



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

Wydział Elektrotechniki
i Automatyki



Imię i nazwisko autora rozprawy: **Kornel Borowski**

Dyscyplina naukowa: **Elektrotechnika**

ROZPRAWA DOKTORSKA

Tytuł rozprawy w języku polskim: **Badanie wykonalności pomiaru impedancji pętli zwarciowej bez wyzwalania wyłączników różnicowoprądowych**

Tytuł rozprawy w języku angielskim: **Research of the feasibility of fault loop impedance measurement without residual current devices tripping**

Promotor	Drugi promotor
<i>podpis</i>	<i>podpis</i>
dr hab. inż. Stanisław Czapp, prof. nadzw. PG	
Promotor pomocniczy	Kopromotor
<i>podpis</i>	<i>podpis</i>

Gdańsk, rok 2018

Szczególne podziękowania składam mojej żonie Patrycji, za okazaną wyrozumiałość, cierpliwość, motywację i ogromne wsparcie w chwilach słabości, podczas pisania tej rozprawy doktorskiej.

Pragnę podziękować również mojemu promotorowi i jednocześnie mentorowi naukowemu Panu Profesorowi Stanisławowi Czappowi, za wszelką pomoc, cenne uwagi merytoryczne i skuteczną mobilizację do pracy naukowej.

Rozprawę dedykuję mojej córce Julii.



SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	5
STRESZCZENIE	7
1. WSTĘP.....	9
1.1. WPROWADZENIE	9
1.2. CEL PRACY	10
1.3. TEZY PRACY	11
1.4. ZAKRES PRACY	11
2. WYŁĄCZNIKI RÓŻNICOWOPRĄDOWE.....	13
2.1. RYS HISTORYCZNY	13
2.2. BUDOWA WYŁĄCZNIKÓW RÓŻNICOWOPRĄDOWYCH	13
2.3. PODZIAŁ I WŁAŚCIWOŚCI WYŁĄCZNIKÓW RÓŻNICOWOPRĄDOWYCH	18
2.4. PRZEKŁADNIK SUMUJĄCY WYŁĄCZNIKA RÓŻNICOWOPRĄDOWEGO	23
3. POMIARY IMPEDANCJI PĘTLI ZWARCIOWEJ	29
3.1. WPROWADZENIE	29
3.2. ZWARCIE W OBWODZIE	29
3.3. ELEMENTY SKŁADOWE OBWODU ZWARCIOWEGO.....	31
3.4. IMPEDANCJA A REZYSTANCJA PĘTLI ZWARCIOWEJ	33
3.5. SYMULACJE IMPEDANCJI PĘTLI ZWARCIOWEJ DLA RÓŻNYCH TYPÓW SIECI	38
3.6. SAMOCZYNNNE WYŁĄCZANIE ZASILANIA	44
3.7. METODA TECHNICZNA POMIARU IMPEDANCJI PĘTLI ZWARCIOWEJ	44
4. BADANIA ZACHOWANIA SIĘ WYŁĄCZNIKÓW RÓŻNICOWOPRĄDOWYCH PODCZAS POMIARU IMPEDANCJI PĘTLI ZWARCIOWEJ	47
4.1. WPROWADZENIE	47
4.2. BADANIA MIERNIKÓW IMPEDANCJI PĘTLI ZWARCIOWEJ.....	47
4.3. BADANIA REAKCJI WYŁĄCZNIKÓW RÓŻNICOWOPRĄDOWYCH NA PRĄD POMIAROWY	50
5. METODY POMIARU IMPEDANCJI PĘTLI ZWARCIOWEJ BEZ WYZWALANIA WYŁĄCZNIKÓW RÓŻNICOWOPRĄDOWYCH.....	52
5.1. WPROWADZENIE	52
5.2. BOCZNIKOWANIE.....	52
5.3. POMIAR MAŁYM PRĄDEM	54
5.4. PRĄD DOPEŁNIAJĄCY	56
5.5. METODA Z NASYCANIEM RDZENIA PRZEKŁADNIKA SUMUJĄCEGO WYŁĄCZNIKA RÓŻNICOWOPRĄDOWEGO	58
6. NOWA METODA POMIARU BEZ WYZWALANIA WYŁĄCZNIKÓW RÓŻNICOWOPRĄDOWYCH	60
6.1. ZAŁOŻENIA	60
6.2. PODSTAWY TEORETYCZNE METODY POMIARU	60
6.3. ZASADA DZIAŁANIA NOWEGO MIERNIKA REZYSTANCJI PĘTLI ZWARCIOWEJ	65
6.4. SYMULACJE.....	70
6.5. PRZYSTAWKA DO BADANIA WYŁĄCZNIKÓW RÓŻNICOWOPRĄDOWYCH	74
6.6. BUDOWA STANOWISKA LABORATORYJNEGO – MIERNIK REZYSTANCJI PĘTLI ZWARCIOWEJ	76
6.7. WYNIKI BADAŃ	82



7. PODSUMOWANIE	88
7.1. WNIOSKI KOŃCOWE Z BADAŃ	88
7.2. KIERUNEK DALSZYCH BADAŃ.....	89
8. LITERATURA	92
9. SPIS RYSUNKÓW	98
10. SPIS TABEL.....	101
11. ZAŁĄCZNIK 1 – KOD PROGRAMU MIKROKONTROLERA STERUJĄCEGO	102



WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

Symbol	Opis	Jednostka
I_p, I_M	– prąd pomiarowy miernika impedancji pętli zwarciowej	A
$I_{\Delta n}$	– znamionowy prąd różnicowy wyłącznika różnicowoprądowego	A
I_{Δ}	– prąd różnicowy	A
IPZ	– impedancja pętli zwarciowej	-
RPZ	– rezystancja pętli zwarciowej	-
RCD	– wyłącznik różnicowoprądowy (ang. residual current device)	-
I_k''	– prąd zwarciowej początkowy	A
c	– współczynnik napięciowy	-
U_n	– napięcie nominalne sieci	V
R_k	– rezystancja zastępcza obwodu zwarciowego	Ω
X_k	– reaktancja zastępcza obwodu zwarciowego	Ω
Z_k	– impedancja zastępcza obwodu zwarciowego	Ω
Z	– impedancja pętli zwarciowej	Ω
Z_0	– impedancja obciążenia pomiarowego	Ω
R	– rezystancja pętli zwarciowej	Ω
C_E	– pojemność doziemna linii	F
\underline{U}_1	– napięcie sieci (wielkość fazorowa) w miejscu pomiaru bez załączonego obciążenia pomiarowego	V
\underline{U}_2	– napięcie sieci (wielkość fazorowa) w miejscu pomiaru z załączonym obciążeniem pomiarowym	V
U_1	– moduł napięcia sieci w miejscu pomiaru bez załączonego obciążenia pomiarowego	V
U_2	– moduł napięcia sieci w miejscu pomiaru z załączonym obciążeniem pomiarowym	V
I_d	– prąd dopełniający miernika IPZ	A
$R_0, R_{_0}$	– rezystancja obciążenia układu pomiarowego	Ω
$C_0, C_{_0}$	– pojemność kondensatora układu pomiarowego	F
Z_{SEE}	– impedancja systemu elektroenergetycznego	Ω
X_{SEE}	– reaktancja systemu elektroenergetycznego	Ω
R_{SEE}	– rezystancja systemu elektroenergetycznego	Ω
S_{SEE}''	– moc zwarciowej systemu elektroenergetycznego	MVA
u_R	– składowa czynna napięcia zwarcia transformatora	-
ΔP_{obc_zn}	– znamionowe obciążeniowe straty mocy transformatora	W
S_{TR}	– moc znamionowa transformatora	MVA
u_X	– składowa bierna napięcia zwarcia transformatora	-
u_k	– napięcie zwarcia transformatora	-



X_{TR}	– reaktancja transformatora	Ω
R_{TR}	– rezystancja transformatora	Ω
Z_{TR}	– impedancja transformatora	Ω
R_L	– rezystancja przewodów (kabli)	Ω
X_L	– reaktancja przewodów (kabli)	Ω
x'	– reaktancja jednostkowa	Ω/km
L	– długość przewodnika	km
γ	– konduktywność przewodnika	$\text{m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$
S	– przekrój poprzeczny przewodnika	mm^2
δ	– błąd względny	-
$\delta\%$	– procentowy błąd względny	%
$I_{th,s}$	– maksymalny prąd termiczny stycznika	A
μ_4	– przenikalność względna początkowa przy natężeniu pola magnetycznego 4 mA/cm ferromagnetyka	-
μ_{15}	– przenikalność względna przy natężeniu pola magnetycznego 15 mA/cm ferromagnetyka	-
μ_{\max}	– przenikalność względna maksymalna ferromagnetyka	-
H_c	– natężenie koercji	mA/cm
B_s	– indukcja nasyceniowa ferromagnetyka	T
ΔH_{stat}	– zmiana natężenia pola magnetycznego przy wzbudzeniu prądem różnicowym pulsującym stałym	mA/cm
ΔB_{stat}	– zmiana indukcji magnetycznej przy wzbudzeniu prądem różnicowym pulsującym stałym	mT
B_r	– indukcja szczątkowa ferromagnetyka	-
R_a	– rezystancja uziemienia ochronnego odbiornika	Ω
R_b	– rezystancja uziemienia roboczego punktu neutralnego transformatora	Ω



STRESZCZENIE

Niniejsza rozprawa doktorska dotyczy rozwiązania problemu, jakim jest wyzwalenie wyłączników różnicowoprądowych podczas pomiaru impedancji (rezystancji) pętli zwarciowej w obwodach, które są przez te wyłączniki chronione. Pomiar impedancji pętli zwarciowej metodą tradycyjną wykorzystującą sztuczne zwarcie, szczegółowo opisaną w normie PN-HD 60364-6:2008, jest skuteczny jedynie w obwodach, które nie są chronione wyłącznikami różnicowoprądowymi. Zastosowanie tej metody najczęściej powoduje natychmiastowe wyzwolenie wyłącznika i brak możliwości dokończenia pomiaru. Istniejące metody pomiaru impedancji pętli zwarciowej bez wyzwiania wyłączników podczas pomiaru nie zawsze są skuteczne, charakteryzują się dużym błędem pomiaru, są niepraktyczne lub nawet mogą prowadzić do uszkodzenia rdzenia ferromagnetycznego wyłącznika.

Opisana w rozprawie doktorskiej nowa metoda pomiaru została opracowana i opatentowana przez autora jako innowacyjne rozwiązanie w dziedzinie pomiarów ochronnych instalacji elektrycznych niskiego napięcia. Dzięki zastosowaniu opracowanej w toku badań nowej charakterystyki prądu pomiarowego, możliwe jest wykonanie pomiaru prądem o wartości przekraczającej 100-krotność znamionowego prądu różnicowego najpopularniejszych wyłączników różnicowoprądowych (30 mA typu AC i typu A) bez ich zbędnego wyzwiania.

Na podstawie badań i obliczeń matematycznych dowiedziono, że w obwodach odbiorczych pomiar rezystancji pętli zwarciowej w stosunku do pomiaru impedancji pętli zwarciowej jest równie dokładny, a uproszczenie wynikające z pominięcia reaktancji obwodu zwarciowego nie wprowadza błędu większego niż 1% w najpopularniejszych układach sieci. Stwierdzenie to udowodniono na 4 przykładach szerzej opisanych w rozdziale 3.4.

Autor rozprawy dokonał szczegółowego przeglądu znanych metod pomiaru impedancji i rezystancji pętli zwarciowej wraz z ich krytyczną analizą w celu wyszczególnienia problemów i błędów istniejących metod. Dokonał on również szeregu badań w celu sprawdzenia zachowania się różnych wyłączników na znane przebiegi prądów pomiarowych. Całość badań stanowiła podstawę opracowania nowej metody pomiaru.

W celu przygotowania prototypowego miernika wykorzystującego nową metodę pomiaru, przeprowadzono szereg symulacji wspomaganych komputerowo w programie LTspice. Pozwoliło



to na optymalne dobranie parametrów elementów obwodu pomiarowego, a także skróciło czas weryfikacji eksperymentalnych. Dla ostatecznego potwierdzenia skuteczności nowej metody, autor w całości zaprojektował, zbudował i przetestował prototypowy miernik w wersji stanowiska laboratoryjnego opracowanego na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej.

W podsumowaniu rozprawy zestawiono wyniki badań laboratoryjnych z wykorzystaniem nowego miernika rezystancji pętli zwarciowej oraz przedstawiono dalszy kierunek badań. Autor niniejszej rozprawy nadal prowadzi badania nad udoskonaleniem opatentowanej metody oraz zwiększeniem dokładności pomiaru przez zwiększenie wartości prądu pomiarowego. Prowadzone są również intensywne prace przy budowie nowej wersji miernika rezystancji pętli zwarciowej, który będzie kompaktową, przenośną i udoskonaloną wersją opisanego stanowiska laboratoryjnego.



1. WSTĘP

1.1. WPROWADZENIE

Instalacje elektryczne niskiego napięcia wymagają wykonania pomiarów odbiorczych i okresowych w celu sprawdzenia ich stanu, w tym zweryfikowania skuteczności ochrony przeciwporażeniowej. Zgodnie z zapisami normy PN-HD 60364-6 [1], przywołanej w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [2], każda instalacja elektryczna podlega sprawdzeniu po jej wybudowaniu oraz w trakcie eksploatacji. Do podstawowych prób, jakie powinny zostać wykonane, zalicza się między innymi pomiar impedancji pętli zwarciowej, który pozwala na sprawdzenie skuteczności najczęściej stosowanego środka ochrony przeciwporażeniowej przy uszkodzeniu – samoczynnego wyłączenia zasilania.

Znajomość impedancji pętli zwarciowej, na którą składa się część rezystancyjna oraz reaktancyjna instalacji i sieci poprzedzającej, pozwala na określenie parametrów zwarciowych w danym miejscu badanej instalacji. Wartość przewidywanych prądów zwarciowych jest istotna ze względu na bezpieczeństwo użytkowania urządzeń elektrycznych.

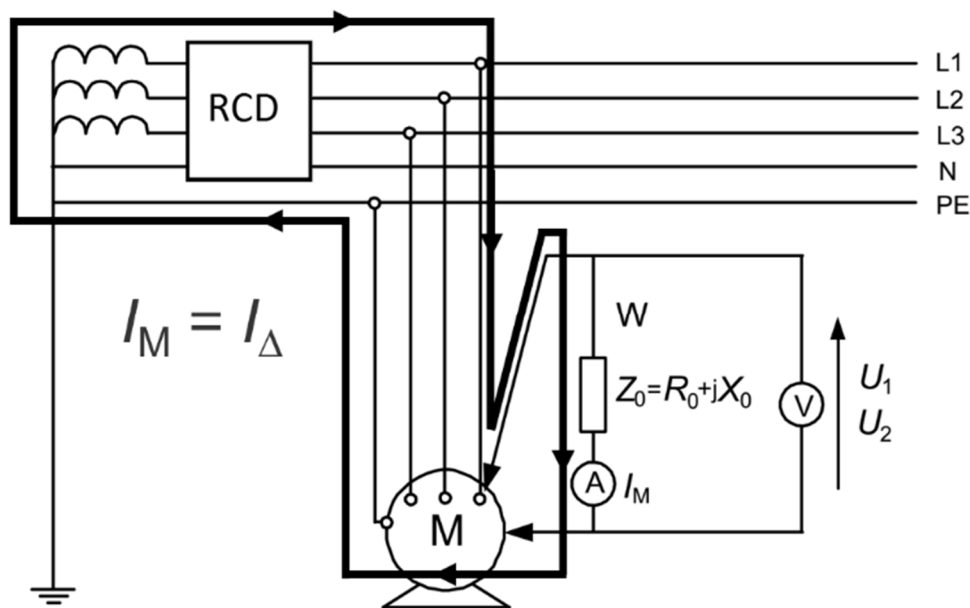
Prawidłowo wykonany pomiar impedancji pętli zwarciowej (IPZ) jest podstawą do określenia (obliczenia) spodziewanego prądu zwarciowego i oceny, czy w przypadku doziemienia nastąpi wyłączenie zasilania w wymaganym przez normę [3] czasie. Niespełnienie kryterium samoczynnego wyłączenia zasilania podczas zwarcia, świadczyć może o błędnie wykonanej instalacji, błędach projektowych bądź uszkodzeniach eksploatacyjnych i/lub montażowych badanej instalacji.

W nowych instalacjach pojawia się coraz więcej wyłączników różnicowoprądowych (RCDs), co komplikuje pomiary impedancji pętli zwarciowej. Prąd pomiarowy jest jednocześnie prądem różnicowym dla wyłącznika RCD (rys. 1.1), i w konsekwencji może to prowadzić do jego zbędnego wyzwania [4, 5]. Pojawiły się mierniki, który wykorzystają bardzo mały prąd pomiarowy (około 15 mA), ale w wielu wypadkach nie zapewniają one wystarczającej dokładności pomiaru. Między innymi z powodu zbyt małej wartości prądu pomiarowego pojawiają się błędy ujemne o dużej wartości, a to niekorzystanie wpływa na bezpieczeństwo użytkowania urządzeń elektrycznych. Wartość zmierzona impedancji pętli zwarciowej jest mniejsza niż rzeczywista, co



może doprowadzić do dopuszczenia do użytkowania urządzenia/obwodu, w którym wyłączenie zasilania w przypadku doziemienia nie nastąpi w wymaganym przez normę czasie.

W niniejszej rozprawie doktorskiej dokonano oceny przydatności do pomiaru impedancji lub rezystancji pętli zwarciowej w obwodach z RCDs dotychczas stosowanych metod i mierników oraz przedstawiono autorskie i opatentowane [6] rozwiązanie pomiaru rezystancji pętli zwarciowej w obwodach z wyłącznikami różnicowoprądowymi typu AC i typu A bez ich zbędnego wyzwiania.



Rys. 1.1 Schemat pomiaru impedancji pętli zwarciowej w obwodzie z wyłącznikiem różnicowoprądowym; RCD – wyłącznik różnicowoprądowy, I_M – prąd pomiarowy

1.2. CEL PRACY

Celem pracy jest przeprowadzenie krytycznej oceny istniejących rozwiązań w zakresie pomiarów impedancji pętli zwarciowej w obwodach chronionych wyłącznikami różnicowoprądowymi i na tym tle przedstawienie autorskiego rozwiązania pomiaru rezystancji pętli zwarciowej. Autor rozprawy za cel postawił sobie nie tylko teoretyczne przedstawienie wynalazku i zasady jego działania, ale również przeprowadzenie weryfikacji doświadczalnej. W tym celu zaprojektowano, zbudowano i przetestowano prototypowy model miernika na stanowisku laboratoryjnym.



