonicznych do 50 rzędu, współczynników THD, zapadów, przepięć, przerw i innych zakłóceń [17].

Analizator PQM-707 mierzy energię w czterech kwadrantach. Rejestruje energię czynną i bierną (indukcyjną i pojemnościową) w kierunku poboru i od-



Rys. 7. Diagram liczydła czterokwadrantowego

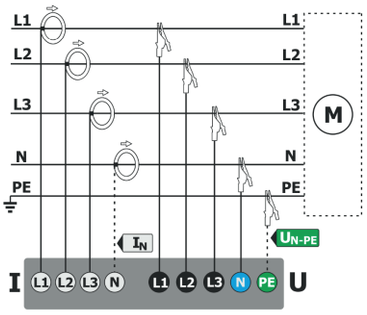
dawania. Na rysunku 8 pokazano diagram działania liczydła czterokwadrantowego. W pierwszym kwadrancie następuje pobór mocy czynnej i biernej indukcyjnej – typowe dla obciążeń silnikowych. W drugim kwadrancie występuje generacja mocy czynnej i oddawanie mocy biernej indukcyjnej – np. w generatorze z niedowzbudzeniem. W trzecim kwadrancie mamy generację mocy czynnej i oddawanie mocy biernej pojemnościowej – np. w generatorze z przewzbudzeniem. W czwartym kwadrancie następuje pobór mocy czynnej i biernej pojemnościowej – np. w odbiorniku z kompensacją mocy biernej [15].

Ważnym aspektem jakości energii jest analiza odkształceń prądu spowodowanych obecnością harmonicznych. PQM-707 umożliwia pomiar harmonicznych prądu i napięcia do 50 rzędu, obliczanie współczynnika THD, analizę widma harmonicznych w czasie rzeczywistym oraz rejestrację zmian poziomu harmonicznych.

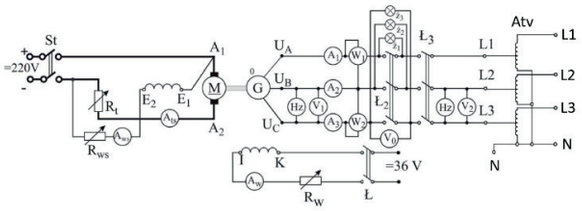
Harmoniczne mogą powodować przegrzewanie transformatorów, zakłócenia w pracy urządzeń elektronicznych i zwiększone straty mocy. W ramach zajęć laboratoryjnych studenci wykonują pomiary i analizy związane z jakością energii. Skupiają się na odkształceniach harmonicznych i przepływie mocy w układach elektroenergetycznych. Na rysunku 8 przedstawiono sposób podłączenia analizatora Sonel PQM-707 do badanego odbiornika.

Ćwiczenia odbywają się na dwóch stanowiskach dydaktycznych. Pierwsze pozwala analizować skuteczność filtrów pasywnych i aktywnych w ograniczaniu harmonicznych generowanych przez odbiorniki nieliniowe. Studenci wykonują pomiary przed i za filtrem, analizując widmo harmonicznych i współczynnik THD. Filtry pasywne, np. LC, tłumią wybrane harmoniczne. Filtry aktywne dynamicznie kompensują zakłócenia. Analiza FFT pozwala zidentyfikować dominujące harmoniczne i ocenić skuteczność filtracji [13].

Drugie stanowisko (rysunek 9) wykorzystujące maszynę synchroniczną, umożliwia obserwację przepływu mocy czynnej i biernej w różnych trybach pracy. W trybie generacyjnym maszyna oddaje moc czynną do sieci. W trybie silnikowym pobiera moc czynną. Regulacja wzbudzenia pozwala sterować charakterem mocy biernej – indukcyjnej lub pojemnościowej.