1.3. TEZY PRACY

Teza główna:

W obwodach z wyłącznikami różnicowoprądowymi klasyczny pomiar impedancji pętli zwarciowej dużym prądem, zalecanym ze względu na dokładność pomiaru, jest niewykonalny, ponieważ inicjuje ich zbędne natychmiastowe wyzwalenie. Istnieje wszakże możliwość wykonania takiego pomiaru bez wyzwiania wyłączników różnicowoprądowych, nawet przy użyciu prądu pomiarowego wielokrotnie większego niż znamionowy prąd różnicowy zadziałania wyłączników różnicowoprądowych.

Teza pomocnicza:

W typowych obwodach odbiorczych instalacji elektrycznych reaktancja obwodu zwarciowego jest na tyle mała, że można ją pominąć podczas pomiaru impedancji pętli zwarciowej, a błąd pomiarowy względny wynikający z uproszczenia nie przekracza 1%, co zwiększa możliwości wykonania takiego pomiaru bez wyzwiania wyłączników różnicowoprądowych.

1.4. ZAKRES PRACY

Rozdział pierwszy ma charakter wprowadzenia w tematykę pomiaru impedancji pętli zwarciowej oraz wskazanie problemów wykonywania tego typu pomiarów w obwodach z wyłącznikami różnicowoprądowymi. Rozdział ten zawiera również cel, tezy i zakres rozprawy doktorskiej.

Rozdział drugi poświęcono w całości wyłącznikom różnicowoprądowym. Na wstępie przeprowadzono przegląd historyczny powstania i zmian w konstrukcji wyłączników różnicowoprądowych, z krytyczną oceną ich niezawodności. W dalszej części rozdziału skupiono się na budowie aktualnych konstrukcji wyłączników oraz ich podziale i właściwościach z punktu widzenia wybranych kryteriów. Najwięcej treści poświęcono opisowi i analizie właściwości rdzeni przekładników sumujących wyłączników – to właśnie ich budowa i materiał, z którego są wykonane, bezpośrednio wpływa na reakcję na prądy różnicowe, co jest bardzo istotne z punktu widzenia zapobiegania zbędnym wyzwoleniom podczas pomiaru impedancji pętli zwarciowej. Dogłębna analiza zachowania się różnych konstrukcji przekładników sumujących była podstawą do stworzenia nowej metody pomiaru.



Rozdział trzeci dotyczy pomiarów impedancji pętli zwarciowej. Scharakteryzowano typową metodę pomiaru za pomocą sztucznego zwarcia opisaną w normach oraz wyjaśniono, dlaczego powoduje ona zbędne wyzwalanie wyłączników różnicowoprądowych. W tym rozdziale zawarto również wyniki symulacji związanych z określeniem stosunku rezystancji do reaktancji obwodu zwarciowego oraz wpływ tych parametrów na wartość błędu pomiaru.

W **rozdziale czwartym** skupiono się na badaniach laboratoryjnych reakcji różnych typów wyłączników różnicowoprądowych na prądy pomiarowe dostępnych na rynku mierników impedancji pętli zwarciowej. Badaniom poddano kilkanaście wyłączników różnicowoprądowych. Rozdział ten zawiera również wnioski wskazujące, w jakich warunkach można wykonać pomiar klasycznymi miernikami i nie następuje zbędne zadziałanie tych wyłączników.

Rozdział piąty zawiera przegląd znanych metod pomiaru impedancji pętli zwarciowej bez wyzwalania wyłączników podczas pomiaru. Dokonano krytycznej analizy każdego z rozwiązań wraz z oceną przydatności tego typu metod do budowy rzeczywistych mierników.

Rozdział szósty w sposób szczegółowy opisuje nową, opatentowaną metodę pomiaru rezystancji pętli zwarciowej bez wyzwalania wyłączników różnicowoprądowych. Rozdział rozpoczyna opis założeń postawionych na początku prac nad nową metodą pomiaru. Wyjaśniona została również sama metoda i zasada pomiaru oraz sposób zapobiegania zbędnemu wyzwalaniu wyłączników podczas pomiaru. Dodatkowo opisano budowę stanowiska laboratoryjnego stworzonego przez autora rozprawy do udowodnienia tezy, że nowa metoda pomiaru nie powoduje zbędnego wyzwalania wyłączników różnicowoprądowych typu AC i typu A podczas pomiaru rezystancji pętli zwarciowej. Na końcu rozdziału umieszczono wyniki badań laboratoryjnych wraz z ich oceną.

W **rozdziale siódmym** podsumowano całą rozprawę doktorską oraz dokonano zestawienia wyników symulacji, analiz i badań laboratoryjnych nad nową metodą pomiaru rezystancji pętli zwarciowej oraz przedstawiono wnioski. Wskazano również dalszy kierunek prac badawczych oraz możliwości udoskonalenia i miniaturyzacji urządzenia pomiarowego wraz z planami wdrożenia do produkcji.

W części końcowej, tj. w **rozdziałach od ósmego do jedenastego**, zawarto spis: literatury, rysunków i tabel oraz załączniki.



2. WYŁĄCZNIKI RÓŻNICOWOPRĄDOWE

2.1. RYS HISTORYCZNY

Pierwsze wyłączniki różnicowoprądowe pojawiły się na rynku około 1950 roku. Najwcześniej wprowadziły je do sprzedaży firmy Schrack (1949) i Schutzapparategesellschaft Paris&Co (1951), jako produkcje małoseryjne [7]. Początkowo były mało popularne, ze względu na ich wysoką cenę, zawodność, wrażliwość na wstrząsy i duży gabaryt. Brak odpowiednich materiałów do budowy rdzeni przekładnika sumującego powodował konieczność stosowania uzwojeń pierwotnych o dużej liczbie zwojów, co skutkowało dużym spadkiem napięcia w obwodzie chronionym oraz znacznym gabarytem i wagą wyłącznika. Wyłączniki wysokoczułe zaczęto produkować od około 1960 roku [8].

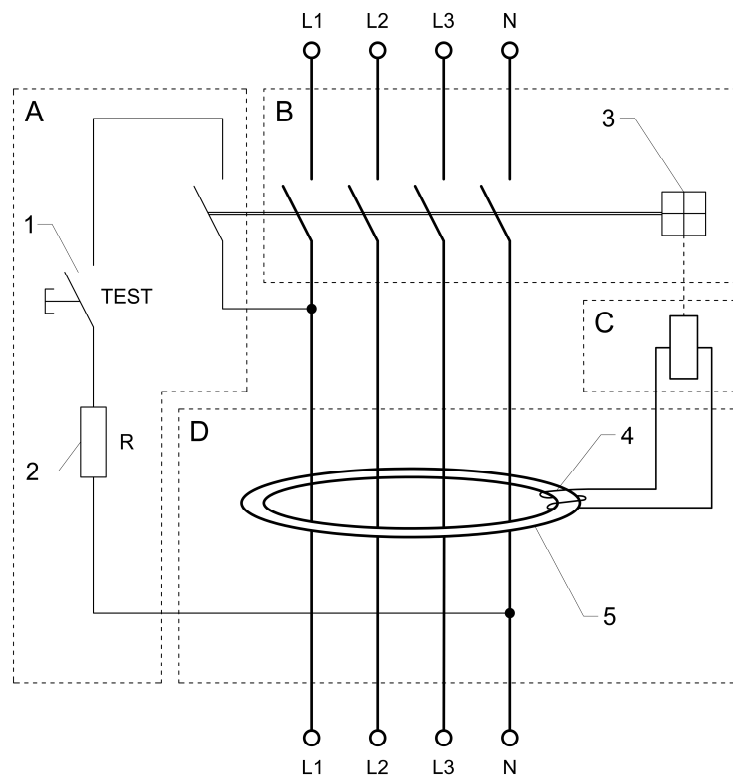
Typowe wartości znamionowego prądu różnicowego wynosiły na ogół 0,3 A, 0,5 A, 1 A lub 3 A, i były głównie stosowane w celach ochrony przeciwpożarowej, a nie przeciwporażeniowej, ponieważ nawet wartość $I_{\Delta n} = 300mA$ nie dawała ochrony przed porażeniem. Działanie ówczesnych wyłączników różnicowoprądowych było najczęściej zależne od napięcia sieci [7].

Obecnie produkowane wyłączniki znacznie różnią się od tych z lat 50-tych ubiegłego wieku pod względem konstrukcyjnym, jak i wykorzystywanych materiałów do ich budowy, są również znacznie popularniejsze niż niegdyś, głównie ze względu na konieczność ich stosowania, wymuszaną przez przepisy i normy [2, 3, 9–15].

2.2. BUDOWA WYŁĄCZNIKÓW RÓŻNICOWOPRĄDOWYCH

Aktualne konstrukcje wyłączników różnicowoprądowych opierają się głównie o dwu- lub czterobiegunowe aparaty błędnie potocznie nazywane odpowiednio jako wyłączniki jedno- lub trójfazowe. Nieprawidłowe nazewnictwo wynika głównie z typowego zastosowania wyłączników dwubiegunowych do zabezpieczenia instalacji 1-fazowych oraz czterobiegunowych do instalacji 3-fazowych. Nie ma jednak żadnych przeszkód, by stosować wyłącznik różnicowoprądowy czterobiegunowy do zabezpieczenia obwodu jednofazowego (nie wszystkie bieguny muszą być wykorzystane). Przy takim niestandardowym wykorzystaniu wyłącznika należy pamiętać o zapewnieniu zasilania dla członu kontrolnego. Najczęściej obwód kontrolny przyłączony jest pomiędzy zacisk neutralny a zacisk fazowy (L1), ale nie jest to reguła (rys. 2.1).

Typowy wyłącznik różnicowoprądowy składa się z kilku podstawowych członów, takich jak człon kontrolny, człon wyłączający, człon wyzwalający i człon pomiarowy (rys. 2.1). Wszystkie przewody fazowe, jak i przewód neutralny, przechodzą przez okno przekładnika sumującego wykonanego z materiału ferromagnetycznego. Parametry materiału, z którego wykonany jest rdzeń sumujący, wpływają bezpośrednio na charakterystykę wykrywanego prądu różnicowego, a co za tym idzie na typ produkowanego wyłącznika (typ AC, A, B, F) [16–18]. Szerszy i bardziej szczegółowy opis materiałów stosowanych do budowy rdzeni przekładników sumujących zawarto w rozdziale 2.4.



Rys. 2.1 Schemat budowy wyłącznika różnicowoprądowego

A – człon kontrolny, B – człon wyłączający, C – człon wyzwalający (wyzwalacz różnicowy), D – człon pomiarowy,

1 – przycisk testujący, 2 – rezystor obwodu kontrolnego, 3 – zamek, 4 – uzwojenie wtórne, 5 – rdzeń przekładnika sumującego

Człon wyłączający wyłącznika różnicowoprądowego (człon B na rys. 2.1) odpowiedzialny jest za przerywanie przepływu prądu do odbiornika (lub całej instalacji) w przypadku wykrycia upływu prądu, np. w razie uszkodzenia. Składa się ze styków mechanicznych o odpowiedniej wytrzymałości elektrycznej i mechanicznej dostosowanych do przepływu prądu roboczego, przeciążeniowego i zwarciovego. Połączony jest z zamkiem odpowiedzialnym za utrzymanie



styków zwartych podczas normalnej pracy i szybkim ich otwarciu w przypadku konieczności wyłączenia obwodu.

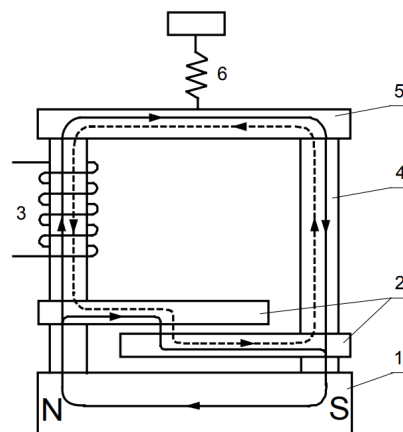
Początkowo, jako element wyzwalający zamek (człon C na rys. 2.1), stosowano elektromagnes, do którego energia doprowadzana była bezpośrednio lub pośrednio z przekładnika sumującego. Takie rozwiązanie wymuszało konieczność stosowania dużej liczby zwojów o odpowiednim przekroju do dostarczenia znacznej mocy do uruchamiania elektromagnesu, którego siła przyciągania zwory musiała być większa od siły sprężyny zwrotnej. Czas potrzebny do otwarcia styków wyłącznika od chwili wystąpienia prądu różnicowego był wielokrotnie większy od czasów występujących w obecnych konstrukcjach.

Paul Duffing w 1953 roku opatentował i w tym samym roku opublikował [19] nowe rozwiązanie magnesu zapadkowego nazywanego również zapadką magnetyczną [7]. Wynalazek ten przyczynił się do budowy nowych wyzwalaczy różnicowych o znacznie lepszych parametrach niż te, w których stosowano opisany wcześniej elektromagnes. Główną zaletą zapadki magnetycznej, czyli elektromagnesu trzymającego, który po wzbudzeniu zwalnia zworę, jest bardzo krótki czas wyzwalań, rzędu 0,1 ms, oraz niewielka moc potrzebna do wyzwolenia, rzędu ułamka miliwoltoamperów. To głównie druga zaleta zapadki magnetycznej przyczyniła się do rozwoju wyłączników różnicowoprądowych wysokoczułych o wyzwalań bezpośrednim, gdzie cała moc potrzebna do wyzwalań wyłącznika czerpana jest z sygnału różnicowego po przetransformowaniu na stronę wtórną przekładnika sumującego.

Podczas załączenia wyłącznika dźwignią, napinana jest sprężyna zwrotna i zmniejsza się szczelina powietrzna pomiędzy jarzmem wyzwalacza a zworą. Dzięki zastosowaniu magnesu trwałego wbudowanego w to jarzmo, zwora jest przyciągana i utrzymana w pozycji zamkniętej. W czasie przepływu prądu różnicowego przez uzwojenie wyzwalacza, wytworzony zostaje strumień magnetyczny osłabiający strumień magnesu trwałego. W chwili odpowiedniego zmniejszenia siły przyciągającej zworę przez magnes trwały, odpada ona z udziałem siły sprężyny. Czym większe jest osłabienie strumienia magnetycznego magnesu trwałego tym szybsze i pewniejsze opadnięcie zwory i otwarcie styków wyłącznika. W zależności od budowy można wyróżnić: wyzwalacz spolaryzowany i wyzwalacz niespolaryzowany.



W **wyzwalaczu różnicowym spolaryzowanym** magnes trwały wytwarza strumień magnetyczny przyciągając zworę do jarzma i przytrzymując ją w pozycji zamkniętej po podniesieniu dźwigni wyłącznika. Zdecydowana większa część strumienia przechodzi przez jarzmo i zworę, a niewielka jego część przez bocznik magnetyczny (linie ciągłe na rys. 2.2). Przepływ odpowiednio dużego prądu różnicowego przez uzwojenie powoduje wytworzenie strumienia, który osłabia lub wzmacnia strumień magnetyczny pochodzący od magnesu trwałego. Kierunek strumienia zależy od polaryzacji napięcia w cewce. Przy prądach różnicowych sinusoidalnych, w jednej połowie sinusoidy zwora jest mocniej przyciągana natomiast w drugiej połowie strumień magnesu trwałego jest osłabiany do takiego poziomu, że sprężyna zwrotna odciąga zworę i następuje wyzwolenie wyłącznika. Jest to sytuacja najgorsza, ponieważ pierwsza półfala sinusoidy nie wyzwala wyłącznika i następuje to dopiero w drugiej półfali napięcia o przeciwnym znaku, co może zwiększyć czas reakcji wyłącznika o nawet 10 ms (przy częstotliwości 50 Hz napięcia zasilania). Zainstalowany bocznik magnetyczny niezbędny jest z dwóch powodów: po pierwsze, zamyka drogę strumienia magnetycznego wytwarzanego przez uzwojenie; po drugie, zapobiega demagnesowaniu magnesu trwałego, kiedy zwora jest odciągnięta. Zadziałanie wyzwalacza spolaryzowanego zależy od kierunku przepływu prądu przez jego uzwojenie [7, 20, 21].

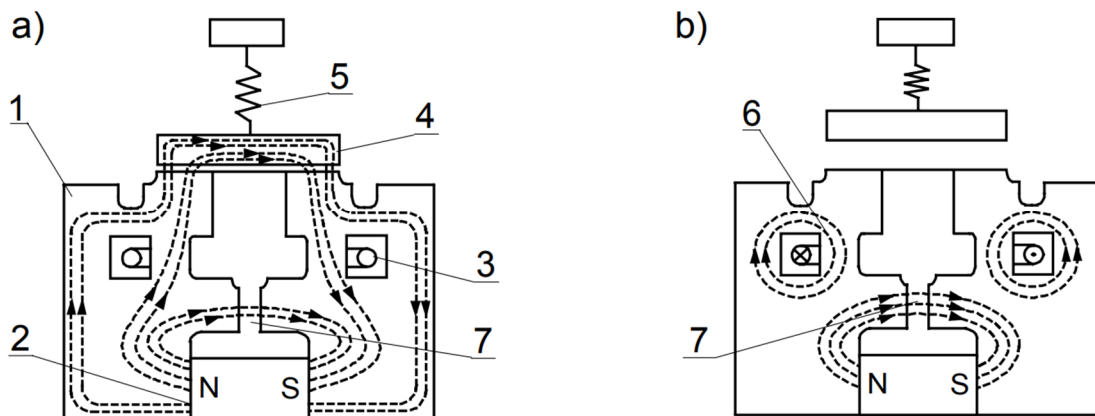


Rys. 2.2 Wyzwalacz różnicowy spolaryzowany [7, 20]

1 – magnes trwały, 2 – bocznik magnetyczny, 3 – uzwojenie wyzwalacza, 4 – jarzmo (kolumna),
5 – zwora, 6 – sprężyna zwrotna

Wyzwalacz różnicowy niespolaryzowany, w przeciwieństwie do spolaryzowanego, charakteryzuje się działaniem niezależnym od polaryzacji prądu przepływającego przez jego cewkę. Podobnie jednak jak w wyzwalaczu różnicowym spolaryzowanym, zwora przyciągana jest przez strumień wytwarzany przez magnes trwały – strumień ten zamyka się dwiema drogami, przez

zworę oraz przez bocznik magnetyczny (rys. 2.3 a). Odmienna budowa jarzma wyzwalacza niespolaryzowanego powoduje, że strumień magnetyczny wytworzony przez prąd różnicowy płynący w uzwojeniu nawiniętym na jarzmo wyzwalacza nasycza przewężenia jarzma. Zmienia się jednocześnie przenikalność magnetyczna i permanencja (przewodność magnetyczna) przewężenia, co powoduje blokowanie przepływu strumienia magnetycznego od magnesu trwałego przez zworę i w rezultacie zanik siły magnetycznej przyciągającej ją do jarzma (rys. 2.3 b). Sprężyna zwrotna odciąga zworę i następuje wyzwolenie wyłącznika [7, 20]. Wyzwalacze tego typu są niewrażliwe na kierunek prądu płynącego w jego uzwojeniu.



Rys. 2.3 Wyzwalacz różnicowy niespolaryzowany: a) w stanie trzymania; b) w chwili odpadania zwory przy przepływie prądu różnicowego przez cewkę [7, 20]

1 – jarzmo rdzenia, 2 – magnes trwały, 3 – uzwojenie wyzwalacza, 4 – zwora, 5 – sprężyna zwrotna, 6 – strumień wytwarzany przez uzwojenie nasycający przewężenia jarzma, 7 – strumień magnesu trwałego zamykający się przez bocznik magnetyczny

W celu okresowego sprawdzenia skuteczności działania wyłącznika różnicowoprądowego w jego obudowie instalowany jest **człon kontrolny** (człon A na rys. 2.1). Na obudowie każdego wyłącznika znajduje się monostabilny przycisk testowy, najczęściej opisany jako TEST lub T. Przyciśnięcie przycisku powoduje zwarcie przewodu fazowego z jednej strony przekładnika sumującego z przewodem neutralnym po drugiej jego stronie przez rezystor pomiarowy R. Powoduje to przepływ prądu poza oknem przekładnika i w konsekwencji niezrównoważenie sumy prądów w przewodach po stronie pierwotnej przekładnika. Norma PN-EN 61008-1 [22] wymaga, by obwód testowy (człon A na rys. 2.1) działał niezależnie od kierunku przepływu energii przez wyłącznik. Jeżeli wyłącznik jest sprawny powinno wystąpić jego wyzwolenie i otwarcie styków. Dodatkowo otwierany jest styk pomocniczy przerywający przepływ prądu w obwodzie kontrolnym dla zminimalizowania nagrzewania się rezystora i jego ewentualnego uszkodzenia przy ciągłym



wciśnięciu przycisku TEST. Moc rezystora pomiarowego dobierana jest do pracy dorywczej, a nie pracy ciągłej. Procedura sprawdzania skuteczności zadziałania wyłącznika powinna być wykonywana nie rzadziej niż raz na miesiąc (w typowych warunkach pracy) przez użytkownika instalacji zgodnie z instrukcją obsługi [23]. Inaczej jest np. na placach budowy, gdzie sprawdzenia wyłącznika zgodnie z przepisami dokonuje się przed każdym użyciem, czyli z reguły raz dziennie [9, 24]. Należy nadmienić, że wyzwolenie wyłącznika po przyciśnięciu przycisku TEST świadczy jedynie o jego sprawności mechanicznej, i jednocześnie nie jest wiadomo, w jakim czasie zadziałał oraz przy jakim prądzie różnicowym z uwagi na brak danych o wartości rezystancji rezystora w obwodzie kontrolnym. Wartość prądu różnicowego w czasie testu jest większa od prądu znamionowego różnicowego wyłącznika, ale jednocześnie nie większa niż $2,5 * I_{\Delta n}$ przy napięciu znamionowym zasilania członu kontrolnego [25]. Informacja o wartości rezystancji rezystora pomiarowego nie jest zawarta w danych katalogowych producentów wyłączników, ale mieści się w granicach od około 3,2 k Ω do 7,5 k Ω (dla najpopularniejszych wyłączników o $I_{\Delta n} = 30 \text{ mA}$).

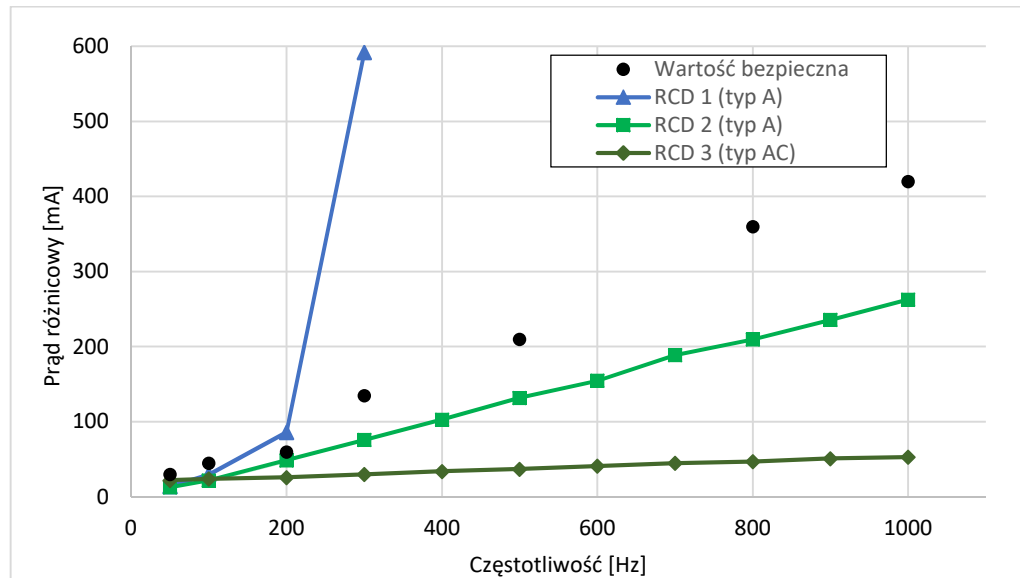
Człon pomiarowy (człon D na rys. 2.1) składa się przekładnika sumującego, którego zadaniem jest wykrywanie prądu różnicowego w przewodach przechodzących przez okno rdzenia. Przekładnik ten zawiera uzwojenie wtórne, w którym indukowane jest napięcie zależne od wartości różnicy prądów płynących w przewodach obwodu chronionego. Charakterystyka transformowania prądów ze strony pierwotnej na wtórną jest zależna od budowy przekładnika sumującego. Szerzej to zagadnienie opisano rozdziale 2.1.

2.3. PODZIAŁ I WŁAŚCIWOŚCI WYŁĄCZNIKÓW RÓŻNICOWOPRĄDOWYCH

Wyłączniki różnicowoprądowe można podzielić na kilka kategorii w zależności od rozpatrywanego parametru lub cechy. Wymienione poniżej parametry i cechy szczególne nie wyczerpują wszystkich dostępnych podziałów, skupiono się na tych, które wpływają bezpośrednio na wyzwolenie wyłącznika:

– **Częstotliwość znamionowa prądu** – najbardziej popularne wyłączniki pracują przy częstotliwości znamionowej sieci elektroenergetycznej 50 Hz (60 Hz). Dla obwodów pracujących przy innych częstotliwościach znamionowych niż 50 Hz lub 60 Hz, np. niektóre obwody sieci elektroenergetycznej lotnisk pracują przy częstotliwości 400 Hz, stosuje się wyłączniki w wykonaniu specjalnym. Zachowanie wyłącznika różnicowoprądowego przystosowanego do pracy przy częstotliwości prądu różnicowego 50 Hz (60 Hz), dla częstotliwości wyższych

i niższych jest nieokreślone przez producenta. Z badań [26–28] wynika, że wartość prądu wyzwalania wyłącznika różnicowoprądowego wzrasta wraz ze zwiększaniem się częstotliwości prądu różnicowego (rys. 2.4), natomiast w badaniach [29], dowiedziono, że prąd wyzwalania wyłącznika może wzrastać również dla częstotliwości prądu mniejszych niż 50 Hz.



Rys. 2.4 Porównanie wartości różnicowego prądu wyzwalania w funkcji częstotliwości prądu dla różnych wyłączników RCD (opracowanie własne na podstawie [26])

– **Znamionowy prąd różnicowy** – jest najistotniejszym parametrem charakteryzującym wyłącznik różnicowoprądowy. Wartości znamionowego prądu różnicowego zadziałania wyłącznika $I_{\Delta n}$ zawierają się w granicach od 6 mA do nawet 30 A [30]. Wartość $I_{\Delta n}$ wyłącznika jest bardzo istotna z punktu widzenia ochrony przeciwporażeniowej i powinna być jak najmniejsza, ale jednocześnie na tyle duża, by nie powodować zbędnych wyłączeń przy prawidłowej pracy obwodu charakteryzującego się wpływami prądu do przewodu ochronnego (np. zasilacze komputerów, urządzenia ergoelektroniczne itp.).



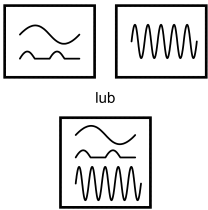
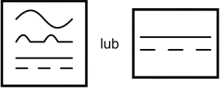
Pod względem wartości znamionowej prądu różnicowego wyzwalania wyłączniki można podzielić na 3 grupy:


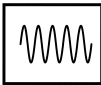
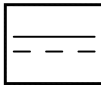
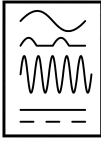
- wysokoczułe – $I_{\Delta n} \leq 30 \text{ mA}$
- średniczułe – $30 \text{ mA} < I_{\Delta n} \leq 500 \text{ mA}$
- niskoczułe – $500 \text{ mA} < I_{\Delta n}$

W ochronie przeciwporażeniowej uzupełniającej przydatne są tylko wyłączniki o prądzie znamionowym $I_{\Delta n} \leq 30$ mA, natomiast wyłączniki o wyższych wartościach znamionowego prądu różnicowego stosowane są w ochronie przeciwpożarowej i przeciwporażeniowej dodatkowej.

– **Typ wyzwalania** – poza prądem znamionowym różnicowym, typ wyzwalania jest drugą najważniejszą właściwością wyłączników różnicowoprądowych, ponieważ określa charakterystykę prądu (kształt przebiegu prądu), na jaki wyłącznik jest czuły. Poniżej, w tab. 2.1, wyszczególnione zostały typy wyzwalania wyłączników różnicowoprądowych oraz ich typowe symbole wraz z opisem prądów, na które reagują [30–36].

Tab. 2.1 Rodzaje wyłączników różnicowoprądowych ze względu na zdolność wykrywania określonego kształtu przebiegu prądu różnicowego – opracowanie własne na podstawie [7]

Oznaczenie literowe i symbol graficzny	Przebieg prądu różnicowego wykrywany przez wyłącznik
<p>AC</p> 	<ul style="list-style-type: none"> – prąd przemienny sinusoidalny (na ogół 50/60 Hz)
<p>A</p> 	<ul style="list-style-type: none"> – prąd przemienny sinusoidalny (na ogół 50/60 Hz), – prąd pulsujący stały, – prąd pulsujący stały ze składową wygładzoną 6 mA, z ew. sterowaniem fazowym, niezależnie od biegunowości.
<p>F</p> 	<ul style="list-style-type: none"> – jak dla wyłącznika A, – prąd pulsujący stały ze składową wygładzoną 10 mA, – prąd przemienny zawierający harmoniczne (zasilanie jednofazowe).
<p>B</p> 	<ul style="list-style-type: none"> – prąd przemienny sinusoidalny (na ogół 50/60 Hz), – prąd przemienny sinusoidalny ze składową wygładzoną o wartości większej spośród dwóch: $0,4 I_{\Delta n}$ oraz 10 mA, – prąd pulsujący stały ze składową wygładzoną o wartości większej spośród dwóch: $0,4 I_{\Delta n}$ oraz 10 mA, – prąd stały z następujących układów prostowniczych:

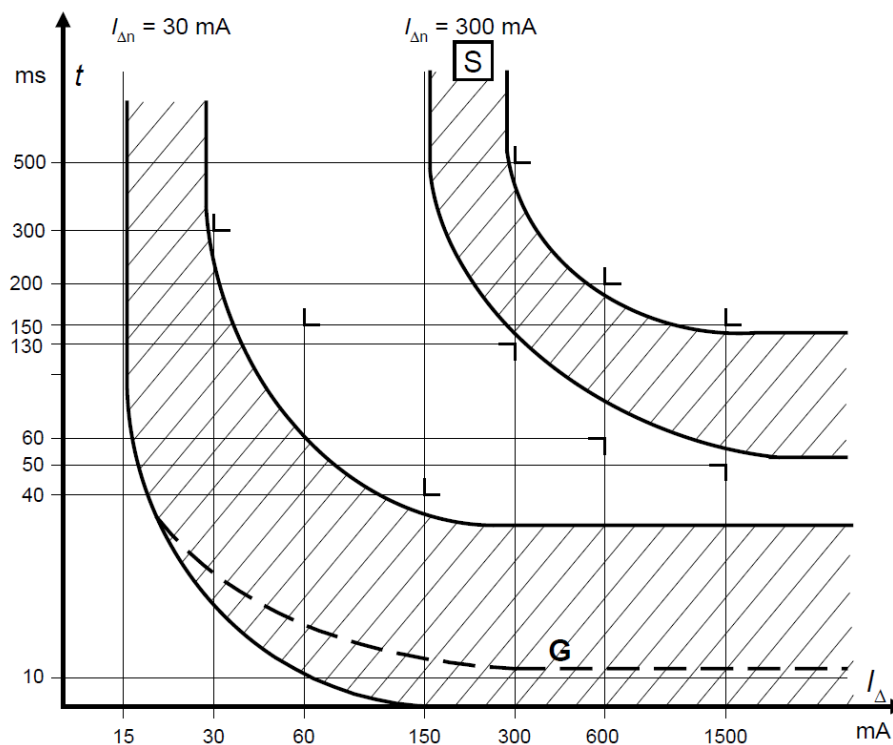
<p style="text-align: center;">Nowy symbol graficzny:</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">    </div> <p style="text-align: center;">lub</p> <div style="text-align: center;">  </div>	<ul style="list-style-type: none"> - z prostownika dwupulsowego zasilanego napięciem międzyprzewodowym w przypadku wyłączników 2-, 3- i 4-biegunowych, - z prostownika trójpulsowego (układ gwiazdy) albo z prostownika sześciopulsowego w przypadku wyłączników 3- i 4-biegunowych, - prąd stały wygładzony z ew. sterowaniem fazowym, niezależnie od biegunowości. <p>W dokumencie IEC/TR 60755:2008 [30] pojawiło się dodatkowe wymaganie:</p> <ul style="list-style-type: none"> - prąd przemienny sinusoidalny o częstotliwości nieprzekraczającej 1000 Hz.
<p>B+</p>	<p>W normie IEC 62423:2009 [31] zmieniono symbol graficzny i podano wymaganie dotyczące działania przy prądzie przemiennym zawierającym harmoniczne (jak dla wyłączników typu F).</p> <ul style="list-style-type: none"> - jak dla wyłącznika B, - prąd przemienny sinusoidalny o częstotliwości nieprzekraczającej 20 000 Hz.

Najczęściej w instalacjach odbiorczych stosowane są wyłączniki **typu AC**, są one jednocześnie najtańsze, ponieważ posiadają najprostszą budowę, ale reagują jedynie na sinusoidalne prądy różnicowe. Stosowane są do zabezpieczenia obwodów z nieskomplikowanymi odbiornikami, grzejników, gniazd wtyczkowych ogólnego użytku itp. Wyłączniki **typu A** powinny być wykorzystywane do zabezpieczenia obwodów zasilających urządzenia elektroniczne, energoelektroniczne, komputery, serwery itp. ze względu na możliwość wystąpienia prądów różnicowych pulsujących stałych spowodowanych wbudowanymi w urządzenia zasilaczami energoelektronicznymi [37]. Wyłączniki **typu F** znajdują zastosowanie w obwodach zasilających przemienniki częstotliwości, gdzie prądy różnicowe mogą mieć wyższą częstotliwość niż 50 Hz (60 Hz). Do najbardziej zaawansowanych urządzeń należą wyłączniki **typu B i B+**, które reagują na prądy o charakterystyce jak dla wyłączników typu F, ale również na prądy stałe. Wykorzystywane są w układach z prostownikami prądu: jedno-, dwu- i trójfazowymi oraz do obwodów prądu stałego o pomijalnym tętnieniu.



– **Opóźnienie wyzwala** – w przypadku szeregowego łączenia wyłączników różnicowoprądowych należy zapewnić ich selektywność zadziała (wybiorczość). Dla wyłącznika poprzedzającego wymagane są inne czasy wyzwala tak, by w przypadku wystąpienia doziemienia zadziałał najpierw wyłącznik najbliższy miejsca uszkodzenia (bezzwłoczny lub krótkozwłoczny), a dopiero w przypadku jego niezadziałania zadziałał wyłącznik poprzedzający (zwłoczny, selektywny). Wyłączniki selektywne oznaczone są na obudowie literą **S** w kwadracie, a wyłączniki krótkozwłoczne najczęściej literą **G** (tab. 2.2).

Podczas projektowania instalacji i doboru aparatów zabezpieczających należy zwrócić uwagę na to, czy charakterystyki pasmowe czasowo-prądowe wyłączników różnicowoprądowych $t = f(I_{\Delta})$ nie stykają się. Pomiędzy granicami charakterystyk należy zachować dodatkowo odpowiednią przerwę [7]. Przykład zestawienia charakterystyk czasowo-prądowych dla wyłącznika bezzwłocznego o $I_{\Delta n} = 30 \text{ mA}$ i poprzedzającego go wyłącznika selektywnego o $I_{\Delta n} = 300 \text{ mA}$ przedstawiono na rys. 2.5. Wartości graniczne czasowo-prądowe dla wyłączników określone są w normach [22, 30].