Rys. 8. Sposób podłączenia analizatora jakości energii elektrycznej PQM-707 w układzie trójfazowym 4-przewodowym [17]



Rys. 9. Schemat układu do synchronizacji i badania prądnicy współpracującej z siecią sztywną przez autotransformator

Dzięki temu można obserwować przepływ mocy we wszystkich czterech kwadrantach. Jest to ważne w nowoczesnych systemach elektroenergetycznych z udziałem źródeł odnawialnych i magazynów energii. Liczydło czterokwadrantowe umożliwia dokładne rozliczanie energii w obu kierunkach – czynnej i biernej.

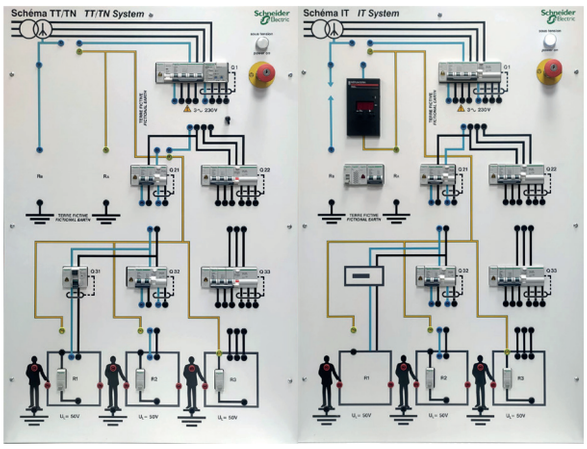
Ćwiczenia pomagają studentom zrozumieć zjawiska związane z jakością energii. Uczą, jak odbiorniki nieliniowe wpływają na odkształcenia prądu, jak działają różne metody filtracji harmonicznych oraz jak interpretować dane z analizatorów mocy i liczydeł czterokwadrantowych.

Badanie skuteczności ochrony przeciwporażeniowej

Użytkowanie urządzeń elektrycznych wiąże się z potencjalnym ryzykiem porażenia prądem elektrycznym. Do najczęstszych przyczyn takich wypadków należą uszkodzenia izolacji, niewłaściwa eksploatacja oraz awarie instalacji elektrycznej. Skutki porażenia mogą być bardzo poważne. W celu ograniczenia tego ryzyka stosuje się odpowiednie środki ochronne, których zadaniem jest zabezpieczenie użytkownika przed skutkami przepływu prądu elektrycznego. W instalacjach niskiego napięcia najczęściej wykorzystywane są wyłączniki nadprądowe oraz wyłączniki różnicowoprądowe. Ich podstawową funkcją jest natychmiastowe odłączenie zasilania w przypadku awarii [11].

W ramach laboratorium wykorzystywane jest stanowisko badawcze SLT TR2 firmy Schneider Electric, służące do symulacji oraz analizy skuteczności ochrony przeciwporażeniowej w instalacjach elektrycznych niskiego napięcia. Pozwala na odwzorowanie rzeczywistych warunków pracy układów TT, TN oraz IT, co umożliwia ocenę efektywności różnych metod ochrony przed porażeniem prądem

elektrycznym. Konstrukcja stanowiska opiera się na trójpoziomowym układzie selektywnie połączonych zabezpieczeń. Każdy z tych poziomów wyposażony jest w odpowiednie zabezpieczenia, takie jak wyłączniki nadprądowe, chroniące instalację przed przeciążeniami i zwarciami, oraz wyłączniki różnicowoprądowe, które wykrywają prądy upływowe i ograniczają ryzyko porażenia. Dodatkowo, zastosowanie diod LED pozwala na szybką identyfikację obecności napięcia. Stanowisko umożliwia przeprowadzanie symulacji różnych scenariuszy awaryjnych, takich jak brak uziemienia odbiornika podczas zwarcia, brak uziemienia przy kontakcie pośrednim, zwarcie w układzie niskiego napięcia oraz zwarcie przy kontakcie pośrednim. W każdym z tych przypadków wykonywane są pomiary napięcia fazowego, napięcia dotykowego, prądu upływu oraz prądu rażeniowego, przy czym ciało człowieka odwzorowano za pomocą rezystora o wartości 1000 Ω. Jest to statystycznie przyjmowana rezystancja ciała człowieka bez obuwia. Stanowisko zostało przedstawione na rysunku 10.