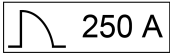



Rys. 2.5 Zestawienie pasmowych charakterystyk czasowo-prądowych dwóch wyłączników różnicowoprądowych: bezzwłocznego $I_{\Delta n} = 30 \text{ mA}$ i zwłoczny $I_{\Delta n} = 300 \text{ mA}$ [25]



– **Odporność na przejściowe prądy różnicowe** – w niektórych sytuacjach chwilowy przepływ prądu różnicowego jest zjawiskiem normalnym i wynika z budowy załączanego układu. W przypadku instalacji o dużych pojemnościach doziemnych (np. długie linie kablowe w osłonach metalowych, urządzenia elektroniczne z filtrami przeciwzakłóceniovymi) chwilowo może płynąć znaczny prąd upływowy. W takich przypadkach wyłącznik nie powinien wyzwolić. Odpowiedzią na ten problem są wyłączniki krótkowzroczne przetrzymujące bez wyzwolenia przejściowy prąd różnicowy w czasie przynajmniej 10 ms [7]. Na rys. 2.5 linią przerywaną z literą G oznaczono czas przetrzymywania wyłączników krótkozwłocznych. Największe czas wyłączenia (górną granicę pasma) są takie same dla wyłączników krótkozwłocznych i bezzwłocznych. Przykładowe oznaczenia odporności na przejściowe prądy różnicowe zawarto w tab. 2.2.

Tab. 2.2 Przykładowe oznaczenia odporności burzowej wyłączników różnicowoprądowych – opracowanie własne na podstawie [7, 25]

Oznaczenie	Interpretacja
 250 A	Wyłącznik bezzwłoczny odporny na prąd różnicowy udarowy 250 A o przebiegu 8/20 μ s
G lub KV lub HI	Wyłącznik krótkozwłoczny odporny na prąd różnicowy udarowy 3 kA o przebiegu 8/20 μ s
 S	Wyłącznik zwłoczny odporny na prąd różnicowy udarowy 5 kA o przebiegu 8/20 μ s

2.4. PRZEKŁADNIK SUMUJĄCY WYŁĄCZNIKA RÓŻNICOWOPRĄDOWEGO

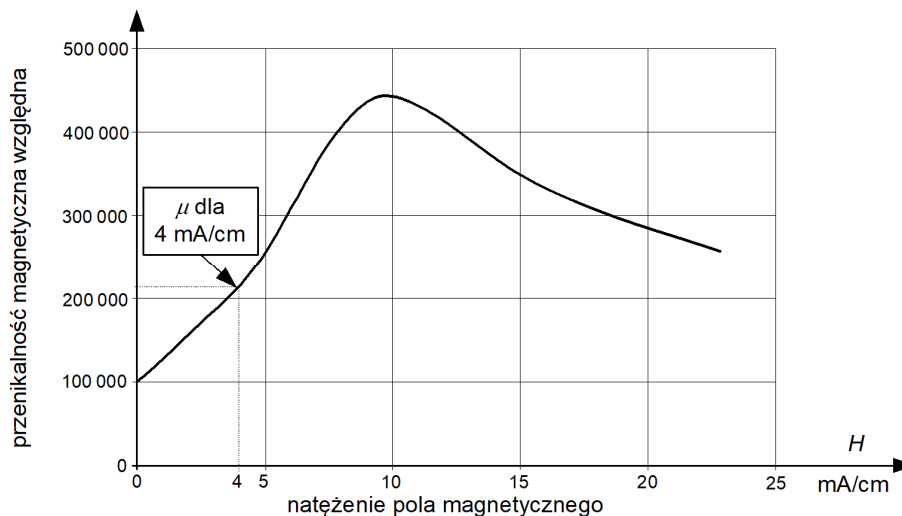
Jednym z najważniejszych elementów wyłącznika różnicowoprądowego jest przekładnik sumujący. Przekładnik ten, podobnie jak zwykły przekładnik prądowy, składa się z rdzenia, uzwojenia pierwotnego i uzwojenia wtórnego. W odróżnieniu od przekładnika prądowego, w przekładniku sumującym prąd płynący przez uzwojenie wtórne jest efektem różnicy prądów płynących przez wszystkie uzwojenia pierwotne (przewody fazowe i/lub neutralny). Zasada ta wykorzystywana jest w wyłącznikach różnicowoprądowych do wykrywania prądów różnicowych (prądów upływowych) w chronionej instalacji lub obwodzie.

Przekładnikom sumującym stawiane są bardzo wysokie wymagania. Podczas normalnej pracy spadek napięcia w obwodzie uzwojenia pierwotnego powinien być jak najmniejszy, w celu minimalizowania strat mocy w wyłączniku. W przypadku wystąpienia prądu różnicowego o wartości kilku lub kilkunastu miliamperów, napięcie indukowane po stronie wtórnej uzwojenia oraz moc muszą być wystarczające do wyzwolenia wyłącznika i rozłączenia jego styków.

Uzwojenia powinny być jednocześnie odporne na znaczne prądy podczas zwarć, gdy przez obwód chroniony, i tym samym przez uzwojenia pierwotne przekładnika, płyną prądy rzędu setek amperów lub nawet kiloamperów.

Rodzaj materiału magnetycznego, z którego zbudowany jest rdzeń przekładnika, ma decydujący wpływ na czułość wyłącznika i charakterystykę prądu powodującego jego wyzwolenie. Do budowy rdzeni przekładników sumujących wykorzystywane są różnego rodzaju materiały magnetyczne [7]:

- Ferromagnetyki miękkie, domieszkowane amorficzne stopy żelazo-niklowe, również stopy nanokrystaliczne o niskiej stratności, poddawane są procesom obróbki cieplnej i plastycznej mającej decydujący wpływ na wartość uzyskiwanej przenikalności magnetycznej początkowej. W danych katalogowych materiałów można znaleźć parametr przenikalności magnetycznej dla natężenia pola magnetycznego wynoszącego 4 mA/cm (wartość μ_4) i/lub 15 mA/cm (wartość μ_{15}).
- Ferromagnetyki o płaskiej pętli histerezy i dużej przenikalności magnetycznej odwracalnej. Ten typ materiału pozwala na uzyskanie dużego zakresu zmian indukcji w rdzeniu przy prądzie różnicowym stałym pulsującym. Właściwości tych materiałów wykorzystywane są do budowy przekładników sumujących wyłączników typu A.
- Ferromagnetyki o małym natężeniu koercji H_c , poniżej 10 mA/cm.
- Miniaturowe rdzenie toroidalne zwijane z taśm o grubości (0,025÷0,2) mm.



Rys. 2.6 Przenikalność magnetyczna względna stopu ferromagnetycznego żelazo-niklowego Ultraperm 250 w zależności od poziomu wzbudzenia [7, 8, 38]



W zależności od typu wyzwalania wyłącznika różnicowoprądowego, do budowy rdzenia przekładnika sumującego stosuje się odpowiednie typy materiałów magnetycznych o odpowiednich właściwościach. W wyłącznikach różnicowoprądowych o działaniu niezależnym od napięcia sieci cała moc potrzebna do zadziałania wyzwalacza czerpana jest z prądu różnicowego. W przypadku wyłączników wysokoczułych moc ta jest bardzo mała – na poziomie ułamka miliwoltoampera [mVA]. W takich przypadkach należy stosować wyspecjalizowane materiały magnetyczne do budowy rdzeni przekładników sumujących, jak choćby Ultraperm 250, mający przenikalność maksymalną powyżej 400 000, a przenikalność względną początkową μ_4 przy 4 mA/cm powyżej 200 000 (rys. 2.6). Poniżej zestawiono własności materiałów magnetycznych stosowanych w wyłącznikach typu AC (tab. 2.3) i typu A (tab. 2.4).

Tab. 2.3 Własności materiałów magnetycznych stosowanych w wyłącznikach różnicowoprądowych o wyzwalaniu typu AC (tylko przy prądzie różnicowym przemiennym) [8, 38]

Znamionowy prąd różnicowy zadziałania wyłącznika $I_{\Delta n}$	Materiał	Gęstość	Indukcja nasyceniowa	Przenikalność μ_{15}
mA		g/cm ³	T	
10÷100	Ultraperm 200/250	8,7	0,74	200 000 ÷ 300 000
	Ultraperm 10	8,7	0,74	100 000 ÷ 200 000
10÷100 z kondensatorem szeregowym w obwodzie wtórnym	Ultraperm F60	8,7	0,74	125 000
	Vitroperm 800F	7,35	1,2	145 000
300÷500	Permax M	8,25	1,5	50 000
	Permenorm 5000 H2	8,25	1,55	12 000

Tab. 2.4 Własności materiałów magnetycznych stosowanych w wyłącznikach różnicowoprądowych o wyzwalaniu typu A (przy prądzie różnicowym przemiennym i pulsującym stałym) [7, 8, 38]

Znamionowy prąd różnicowy zadziałania wyłącznika $I_{\Delta n}$	Materiał	Gęstość	Indukcja nasyceniowa	Przenikalność μ_{15}
mA		g/cm ³	T	
10÷100	Vitroperm 800F	7,35	1,2	135 000÷160 000
	Ultraperm F80	8,70	0,74	110 000
300÷500	Vitroperm 500F	7,35	1,2	20 000÷80 000

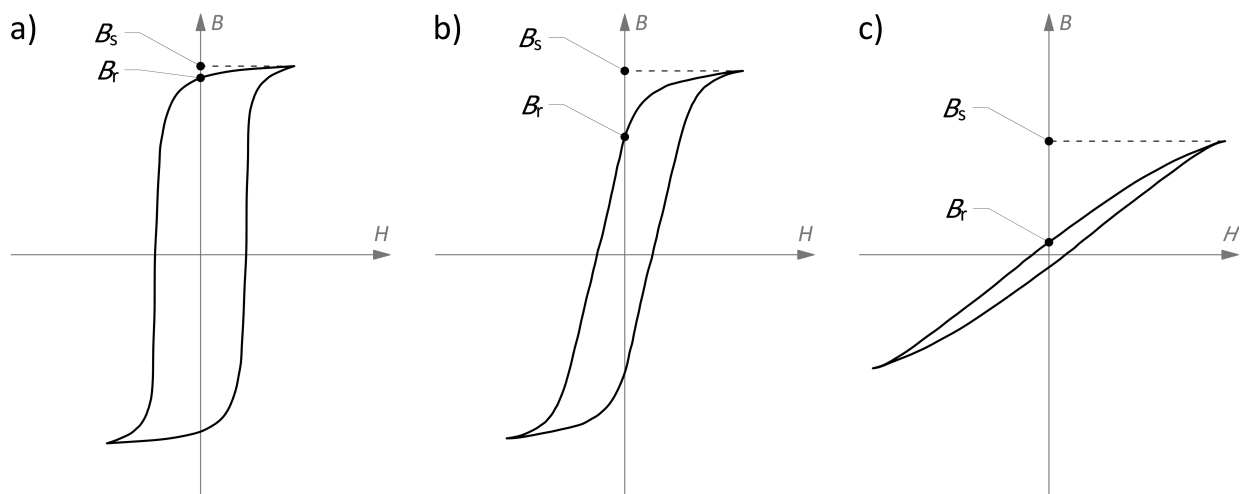
Kształt pętli histerezy to kolejna ważna własność ferromagnetyka zależna od sposobu wytwarzania i jego składu chemicznego. Wyróżnić można trzy rodzaje kształtów pętli histerezy

materiałów magnetycznych (rys. 2.7) używanych do budowy przekładników sumujących, gdzie decydujący jest stosunek indukcji szczątkowej B_r do indukcji nasyceniowej B_s (tab. 2.5):

- pętla histerezy prostokątna,
- pętla histerezy zaokrąglona,
- pętla histerezy płaska.

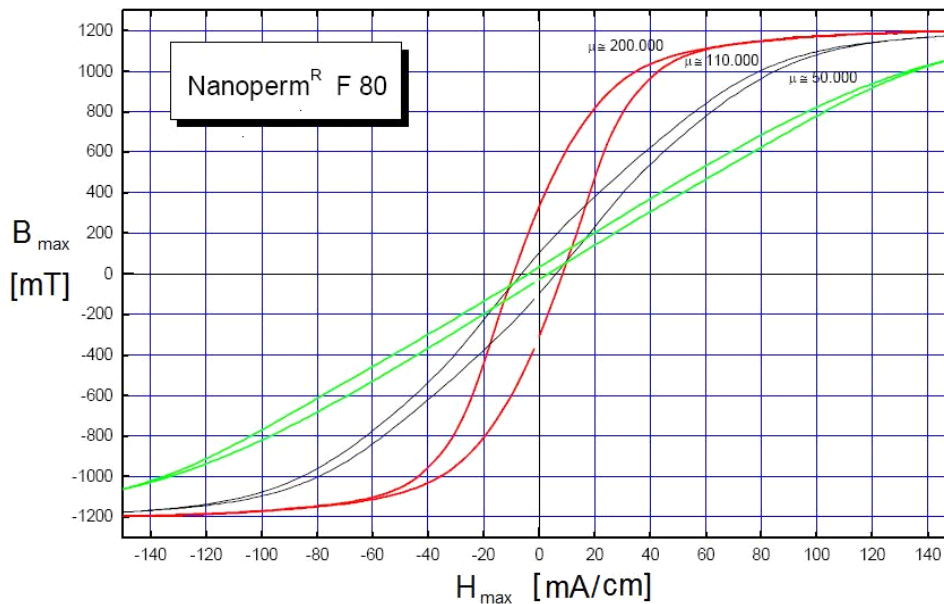
Tab. 2.5 Podział kształtu pętli histerezy ferromagnetyka na podstawie stosunku indukcji szczątkowej do indukcji nasyceniowej [7, 8]

Kształt pętli histerezy ferromagnetyka	Stosunek indukcji szczątkowej do indukcji nasyceniowej $\frac{B_r}{B_s}$
prostokątna	$\approx 0,9$
zaokrąglona	$\approx 0,6 \div 0,7$
płaska	$< 0,5$



Rys. 2.7 Umowne kształty pętli histerezy: a) pętla prostokątna; b) pętla zaokrąglona; c) pętla płaska; B_s – indukcja nasyceniowa, B_r – indukcja szczątkowa

W najpopularniejszych wyłącznikach różnicowoprądowych (typu AC) stosowane są materiały magnetyczne o prostokątnym lub zaokrąglonym kształcie pętli histerezy, ponieważ są one najtańsze w produkcji. Jednocześnie takie materiały nie nadają się do budowy przekładników sumujących wyłączników typu A ze względu na dużą indukcję szczątkową B_r . W przypadku wyłączników typu A niezbędne jest zastosowanie pętli histerezy o płaskim kształcie (rys. 2.7 c). Przykład płaskich pętli histerezy materiału Nanoperm F80 z katalogu producenta materiałów ferromagnetycznych MAGNETEC [39] przedstawiono na rys. 2.8.

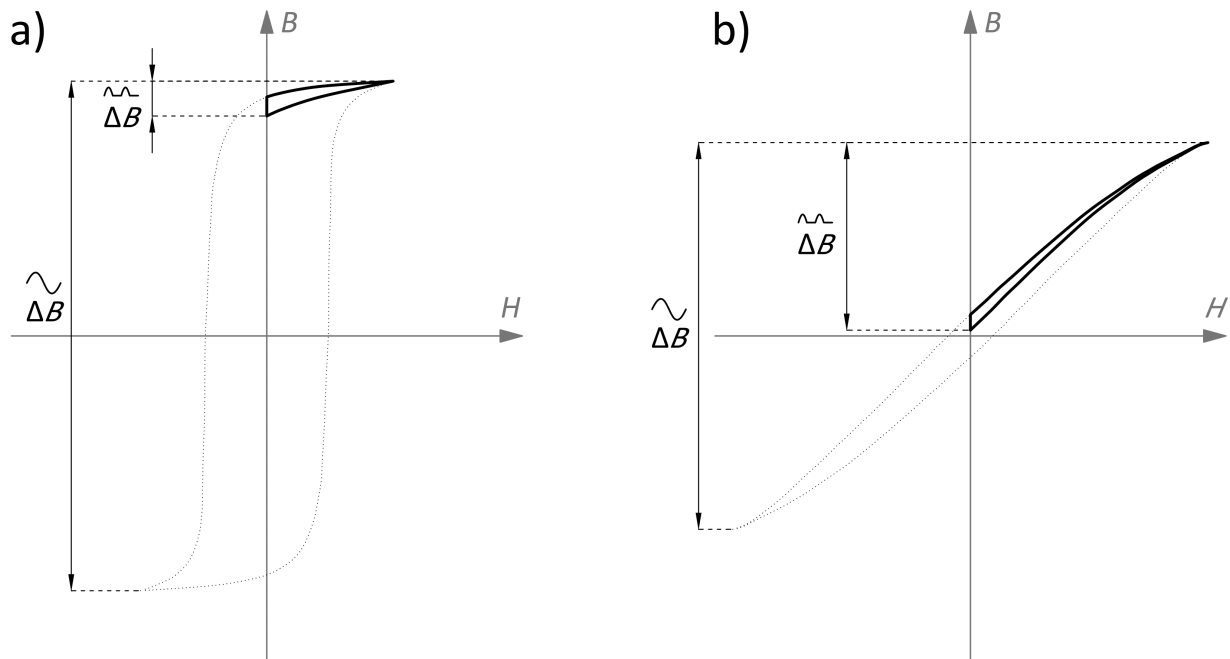


Rys. 2.8 Płaskie pętle histerezy materiału Nanoperm F80 przy 50 Hz [7, 8, 39]

Wartość sygnału różnicowego zaindukowanego po stronie wtórnej przekładnika sumującego zależy od charakterystyki przekładnika (pętli histerezy), a dokładniej od rozpiętości zmian indukcji w rdzeniu ferromagnetycznym jaką wywołuje prąd różnicowy o określonym przebiegu. W przypadku różnicowego prądu o charakterystyce przemiennej (np. sinusoida) zmiana indukcji w rdzeniu jest duża i wynosi około $2B_s$, niezależnie od kształtu pętli histerezy. Dla pętli histerezy prostokątnej (rys. 2.7 a) lub zaokrąglonej (rys. 2.7 b) wartość napięcia indukowanego po stronie wtórnej przekładnika przy prądzie przemiennym będzie większa niż w przypadku pętli histerezy o płaskim kształcie, jednak w każdym przypadku będzie na tyle duża by spowodować zadziałanie wyzwalacza wyłącznika różnicowoprądowego. Wynika z tego, że do budowy rdzeni przekładników wyłączników typu AC nadają się ferromagnetyki o każdym z wymienionych kształtów pętli histerezy. Inna sytuacja występuje w przypadku prądu różnicowego pulsującego stałego wyprostowanego jednopółkwo. Rozpiętość zmiany indukcji zawiera się pomiędzy B_s a B_r , co dla pętli histerezy o kształcie prostokątnym stanowi zaledwie 5% poprzedniej wartości ($2B_s$), o kształcie zaokrąglonym – kilkanaście procent i około 25% dla pętli histerezy o kształcie płaskim.