Rys. 10. Stanowisku do badania skuteczności ochrony przeciwporażeniowej dla sieci w układzie TT, TN oraz IT

Podsumowanie wnioski

Artykuł przedstawia kompleksowy program dydaktyczny realizowany w ramach laboratorium przedmiotu Pomiary w Elektroenergetyce, mający na celu przygotowanie studentów do wykonywania pomiarów w systemach elektroenergetycznych. Autorzy podkreślają, że precyzyjne pomiary są kluczowe dla zapewnienia bezpieczeństwa, efektywności energetycznej oraz niezawodności działania instalacji elektrycznych. W artykule omówiono różnorodne zagadnienia pomiarowe, takie jak pomiar impedancji pętli zwarcia, ocena skuteczności ochrony przeciwporażeniowej, badania uziemień, pomiary rezystywności gruntu oraz analiza jakości energii elektrycznej. Szczególną uwagę poświęcono praktycznym aspektom wykonywania pomiarów, zgodności z obowiązującymi normami oraz wykorzystaniu nowoczesnych urządzeń pomiarowych, takich jak analizator PQM-707 czy miernik MPI-530.

W ramach zajęć laboratoryjnych studenci uczą się obsługi przyrządów pomiarowych, interpretacji wyników oraz sporządzania dokumentacji technicznej. Program kładzie nacisk na rozwijanie kompetencji praktycznych i świadomości odpowiedzialności zawodowej przyszłych inżynierów. Przedstawiono również przykładowe stanowiska dydaktyczne. Autorzy zwracają uwagę na konieczność przestrzegania przepisów prawnych i norm technicznych, a także na znaczenie kwalifikacji zawodowych osób wykonujących pomiary.

Regularne i rzetelne pomiary są nieodzownym elementem bezpiecznej eksploatacji instalacji elektrycznych. Program laboratoriów skutecznie przygotowuje studentów do pracy zawodowej, ucząc ich zarówno teorii, jak i praktyki pomiarowej. Wykorzystanie nowoczesnych narzędzi pomiarowych oraz zgodność z aktualnymi normami technicznymi zapewniają wysoką jakość kształcenia.

Przyjęto: XXXXXX, **zaakceptowano:** XXXXXX, **opublikowano:** XXXXXX

LITERATURA

[1] J. Wiater, Pomiary w elektroenergetyce, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2019.
[2] A. Zientarski, Systemy pomiarowe w energetyce, WNT, Warszawa 2020.
[3] B. Mroczek, Ochrona przeciwporażeniowa w instalacjach elektrycznych, Wydawnictwo PWN, 2021.
[4] Dz.U. 2022 poz. 1392 – Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 1 lipca 2022 r.
[5] B. Mroczek, Pomiary ochronne w instalacjach elektrycznych, WNT, Warszawa 2020.
[6] M. Nowak, Laboratoria i dydaktyka w elektroenergetyce – dobre praktyki, Energetyka i Edukacja, nr 2/2023.
[7] Hoppel W., Marciniak R.: Uziemienia w sieciach elektroenergetycznych. Wydawnictwo WNT 2021 r.
[8] Praca zbiorowa, Poradnik montera elektryka. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1992.
[9] Materiały edukacyjne ze strony www.sonel.pl.
[10] PN-HD 60364-6:2016-07 – Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Sprawdzanie.
[11] PN-HD 60364-4-41:2017-09 – Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 4-41: Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa – Ochrona przed porażeniem elektrycznym.
[12] PN-EN 50160 – parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych,
[13] IEC 61000-4-7 – metody pomiaru harmonicznych i interharmonicznych,
[14] IEC 61000-4-30 – metody pomiaru parametrów jakości energii,
[15] IEC 62053-23 – wymagania dotyczące liczników energii biernej.
[16] Instrukcja obsługi SONEL MPI-530.
[17] Instrukcja obsługi SONEL PQM-707.