Na rysunku poniżej przedstawiono kształty typowych pętli histerezy: prostokątnej (rys. 2.9 a) i płaskiej (rys. 2.9 b). Linia cienką zaznaczono pierwotny kształt pętli histerezy ferromagnetyka wywołany przez przepływ prądu przemiennego przez uzwojenie pierwotne

przekładnika, natomiast linią pogrubioną zaznaczono pętlę histerezy przy magnesowaniu prądem pulsującym stałym. Zaznaczono również rozpiętość zmian indukcji ΔB w każdym z przypadków.



Rys. 2.9 Pętle histerezy przy magnesowaniu prądem przemiennym i prądem pulsującym stałym:
a) ferromagnetyk o pętli prostokątnej; b) ferromagnetyk o pętli płaskiej

Zaobserwować można, że ΔB przy prądzie przemiennym jest w przybliżeniu podobna w obu przypadkach natomiast przy prądzie stałym pulsującym występuje zdecydowana różnica rozpiętości zmian indukcji ΔB .



3. POMIARY IMPEDANCJI PĘTLI ZWARCIOWEJ

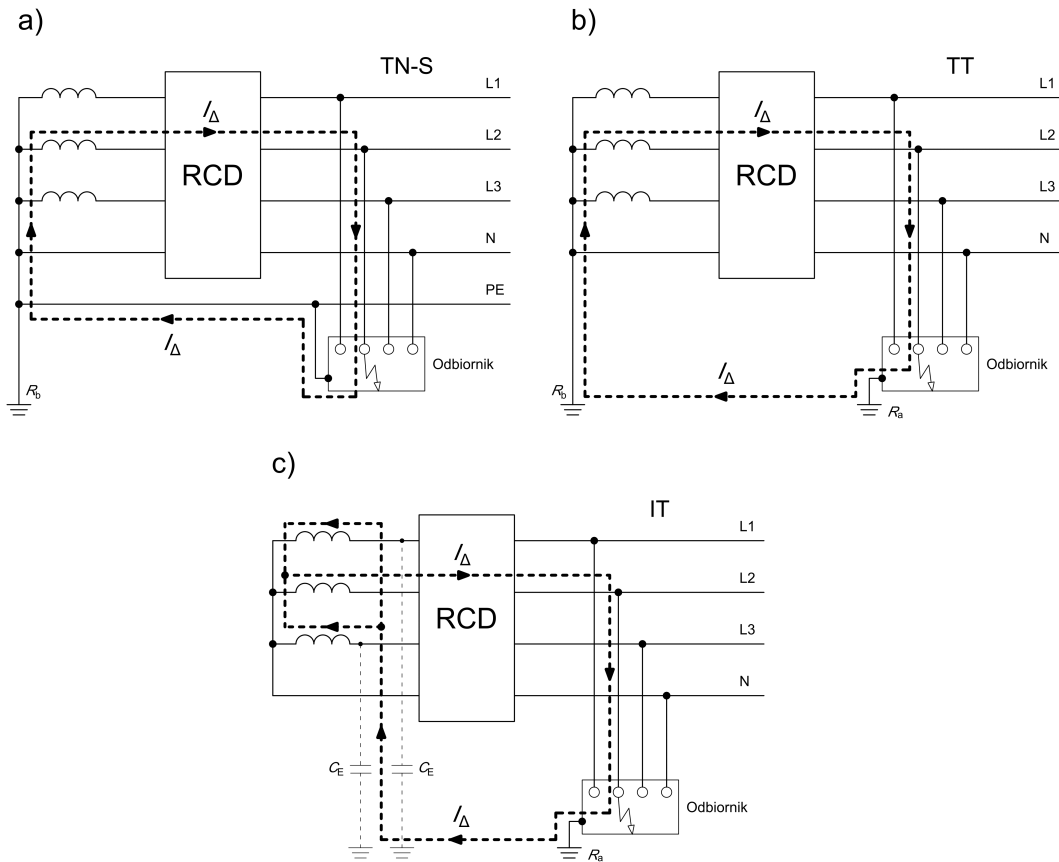
3.1. WPROWADZENIE

Parametry instalacji elektrycznych, takie jak rezystancja i reaktancja obwodu elektrycznego, są podstawowymi wartościami pozwalającymi obliczyć przewidywany prąd zwarciovy, spadki napięcia w obwodzie, jak również ocenić skuteczność działania zabezpieczeń zwarciovych [40, 41]. Wartości te mogą być obliczane matematycznie na etapie sporządzania projektu budowlanego, wykonawczego lub w dokumentacji technicznej instalacji elektrycznej obiektu. Obliczenia są jednak przybliżoną formą określania parametrów zwarciovych sieci i zakładają szereg uproszczeń. W obliczeniach nie przewiduje się awarii, uszkodzeń, błędów wykonawczych czy starzenia się urządzeń, aparatów oraz przewodów i kabli. Dla prawidłowego i rzeczywistego sprawdzenia parametrów obwodów takich jak rezystancja i reaktancja zwarciova (impedancja zwarciova) konieczne jest wykonanie pomiarów w danym punkcie instalacji i/lub sieci [4, 5].

3.2. ZWARCIE W OBWODZIE

Podczas prawidłowej eksploatacji w obwodach odbiorczych instalacji elektrycznej płyną prądy robocze. Ich wartość zależy od sumarycznej mocy elektrycznej przyłączonych odbiorników oraz ich charakteru (rezystancyjny, indukcyjny, pojemnościowy lub mieszany). Wpływ na prąd roboczy ma również napięcie sieci zasilającej.

Za zwarcie, czyli stan nienormalnej pracy, uważa się połączenie minimum 2 punktów systemu w sposób nieprzewidziany podczas normalnej pracy [42]. W przypadku wystąpienia zwarcia w obwodzie, przez poszczególne elementy systemu elektroenergetycznego płynie prąd zwarciovy [43, 44]. Jego wartość może być wielokrotnie większa od prądów roboczych w przypadku zwarć wieloprądowych (np. zwarcia międzyfazowe) lub porównywalna z prądami roboczymi, a nawet od nich mniejsza w przypadku zwarć małoprądowych np. przy zwarciach doziemnych w sieciach o izolowanym punkcie neutralnym, przy zwarciach za zasilaczami UPS lub niewielkimi agregatami prądotwórczymi [45]. Na rys. 3.1 przedstawiono różne układy sieci i zaznaczono pogrubioną linią przerywaną drogę przepływu prądu zwarciowego będącego jednocześnie prądem różnicowym dla wyłącznika różnicowoprądowego.



Rys. 3.1 Schemat różnych typów sieci z zaznaczoną drogą prądu zwarcia doziemnego będącego jednocześnie prądem różnicowym dla wyłącznika różnicowoprądowego: a) sieć TN-S, b) sieć TT, c) sieć IT

Wartość prądu zwarciego zależy jest od rodzaju zwarcia, typu sieci, napięcia zasilającego oraz parametrów zwarciovych takich jak rezystancja i reaktancja obwodu zwarciovego [46]. Wartość prądu zwarciovego można obliczyć na podstawie wzoru (3.1). Szczegółowy sposób obliczania prądów zwarciovych opisano w normach [47–49].

$$I_k'' = \frac{c * U_n}{\sqrt{3} * \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} = \frac{c * U_n}{\sqrt{3} * |Z_k|} \quad (3.1)$$

gdzie:

I_k'' – prąd zwarciovowy początkowy,

c – współczynnik napięciowy,

U_n – napięcie sieci,

R_k – rezystancja zastępcza obwodu zwarciovego,

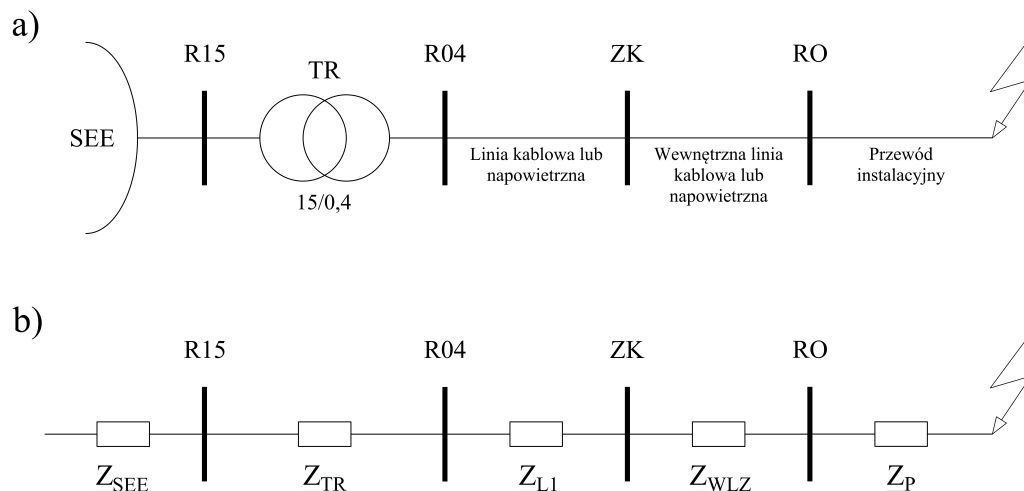
X_k – reaktancja zastępcza obwodu zwarciovego,

Z_k – impedancja zastępcza obwodu zwarciovego.

3.3. ELEMENTY SKŁADOWE OBWODU ZWARCIOWEGO

Zwarcie w obwodzie powoduje przepływ prądu zwarciovego przez poszczególne jego elementy. Liczba elementów składowych obwodu zwarciovego zależy od stopnia skomplikowania i konfiguracji sieci oraz miejsca zwarcia. Sprawdzając warunek ochrony przed porażeniem przez samoczynne wyłączanie zasilania rozpatruje się zwarcie na końcu obwodu, gdzie impedancja pętli zwarcioviej będzie miała największą wartość, a prąd zwarciovowy będzie najmniejszy. Dla prawidłowego określenia wartości impedancji pętli zwarcioviej należy określić impedancje poszczególnych elementów tej pętli (rys. 3.2). Do głównych elementów można zaliczyć:

- impedancję systemu elektroenergetycznego;
- impedancję transformatora;
- impedancję linii kablowych i napowietrznych;
- impedancję kabli i przewodów instalacyjnych w budynku.



Rys. 3.2 Przykładowy schemat sieci: a) schemat ideowy, b) schemat zastępczy
SEE – system elektroenergetyczny, R15 – rozdzielnica 15 kV, R04 – rozdzielnica 0,4 kV, ZK – złącze kablowe/napowietrzne, RO – rozdzielnica instalacji odbiorczych

Impedancje zastępcze poszczególnych elementów składowych obwodu zwarciovego przedstawiono na rys. 3.2. W przypadku zwarcia na końcu obwodu odbiorczego, w skład całkowitej impedancji pętli zwarcioviej wchodzi wszystkie elementy składowe, zgodnie ze wzorem (3.2). Impedancje zastępcze przewodów i kabli uwzględniają przepływ prądu przez przewód fazowy i przewód ochronny PE w sieci TN-S lub ochronno-neutralny PEN w sieci TN-C.

$$\underline{Z} = \underline{Z}_{SEE} + \underline{Z}_{TR} + \underline{Z}_L + \underline{Z}_{WLZ} + \underline{Z}_P \quad (3.2)$$



– **system elektroenergetyczny:**

$$Z_{SEE} = \frac{c_{max} * U_n^2}{S_{SEE}''} \quad (3.3)$$

$$X_{SEE} = 0,995 * Z_{SEE} \quad (3.4)$$

$$R_{SEE} = 0,1 * X_{SEE} \quad (3.5)$$

– **transformator:**

$$u_R = \frac{\Delta P_{obc_zn}}{S_{TR}} \quad (3.6)$$

$$u_X = \sqrt{u_k^2 - u_R^2} \quad (3.7)$$

$$X_{TR} = u_X * \frac{U_{TR}^2}{S_{TR}} \quad (3.8)$$

$$R_{TR} = u_R * \frac{U_{TR}^2}{S_{TR}} \quad (3.9)$$

$$Z_{TR} = \sqrt{X_{TR}^2 + R_{TR}^2} \quad (3.10)$$

– **Przewód, linia kablowa i linia napowietrzna**

$$R_L = \frac{L}{\gamma * S} \quad (3.11)$$

$$X_L = x' * L \quad (3.12)$$

gdzie:

x' – reaktancja jednostkowa:

– linie napowietrzne

- $U < 1$ kV: $x' = 0,3$ [Ω /km] – wartość przybliżona (wyjątek stanowią linie napowietrzne izolowane AsXs lub AsXS_n)

- $U \geq 1$ kV: $x' = 0,4$ [Ω /km] – wartość przybliżona

– linie kablowe i przewody

- $U < 1$ kV: $x' = 0,08$ [Ω /km] – wartość przybliżona

- $U \geq 1$ kV: $x' = 0,1$ [Ω /km] – wartość przybliżona



3.4. IMPEDANCJA A REZYSTANCJA PĘTLI ZWARCIOWEJ

Impedancja pętli zwarciowej (Z) stanowi sumę geometryczną rezystancji (R) i reaktancji (X) badanego obwodu. Składowa rezystancyjna impedancji pętli zwarciowej wynika z oporu elektrycznego przewodników, jakimi są żyły przewodów i kabli, uzwojenia transformatora oraz rezystancje styków połączeń śrubowych, czy rezystancje zestyków aparatów elektrycznych [40]. Rezystancja zwarciowa (obwodu zwarciowego) może znacznie różnić się od rezystancji występującej w obwodzie podczas normalnej pracy. Przykładem są niepewne połączenia w obwodzie, np. niedokręcone śruby zacisków czy zużyte styki aparatów elektrycznych. Podczas przepływu prądu zwarciowego rzędu setek, a nawet tysięcy amperów, połączenia takie gwałtownie się nagrzewają zwiększając swoją rezystancję. Podczas pomiarów wieloprądowych impedancji pętli zwarciowej (IPZ) można dzięki temu wykryć niepewne połączenia, czego nie da się uzyskać za pomocą metody pomiaru prądem poniżej 15 mA opisanej w rozdziale 5.3. Reaktancja obwodu zwarciowego wynika głównie z indukcyjności uzwojeń transformatora, przewodów i kabli oraz pojemności kabli elektroenergetycznych i pojemności doziemnych linii napowietrznych.

Suma geometryczna rezystancji i reaktancji zwarciowej $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ równa jest impedancji obwodu zwarciowej. Stosując uproszczenie polegające na pominięciu reaktancji zwarciowej, przy założeniu, że impedancja równa jest rezystancji zwarciowej $Z \approx R$ wynik obarczony jest pewnym błędem. W większości przypadków takie uproszczenie nieznacznie wpływa na błąd pomiaru, ponieważ reaktancja obwodu zwarciowego w rzeczywistości może być pomijalnie mała.

Dla zobrazowania stosunku rezystancji do reaktancji zwarciowej w różnych typach sieci i instalacji wykonano szereg symulacji i obliczeń. Założono, że miejsce zwarcia występuje na końcu obwodu odbiorczego. Przykładowa sieć przedstawia typowy układ zasilania obiektu z instalacją odbiorczą, w której zainstalowano wyłączniki różnicowoprądowe. Sieć zawiera transformator 15 kV/0,4 kV, linię napowietrzną, linię kablową oraz kabel bądź przewód instalacyjny do odbiornika.



– **System elektroenergetyczny:**

Stosunek rezystancji do reaktancji systemu elektroenergetycznego jest w przybliżeniu stały niezależnie od mocy zwarciowej systemu elektroenergetycznego na szynach 15 kV, zgodnie ze wzorami (3.4) i (3.5), stąd po przekształceniu stosunek R/X dla systemu elektroenergetycznego wynosi:

$$\begin{aligned}\left(\frac{R}{X}\right)_{SEE} &= \frac{0,1 * X_{SEE}}{0,995 * Z_{SEE}} \\ \left(\frac{R}{X}\right)_{SEE} &= \frac{0,1 * (0,995 * Z_{SEE})}{0,995 * Z_{SEE}} \\ \left(\frac{R}{X}\right)_{SEE} &= \frac{0,1 * (0,995 * Z_{SEE})}{0,995 * Z_{SEE}} \\ \left(\frac{R}{X}\right)_{SEE} &= \frac{1}{10}\end{aligned}\tag{3.13}$$

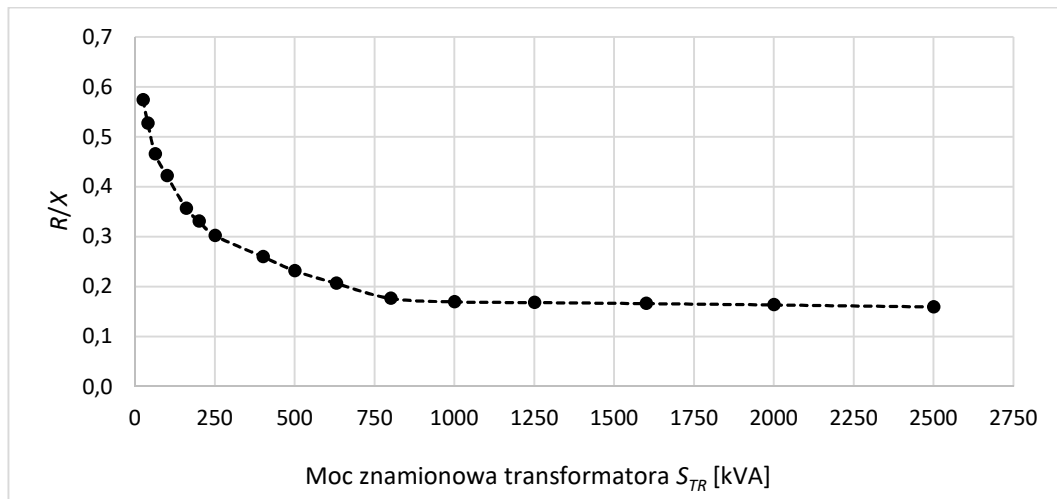
– **Transformator:**

W przypadku transformatorów stosunek R/X nie jest stały i zależy od mocy transformatora S_{TR} , napięcia zwarcia u_k i znamionowych obciążeniowych strat transformatora $\Delta P_{obc.zn}$. Na podstawie wzorów od (3.6) do (3.9) dokonano przekształceń otrzymując następującą zależność:

$$\begin{aligned}\left(\frac{R}{X}\right)_{TR} &= \frac{u_R * \frac{U_{TR}^2}{S_{TR}}}{u_X * \frac{U_{TR}^2}{S_{TR}}} \\ \left(\frac{R}{X}\right)_{TR} &= \frac{\frac{\Delta P_{obc.zn}}{S_{TR}}}{\sqrt{u_k^2 - u_R^2}} \\ \left(\frac{R}{X}\right)_{TR} &= \frac{\Delta P_{obc.zn}}{S_{TR} * \sqrt{u_k^2 - \left(\frac{\Delta P_{obc.zn}}{S_{TR}}\right)^2}}\end{aligned}\tag{3.14}$$

Na podstawie przykładowych danych katalogowych transformatorów elektroenergetycznych [50, 51], poniżej przedstawiono charakterystykę stosunku rezystancji do reaktancji w funkcji mocy znamionowej transformatora (rys. 3.3). Dla transformatorów o mocy do

800 kVA stosunek R/X jest silnie malejący wraz ze wzrostem mocy znamionowej transformatora, natomiast dla transformatorów o mocy znamionowej powyżej 800 kVA wartość R/X jest w przybliżeniu stała i wynosi około 0,17.



Rys. 3.3 Charakterystyka parametru R/X transformatorów elektroenergetycznych w funkcji ich mocy znamionowej

Na rys. 3.3 punktami zaznaczono wartości parametru R/X dla typowych mocy znamionowych olejowych transformatorów elektroenergetycznych (z typoszeregu [50, 51]). Linia przerywana łącząca sąsiednie punkty wskazuje trend, a nie rzeczywistą wartość liczbową.

– Przewód, linia kablowa i linia napowietrzna

Rezystancja przewodów, linii kablowych i napowietrznych zależy od długości przewodnika L , konduktywności przewodnika γ i jego przekroju poprzecznego S . Reaktancja jednostkowa przewodów, linii kablowych i napowietrznych do 1 kV jest w przybliżeniu stała i niezależna od przekroju poprzecznego przewodnika. Wyjątek stanowią izolowane linie napowietrzne $AsXs$ lub $AsXSn$, których reaktancja jednostkowa zależy od przekroju poprzecznego przewodnika, co zaprezentowano na (rys. 3.5). Wpływ na to ma wzajemna odległość przewodników, grubość izolacji oraz budowa samej linii. Poniżej, na podstawie wzorów (3.11) i (3.12), przedstawiono obliczenia R/X dla linii kablowych i napowietrznych:

$$\left(\frac{R}{X}\right)_L = \frac{L * 1000}{\gamma * S * x'}$$

$$\left(\frac{R}{X}\right)_L = \frac{1000}{\gamma * S * x'}$$
(3.15)

gdzie:

L – długość przewodnika w [km]

γ – konduktywność przewodnika w [$\text{m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$]

S – przekrój poprzeczny przewodnika [mm^2]

x' – reaktancja jednostkowa:

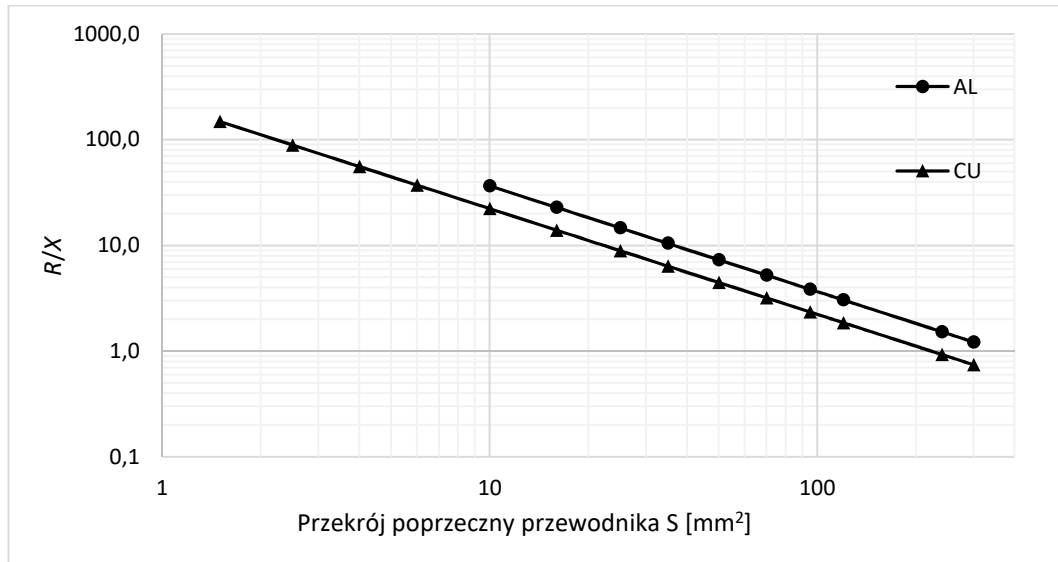
- linie napowietrzne
 - $U < 1 \text{ kV}$: $x' = 0,3 \text{ } [\Omega/\text{km}]$ – wartość przybliżona (wyjątek stanowią linie napowietrzne izolowane AsXs lub AsXSn)
 - $U \geq 1 \text{ kV}$: $x' = 0,4 \text{ } [\Omega/\text{km}]$ – wartość przybliżona
- linie kablowe i przewody instalacyjne
 - $U < 1 \text{ kV}$: $x' = 0,08 \text{ } [\Omega/\text{km}]$ – wartość przybliżona
 - $U \geq 1 \text{ kV}$: $x' = 0,1 \text{ } [\Omega/\text{km}]$ – wartość przybliżona

Tab. 3.1 Wartości rezystancji R i reaktancji X oraz stosunku R/X dla przewodów instalacyjnych, przewodów napowietrznych i kabli elektroenergetycznych przy różnych przekrojach poprzecznych żyły roboczej (temperatura żył 20°C)

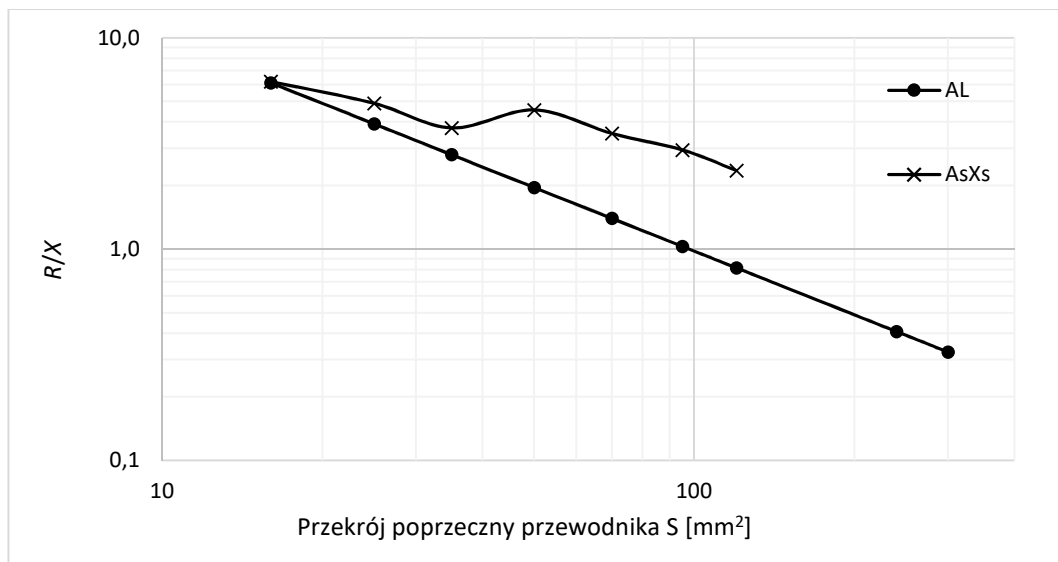
S	Linie kablowe i przewody instalacyjne					Napowietrzne izolowane			Napowietrzne nieizolowane		
	R_{AL}	R_{CU}	X_L	R_{AL}/X_L	R_{CU}/X_L	$R_{AsXs'}$	$X_{AsXs'}$	R_{AsXs}/X_{AsXs}	R_{AL}	X_L	R_{AL}/X_L
[mm^2]	[Ω/km]	[Ω/km]	[Ω/km]	[-]	[-]	[Ω/km]	[Ω/km]	[-]	[Ω/km]	[Ω/km]	[-]
1,5	19,608	11,905	0,08	245,098	148,810						
2,5	11,765	7,143	0,08	147,059	89,286						
4	7,353	4,464	0,08	91,912	55,804						
6	4,902	2,976	0,08	61,275	37,202						
10	2,941	1,786	0,08	36,765	22,321						
16	1,838	1,116	0,08	22,978	13,951	1,838	0,296	6,210	1,838	0,3	6,127
25	1,176	0,714	0,08	14,706	8,929	1,176	0,240	4,902	1,176	0,3	3,922
35	0,840	0,510	0,08	10,504	6,378	0,840	0,224	3,752	0,840	0,3	2,801
50	0,588	0,357	0,08	7,353	4,464	0,588	0,129	4,560	0,588	0,3	1,961
70	0,420	0,255	0,08	5,252	3,189	0,420	0,119	3,531	0,420	0,3	1,401
95	0,310	0,188	0,08	3,870	2,350	0,310	0,105	2,949	0,310	0,3	1,032
120	0,245	0,149	0,08	3,064	1,860	0,245	0,104	2,357	0,245	0,3	0,817
240	0,123	0,074	0,08	1,532	0,930				0,123	0,3	0,408
300	0,098	0,060	0,08	1,225	0,744				0,098	0,3	0,327



W tabeli zestawiono wyniki stosunku R/X dla przekrojów od $1,5 \text{ mm}^2$ również dla przewodów i kabli o żyłach aluminiowych, dla porównania, choć w praktyce używane są przekroje powyżej 10 mm^2 .



Rys. 3.4 Charakterystyka parametru R/X przewodów i linii kablowych o żyłach aluminiowych i miedzianych w funkcji przekroju poprzecznego żyły roboczej



Rys. 3.5 Charakterystyka parametru R/X linii napowietrznych izolowanych (AsXs) i nieizolowanych (Al) o żyłach aluminiowych w funkcji przekroju poprzecznego przewodnika

W przypadku przewodów instalacyjnych, linii kablowych i napowietrznych charakterystyka parametru R/X jest silnie nieliniowa (obie skale na rys. 3.4 i rys. 3.5 są logarytmiczne). Dla małych przekrojów przewodów i kabli miedzianych ($1,5 \text{ mm}^2$) stosunek R/X jest duży i wynosi nawet 148. Wraz ze wzrostem przekroju przewodnika stosunek R/X gwałtownie



spada i tak dla przekroju 10 mm^2 przewodu lub kabla miedzianego R/X równa się 22, a dla przekroju 25 mm^2 już tylko 9. Zupełnie inaczej przedstawia się charakterystyka R/X dla przewodów napowietrznych izolowanych AsXs lub AsXSn bardzo często wykorzystywanych w budowie elektroenergetycznych linii rozdzielczych niskiego napięcia (nn 0,4 kV). Charakterystyka R/X jest tylko częściowo zależna od przekroju przewodnika (rys. 3.5), wpływ na to ma budowa przewodu (zmiana wzajemnej odległości żył roboczych) w przypadku różnych przekrojów przewodnika, co bezpośrednio przekłada się na reaktancję przewodu napowietrznego. Dla przekroju 50 mm^2 stosunek R/X jest większy niż dla przekroju 35 mm^2 , inaczej niż w przypadku przewodów nieizolowanych.

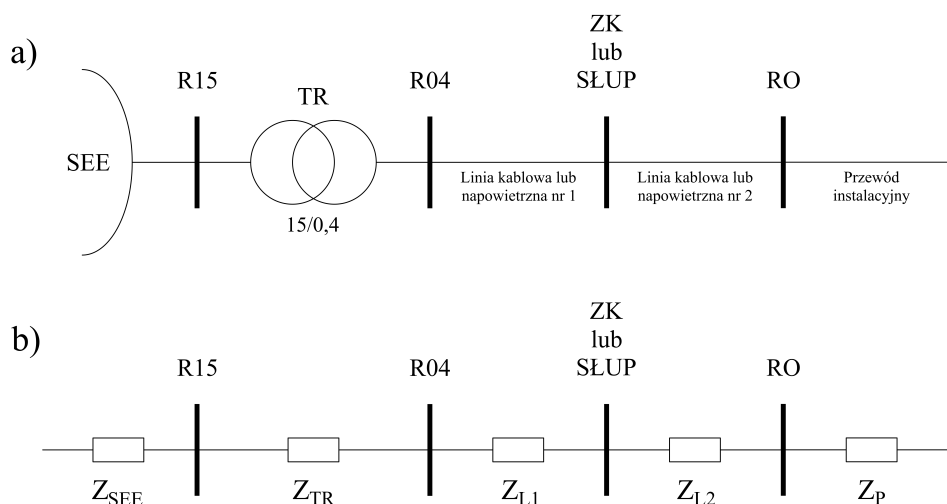
3.5. SYMULACJE IMPEDANCJI PĘTLI ZWARCIOWEJ DLA RÓŻNYCH TYPÓW SIECI

Impedancja pętli zwarciowej w obwodzie, jak i jej składowe czyli rezystancja i reaktancja, są zależne od budowy sieci rozdzielczej i instalacji odbiorczej. Jak wynika z obliczeń przedstawionych w rozdziale 3.4, rezystancja i reaktancja zależne są od parametrów transformatora, typu oraz długości sieci rozdzielczej i instalacji odbiorczej. W celu przedstawienia różnic pomiędzy różnymi typami sieci wykonano szereg symulacji i obliczeń. Symulacje przeprowadzono dla 4 przykładowych typów sieci zasilających wraz z instalacją odbiorczą:

- budynek jednorodzinny (teren miejski),
- budynek wielorodzinny (teren miejski),
- budynek na terenach wiejskich,
- budynek przemysłowy.

We wszystkich przypadkach zasymulowana została sieć począwszy od systemu elektroenergetycznego (o napięciu 15 kV), a kończąc na obwodzie odbiorczym. Przykładowa symulowana sieć z obwodem odbiorczym składa się z systemu elektroenergetycznego, transformatora 15 kV/0,4 kV, linii kablowej lub linii napowietrznej izolowanej i przewodu obwodu odbiorczego (rys. 3.6). Dla poszczególnych przykładów symulowanych sieci dobrano parametry charakterystyczne, takie jak moc zwarciową systemu elektroenergetycznego, moc transformatora, typy i przekroje linii napowietrznych i kablowych, których zestawienie zawarto w tab. 3.2. Wartości parametrów zostały dobrane na podstawie doświadczeń autora rozprawy przy projektowaniu sieci elektroenergetycznych. Wyniki obliczeń rezystancji R i reaktancji X dla

poszczególnych symulowanych elementów sieci wchodzących w skład obwodu zwarciego zestawiono w tab. 3.3.



Rys. 3.6 Schemat symulowanej sieci: a) schemat ideowy, b) schemat zastępczy
SEE – system elektroenergetyczny, R15 – rozdzielnica 15 kV, R04 – rozdzielnica 0,4 kV,
ZK lub SŁUP – złącze kablowe lub słup rozgałęźny, RO – rozdzielnica instalacji odbiorczych

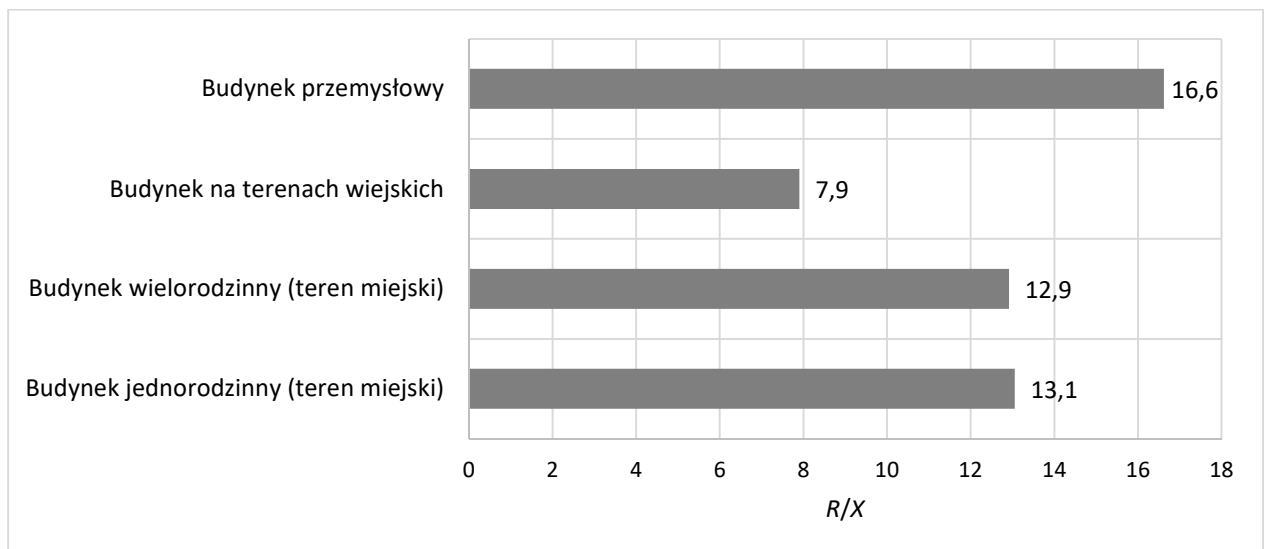
Tab. 3.2 Parametry charakterystyczne symulowanych typów sieci
(kabl. – linia kablowa, napo. – linia napowietrzna izolowana)

Typ sieci	System elektroenergetyczny	Transformator	Linia 1 (aluminium)			Linia 2 (aluminium)			Przewód (miedź)	
	Moc zwarcioowa	Moc transformatora	Typ linii 1	Przekrój linii	Długość linii	Typ linii 2	Przekrój linii	Długość linii	Przekrój linii	Długość przewodu
[-]	[MVA]	[kVA]	[-]	[mm ²]	[m]	[-]	[mm ²]	[m]	[mm ²]	[m]
Budynek jednorodzinny (teren miejski)	250	400	kabl.	120	200	kabl.	10	90	2,5	40
Budynek wielorodzinny (teren miejski)	250	630	kabl.	240	80	kabl.	120	50	2,5	50
Budynek na terenach wiejskich	250	250	napo.	70	200	napo.	16	100	2,5	60
Budynek przemysłowy	250	1000	kabl.	240	60	kabl.	120	60	4	100

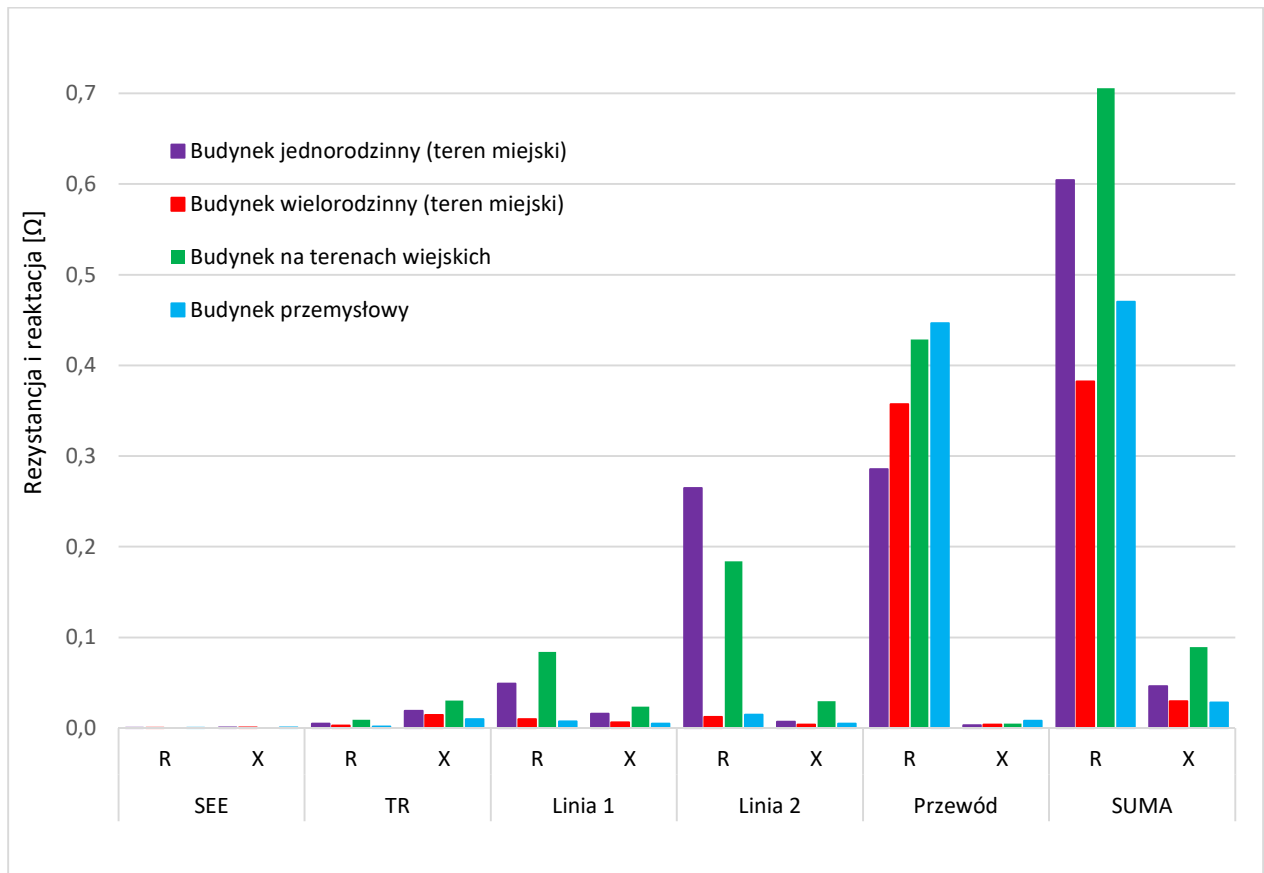
Tab. 3.3 Wyniki obliczeń rezystancji R i reaktancji X dla poszczególnych elementów symulowanych sieci

Typ sieci	System elektroenergetyczny		Transformator		Linia 1 (aluminium)		Linia 2 (aluminium)		Przewód (miedź)	
	R_{kQ}	X_{kQ}	R_T	X_T	R_{lin1}	X_{lin1}	R_{lin2}	X_{lin2}	R_{prz}	X_{prz}
[-]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]
Budynek jednorodzinny (teren miejski)	0,0001	0,0007	0,005	0,019	0,049	0,016	0,265	0,007	0,286	0,003
Budynek wielorodzinny (teren miejski)	0,0001	0,0007	0,003	0,015	0,010	0,006	0,012	0,004	0,357	0,004
Budynek na terenach wiejskich	0,0001	0,0007	0,009	0,030	0,084	0,024	0,184	0,030	0,429	0,005
Budynek przemysłowy	0,0001	0,0007	0,002	0,010	0,007	0,005	0,015	0,005	0,446	0,008

Porównując stosunek R/X dla poszczególnych symulowanych typów sieci (rys. 3.7), można zauważyć, że najmniejszy stosunek R/X występuje w przypadku budynku na terenach wiejskich, natomiast największy stosunek R/X występuje w przypadku budynku przemysłowego. W każdym z przypadków zaobserwować można, że suma składowej rezystancyjnej jest zdecydowanie większa od sumy składowej reaktancyjnej.



Rys. 3.7 Wykres wartości stosunku R/X dla różnych typów symulowanych sieci



Rys. 3.8 Wykres wartości rezystancji i reaktancji poszczególnych elementów sieci dla różnych typów symulowanych sieci

Wniosek nasuwający się z analizy pozwala postawić tezę, że we wszystkich rozpatrywanych przypadkach symulacyjnych reaktancja obwodu zwarciovego widziana z końca obwodu odbiorczego jest na tyle mała, że można ją pominąć, a błąd względny wynikający z tego uproszczenia jest mniejszy niż 1%.

Obliczenie błędu bezwzględnego przedstawiono we wzorze (3.16):

$$\delta = \frac{|x - x_0|}{x} \quad (3.16)$$

gdzie:

δ – błąd względny,

x – wartość dokładna ($Z = \sqrt{R^2 + X^2}$),

x_0 – wartość przybliżona (wynikająca z uproszczenia $Z = R$).

Wyliczenie błędu względnego dla założeń, że wartość dokładna x to obliczenie impedancji z uwzględnieniem rezystancji i reaktancji ($Z = \sqrt{R^2 + X^2}$), natomiast wartość przybliżona x_0 to obliczenie impedancji z założeniem uproszczenia, że impedancja jest równa rezystancji obwodu

$Z = R$. Dodatkowo wprowadzono zmienną o nazwie $\left(\frac{R}{X}\right) = \frac{R}{X}$, która jest ilorazem rezystancji R i reaktancji X całkowitego obwodu zwarciovego dla rozwiązania równania (3.19). W obliczeniach błędu względnego (3.17) zakłada się, że R oraz X należą do zbioru liczb naturalnych oraz reaktancja jest większa od 0:

$$\begin{cases} R, X \in N \\ X \geq 0 \end{cases} \quad (3.17)$$

$$\sqrt{R^2 + X^2} - R \geq 0$$

stąd:

$$(3.18)$$

$$\left| \sqrt{R^2 + X^2} - R \right| = \sqrt{R^2 + X^2} - R$$

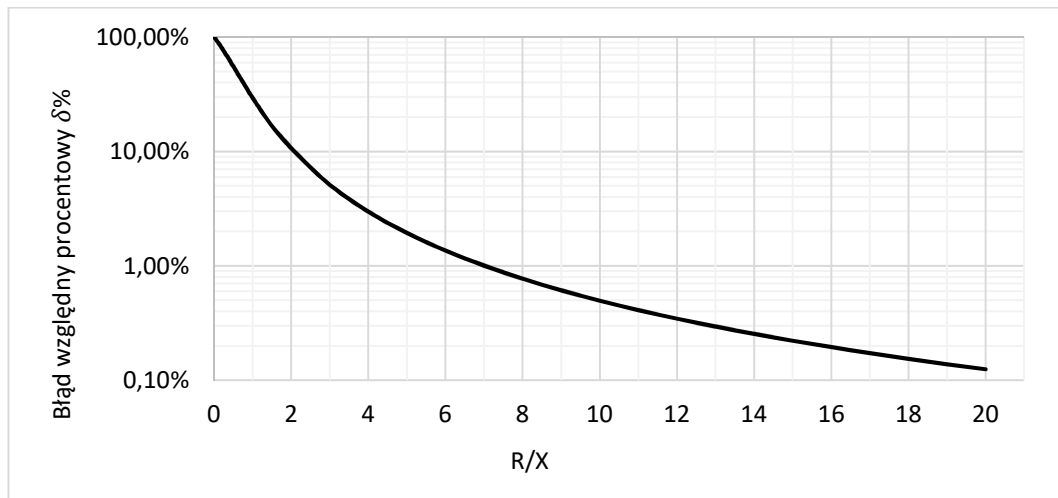
$$\begin{cases} \delta = \frac{\sqrt{R^2 + X^2} - R}{\sqrt{R^2 + X^2}} \\ X = \frac{R}{\left(\frac{R}{X}\right)} \end{cases}$$

$$\delta = 1 - \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}}$$

$$\delta = 1 - \frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{R}{\left(\frac{R}{X}\right)}\right)^2}} \quad (3.19)$$

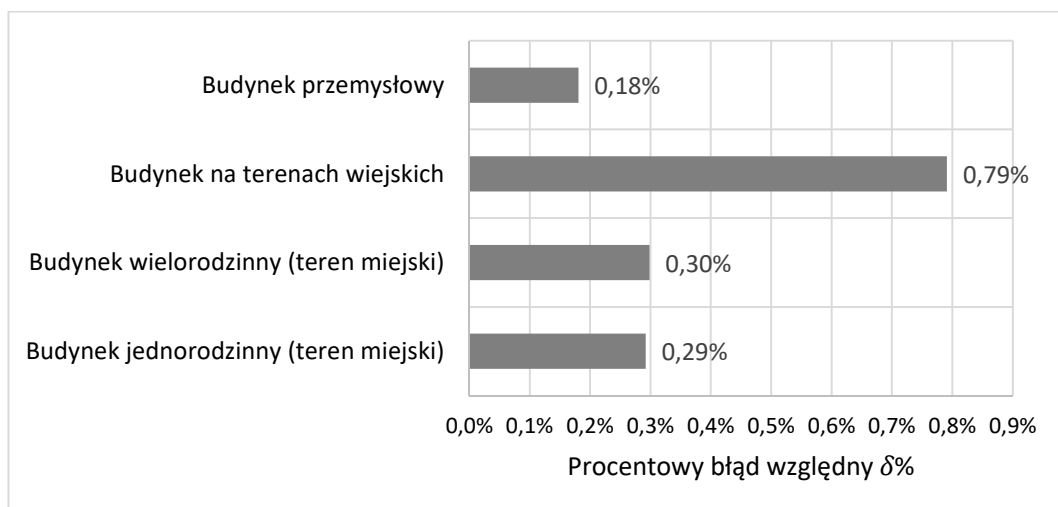
$$\delta = 1 - \frac{\left(\frac{R}{X}\right)}{\sqrt{\left(\frac{R}{X}\right)^2 + 1}}$$

Na podstawie równania (3.19) obliczono błąd względny procentowy dla różnych wartości stosunku R/X w zakresie przedziału $(0; 20>$, wynik przedstawiono na rys. 3.9 (wartości na osi procentowego błędu względnego $\delta\%$ w skali logarytmicznej).



Rys. 3.9 Charakterystyka procentowego błędu względnego $\delta\%$ w funkcji stosunku R/X

Jak wynika z charakterystyki przedstawionej na rys. 3.9 na podstawie wzoru (3.19), błąd względny jest tym mniejszy im większy stosunek R/X , choć zależność ta jest silnie nieliniowa. Już dla wartości $R/X \geq 7$ procentowy błąd względny jest mniejszy od 1%. Przedstawione wzory udowadniają tezę, że dla symulowanych przypadków różnych typów sieci błąd względny wynikający z uproszczenia związanego z pominięciem reaktancji obwodu zwarciovego przy określaniu parametrów zwarciovych jest mniejszy niż 1%. Ze wszystkich symulowanych przypadków typów sieci błąd względny wyniósł maksymalnie 0,79%. Zatem przystępując do pomiaru impedancji pętli zwarciovwej na końcu obwodów odbiorczych oraz opracowując metody pomiarowe z myślą o obwodach odbiorczych z wyłącznikami różnicowoprądowymi, na ogół wystarczają przyrządy pomiarowe mierzące rezystancję pętli zwarciovwej.



Rys. 3.10 Charakterystyka procentowego błędu względnego $\delta\%$ w symulowanych typach sieci

3.6. SAMOCZYNNNE WYŁĄCZANIE ZASILANIA

W przypadku wystąpienia zwarcia w obwodzie elektrycznym o układzie sieci TN należy zapewnić ochronę przez samoczynne wyłączenie zasilania z wykorzystaniem zabezpieczeń nadprądowych i/lub różnicowoprądowych. Zwarcie w obwodzie może spowodować pojawienie się niebezpiecznego napięcia na częściach przewodzących dostępnych urządzeń, co stanowi zagrożenie zdrowia i życia ludzkiego. Należy tak projektować instalacje, by napięcia dotykowe podczas uszkodzenia nie przekraczały 50 V dla napięcia przemiennego i 120 V dla napięcia stałego w normalnych warunkach środowiskowych lub nastąpiło wyłączenie zasilania w wymaganym przez normę czasie. Wartości napięcia dotykowego dopuszczalnego długotrwale są 2-krotnie mniejsze w przypadku występowania szczególnych warunków środowiskowych, zwiększających ryzyko porażenia prądem elektrycznym, np. duża wilgotność pomieszczenia, i wynoszą odpowiednio 25 V dla napięcia przemiennego i 60 V dla napięcia stałego. W tab. 3.4 podano największe dopuszczalne czasy wyłączenia zasilania w obwodach odbiorczych [52]:

- gniazd wtyczkowych o prądzie znamionowym nieprzekraczającym 63 A,
- odbiorników zainstalowanych na stałe o prądzie znamionowym nieprzekraczającym 32 A.

Tab. 3.4 Największy dopuszczalny czas wyłączenia zasilania [52]

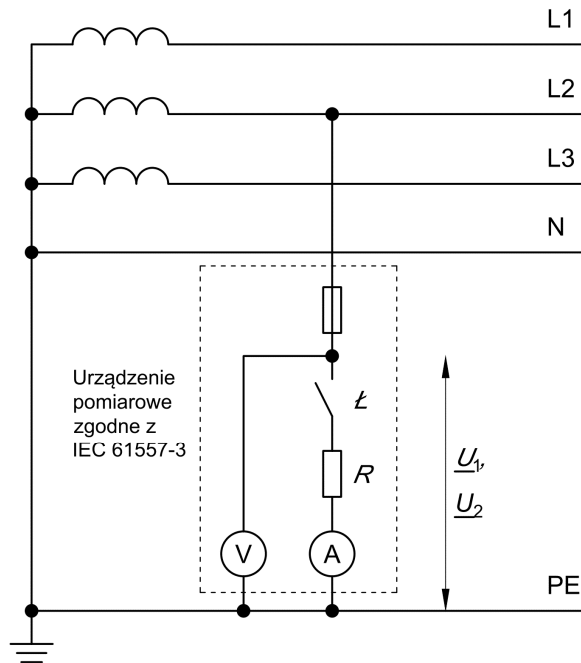
Układ	50V < U ₀ ≤ 120V		120V < U ₀ ≤ 230V		230V < U ₀ ≤ 400V		U ₀ > 400V	
	a.c.	d.c.	a.c.	d.c.	a.c.	d.c.	a.c.	d.c.
TN	0,8	Uwaga 1	0,4	1	0,2	0,4	0,1	0,1
TT	0,3	Uwaga 1	0,2	0,4	0,07	0,2	0,04	0,1

Uwaga 1 – Wyłączenie może być wymagane z innych przyczyn niż ochrona przeciwporażeniowa

3.7. METODA TECHNICZNA POMIARU IMPEDANCJI PĘTLI ZWARCIOWEJ

Sposób pomiaru impedancji pętli zwarciowej dla oceny skuteczności ochrony przeciwporażeniowej w instalacjach niskiego napięcia jest opisany w normie PN-HD 60364-6:2008 [1]. Wykorzystywana jest tam metoda techniczna, bazująca na pomiarze wartości napięcia zasilającego badany obwód, przed i po załączeniu obciążenia pomiarowego.

Na rys. 3.11 przedstawiono schemat układu do pomiaru impedancji pętli zwarciowej. Podstawowym przyrządem pomiarowym jest woltomierz napięcia przemiennego oraz amperomierz prądu przemiennego.



Rys. 3.11 Schemat układu do pomiaru impedancji pętli zwarciowej metodą techniczną, zgodnie z normą [1]

Układ pomiarowy składa się z zaledwie 5 elementów: bezpiecznika, łącznika \mathcal{L} , obciążenia pomiarowego R , woltomierza i amperomierza. Przy otwartym łączniku \mathcal{L} mierzone jest napięcie \underline{U}_1 źródła zasilającego sieć niskiego napięcia. Następnie załączany jest łącznik, prąd płynie przez obciążenie pomiarowe R i mierzone jest napięcie \underline{U}_2 . Różnica tych napięć stanowi podstawę do obliczenia impedancji pętli zwarciowej w obwodzie badanym, zgodnie ze wzorem (3.20). Wartość obciążenia pomiarowego R powinna być znana i niezmienna. Oznaczenie obciążenia R jest tożsamy z oznaczeniem \underline{Z}_0 we wzorze (3.20). Załączenie obciążenia pomiarowego jest swego rodzaju kontrolowanym zwarcie, ponieważ prąd płynie umownie od przewodu fazowego do przewodu ochronnego, stąd nazwa „metoda sztucznego zwarcia” [53–60]:

$$\underline{Z} = \underline{Z}_0 \frac{\underline{U}_1 - \underline{U}_2}{\underline{U}_2} = \underline{Z}_0 \left(\frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2} - 1 \right) \quad (3.20)$$

gdzie:

\underline{Z} – impedancja pętli zwarciowej,

\underline{Z}_0 – impedancja obciążenia pomiarowego,

\underline{U}_1 – napięcie sieci zmierzone przed załączeniem obciążenia pomiarowego,

\underline{U}_2 – napięcie sieci zmierzone po załączeniu obciążenia pomiarowego.



Taki sposób pomiaru jest skuteczny tylko w instalacjach niewyposażonych w wyłączniki różnicowoprądowe, ponieważ przepływ prądu pomiarowego większy od znamionowego prądu różnicowego wyłącznika różnicowoprądowego spowoduje jego wyzwolenie i uniemożliwi wykonanie pomiaru IPZ. Zdziałanie może nastąpić nawet po przekroczeniu połowy wartości znamionowego prądu różnicowego wyłącznika.



4. BADANIA ZACHOWANIA SIĘ WYŁĄCZNIKÓW RÓŻNICOWOPRĄDOWYCH PODCZAS POMIARU IMPEDANCJI PĘTLI ZWARCIOWEJ

4.1. WPROWADZENIE

Wyłączniki różnicowoprądowe wyzwalają przy wystąpieniu odpowiedniego poziomu różnicy prądów w przewodach objętych przez przekładnik sumujący. Poza wartością prądu różnicowego ważny jest również kształt tego prądu. Dla przykładu: wyłącznik różnicowoprądowy o wyzwalaniu typu AC nie musi zadziałać przy przepływie pulsującego prądu stałego, a wyłącznik typu A nie musi zadziałać przy prądzie różnicowym stałym o niewielkim tętnieniu. Typ wyzwalania zależy od budowy wyłącznika, a dokładniej od zastosowanego materiału ferromagnetycznego rdzenia przekładnika sumującego, co wpływa na kształt pętli histerezy.

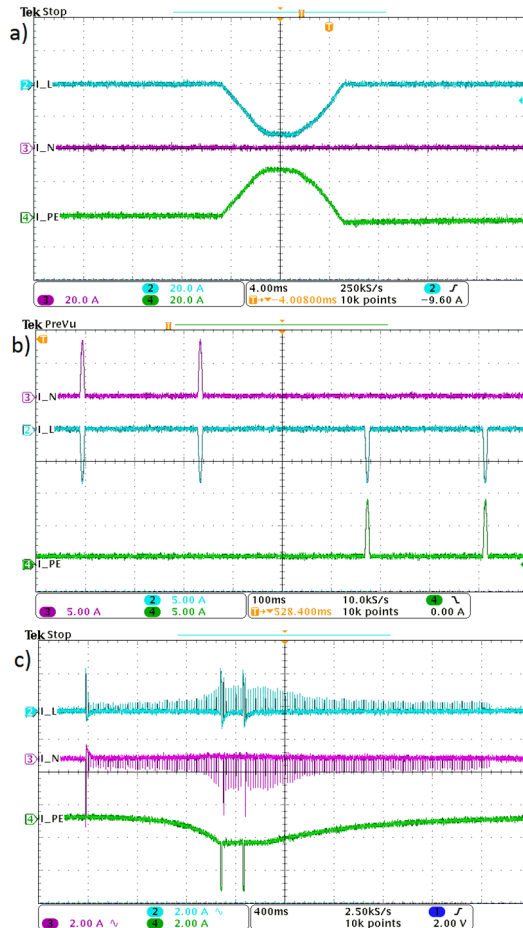
4.2. BADANIA MIERNIKÓW IMPEDANCJI PĘTLI ZWARCIOWEJ

Autor rozprawy przeprowadził szereg badań zachowania się wyłączników różnicowoprądowych przy przepływie prądu różnicowego wywołanego pomiarem impedancji pętli zwarciowej różnymi miernikami [61]. Do badań wykorzystano dwa mierniki przeznaczone tylko i wyłącznie do pomiaru impedancji pętli zwarciowej: Kyoritsu 4120A i Kyoritsu KEW 4140 oraz wielofunkcyjny miernik parametrów instalacji elektrycznej Sonel MPI-520. Zgodnie z danymi producentów [62–64] wymienione mierniki mają funkcję pomiaru impedancji pętli zwarciowej bez wyzwalania wyłączników różnicowoprądowych. W przypadku firmy Kyoritsu funkcja ta nazywa się „ATT” (Anti-Trip Technology) lub „Auto RCD Lock” [65], a w przypadku firmy Sonel jest to „tryb RCD”.

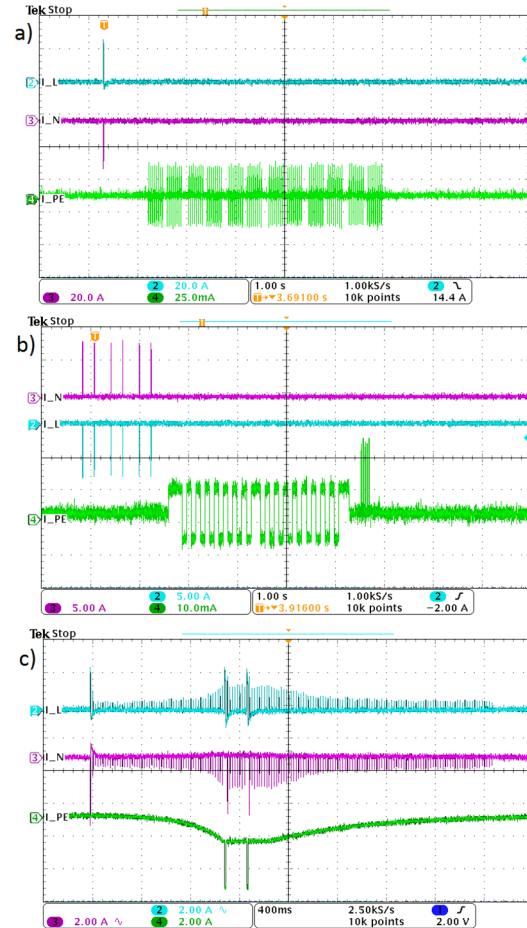
Do rejestracji prądów płynących w przewodzie fazowym L, neutralnym N i ochronnym PE podczas pomiaru wykorzystano oscyloskop cyfrowy i cęgi prądowe. Pomiary przeprowadzono bez aktywnej funkcji ATT/RCD (rys. 4.1) oraz z aktywną tą funkcją (rys. 4.2). Dla miernika Kyoritsu 4120A pomiar bez funkcji ATT nie był możliwy, ponieważ funkcja ta uaktywnia się automatycznie.

Prąd pomiarowy mierników MPI-520 i Kyoritsu KEW 4140 z wyłączoną funkcją ATT/RCD charakteryzuje się typowym półfalowym przebiegiem (rys. 4.1 a i rys. 4.1 b). Jest on często stosowany w miernikach impedancji pętli zwarciowej i częściowo pozwala na

niewyzwalanie wyłączników typu AC lub wyzwolenie występuje tylko podczas pierwszego pomiaru. W przypadku miernika Kyoritsu KEW 4140 pomiar właściwy poprzedzony jest dwoma impulsami prądowymi pomiędzy przewodem fazowym L i neutralnym N.



Rys. 4.1 Przebiegi prądów w przewodach L, N i PE podczas pomiaru bez aktywnej funkcji ATT/RCD, a) Sonel MPI-520 (skala 20A/dz.), b) Kyoritsu KEW 4140 (skala 5A/dz.), c) Kyoritsu 4120A¹ (skala 2A/dz.)

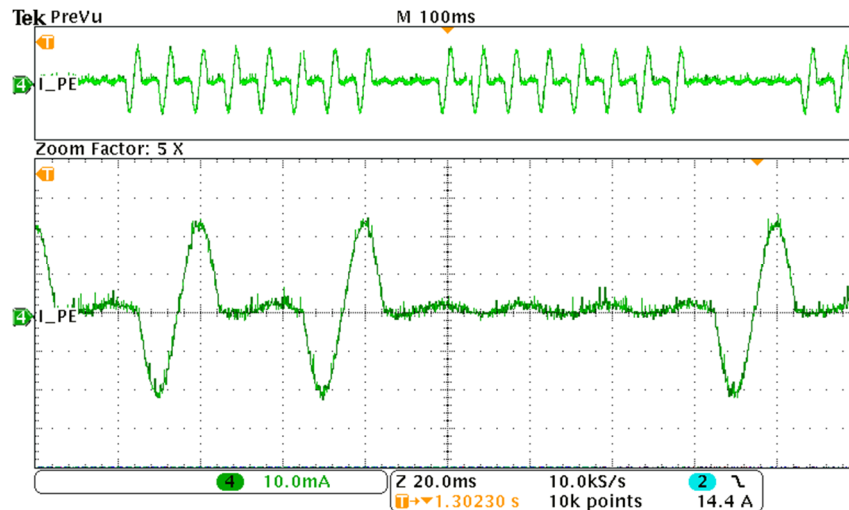


Rys. 4.2 Przebiegi prądów w przewodach L, N i PE podczas pomiaru z aktywną funkcją ATT/RCD, a) Sonel MPI-520 (skala: I_L, I_N – 20A/dz., I_{PE} – 25mA/dz.), b) Kyoritsu KEW 4140 (skala I_L, I_N – 5A/dz., I_{PE} – 10mA/dz.), c) Kyoritsu 4120A (skala 2A/dz.)

Po włączeniu w miernikach funkcji zapobiegającej wyzwoleniu wyłączników RCD, przebiegi prądów obu mierników znacznie się różnią. Miernik MPI-520 wywołuje przepływ prądu pełnofalowego przez przewód ochronny, ale o małej wartości skutecznej, nieprzekraczającej 15 mA, co zapobiega wyzwoleniu wyłączników o $I_{\Delta n} = 30 \text{ mA}$. Ze względu na tak małą wartość

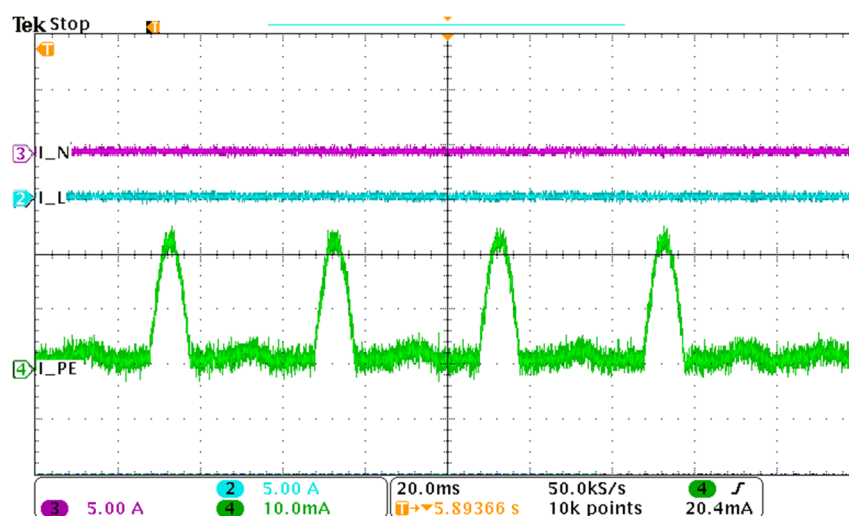
¹ w przypadku miernika Kyoritsu 4120A funkcja ATT/RCD uaktywniała się automatycznie

prądu pomiarowego dokładność pomiaru w wielu przypadkach jest niewystarczająca. Szerzej ten problem opisano w rozdziale 5.3.



Rys. 4.3 Przebieg prądu w przewodzie PE podczas pomiaru miernikiem Sonel MPI-520 z aktywną funkcją RCD – (powiększenie oscylogramu z rys. 4.2 a; skala 10 mA/dz.)

Zbliżoną metodę pomiaru w stosunku do miernika MPI-520 wykorzystano w mierniku KEW 4140. Tutaj również zastosowano pomiar prądem o wartości skutecznej kilkunastu miliamperów. Główna różnica to kształt prądu, który w tym przypadku przybiera charakterystykę sygnału pulsującego wyprostowanego jednopółkwo o częstotliwości równej połowie częstotliwości sieciowej czyli 25 Hz. Pomiar właściwy poprzedzony jest przepływem prądu przemiennego o charakterystyce prostokątnej (rys. 4.2b). Powiększenie przebiegu prądu w przewodzie PE (pomiar właściwy) z rys. 4.2b przedstawiono na rys. 4.4.



Rys. 4.4 Przebieg prądu w przewodach L, N i PE podczas pomiaru miernikiem Kyoritsu KEW 4140 z aktywną funkcją ATT/RCD (powiększenie fragmentu przebiegu z rys. 4.2 b); skala I_{PE} – 10 mA/dz.



W przypadku mierników Sonel MPI-520 i Kyoritsu KEW 4140 przebiegi prądów z aktywną funkcją ATT/RCD w stosunku do pomiaru bez aktywnej tej funkcji znacznie się różnią. Inna sytuacja występuje w mierniku Kyoritsu 4120A – funkcja ATT/RCD uaktywniła się automatycznie przy każdym pomiarze (porównywalne przebiegi na rys. 4.1 c i rys. 4.2 c). W przypadku tego miernika zastosowano prąd pomiarowy półfalowy po uprzednim nasyceniu rdzenia przekładnika sumującego wyłącznika różnicowoprądowego prądem stałym o pomijalnym tętnieniu. Jest to metoda podobna to tej, którą przedstawiono w opisie patentowym [66].

4.3. BADANIA REAKCJI WYŁĄCZNIKÓW RÓŻNICOWOPRĄDOWYCH NA PRĄD POMIAROWY

Dla sprawdzenia reakcji pewnej populacji wyłączników różnicowoprądowych na prądy pomiarowe mierników opisanych w rozdziale 4.2, wykonano badania laboratoryjne. Grupa 14 losowo wybranych wyłączników różnych producentów została poddana próbie przepływu prądu pomiarowego. W grupie badanych wyłączników (wszystkie miały znamionowy prąd różnicowy $I_{\Delta n} = 30 \text{ mA}$), znalazły się wyłączniki typu AC i typu A, jeden z nich był krótkozwłoczny G (czas przetrzymywania prądu różnicowego równy 10 ms), a pozostałe to wyłączniki bezzwłoczne.

Reakcję wyłączników badano przy wyłączonej w mierniku funkcji ATT/RCD. Dla miernika Kyoritsu 4120A pomiar taki nie był możliwy, ponieważ funkcja ATT/RCD uaktywniała się automatycznie. W tab. 4.1 zestawiono wyniki badań.

Dla każdego wyłącznika wykonano po trzy pomiary dla polaryzacji umownie nazwanej „dodatnia” i „ujemna”. Polaryzacja oznaczała sposób przyłączenia wyłącznika do miernika. Zamianie ulegał przepływ prądu po zmianie strony zasilania wyłącznika. Przerwa pomiędzy każdym pomiarem wynosiła kilka sekund. Zmianę polaryzacji prądu pomiarowego realizowano przez przystawkę pomiarową stworzoną specjalnie na potrzeby badań, pozwalającą jednym przełącznikiem zmieniać kierunek przepływu prądu przez wyłącznik bez odłączania przewodów, co znacząco przyspieszyło pomiary oraz zwiększyło ich powtarzalność. Opis przystawki pomiarowej zawarto w rozdziale 6.5. Podczas badań rejestrowano wyzwolenie wyłącznika różnicowoprądowego (szara komórka z oznaczeniem „+” w tab. 4.1) oraz brak wyzwolenia (biała komórka z oznaczeniem „-” w tab. 4.1).

Tab. 4.1 Wyniki badań reakcji wyłączników różnicowoprądowych o $I_{\Delta n} = 30$ mA na prąd pomiarowy dla wybranych mierników impedancji pętli zwarciowej (funkcja ATT/RCD nie była aktywna). Zwłoczność: B – bezzwłoczny, G – krótkozwłoczny

Miernik	Polaryzacja	Nazwa	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9	W10	W11	W12	W13	W14		
Kyoritsu KEW 4140	dodatnia	Nr próby	1	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-*	+	+	+	+	
			2	-	+	+	+	+	-	+	+	-	-*	+	+	-	-	
			3	-	+	+	+	+	-	+	+	-	-*	+	+	-	-	
	ujemna		1	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	-*	+	+	+	+
			2	-	+	-	+	+	-	+	+	-	-*	+	+	-	-	
			3	-	+	-	+	+	-	+	+	-	-*	+	+	-	-	
Sonel MPI-520	dodatnia	1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+		
		2	-	+	+	+	+	-	+	+	-	-	+	+	-	-		
		3	-	+	+	+	+	-	+	+	-	-	+	+	-	-		
	ujemna	1	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	
		2	-	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	+	-	-		
		3	-	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	+	-	-		
Nazwa			W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9	W10	W11	W12	W13	W14		
Typ wyzwalania			AC	A	A	AC	AC	AC	A	A	AC	AC	A	A	AC	AC		
Zwłoczność			B	B	B	B	B	B	B	B	B	G	B	B	B	B		

* w przypadku pomiarów w odstępach nieprzekraczających 1 sekundy wyłącznik wyzwał, w przypadku odstępów większych niż 1 sekunda wyłącznik nie wyzwał

Pomiary wykonane bez aktywnej funkcji ATT/RCD w większości przypadków powodowały wyzwalenie wyłącznika – wpływ na to miał znaczny prąd pomiarowy (różnicowy) przepływający przez wyłącznik. W przypadku wyłączników W1, W6, W9, W13, W14 wyzwalenie następowało tylko przy pierwszym pomiarze, natomiast następne dwa pomiary nie powodowały wyzwalenia. Ta charakterystyczna cecha związana jest z kształtem pętli histerezy rdzenia przekładnika najczęściej stosowanego w wyłącznikach typu AC (rys. 2.9 a). Po nasyceniu rdzenia podczas przepływu pierwszej półfali prądu pomiarowego, kolejne półfale prądu tej samej polaryzacji nie powodują już tak dużej zmiany indukcji ΔB by zadziałał wyzwalacz różnicowy wyłącznika [67].

Interesującą właściwość wykazał wyłącznik oznaczony jako W3, który wyzwał tylko przy określonej polaryzacji prądu. Cecha ta najprawdopodobniej związana jest z zastosowanym typem wyzwalacza różnicowego spolaryzowanego znajdującego się w obwodzie wtórnym przekładnika sumującego [7]. Szerszy opis wyzwalaczy wyłączników, w tym wyzwalacza spolaryzowanego, zawarto w rozdziale 2.2.



5. METODY POMIARU IMPEDANCJI PĘTLI ZWARCIOWEJ BEZ WYZWALANIA WYŁĄCZNIKÓW RÓŻNICOWOPRĄDOWYCH

5.1. WPROWADZENIE

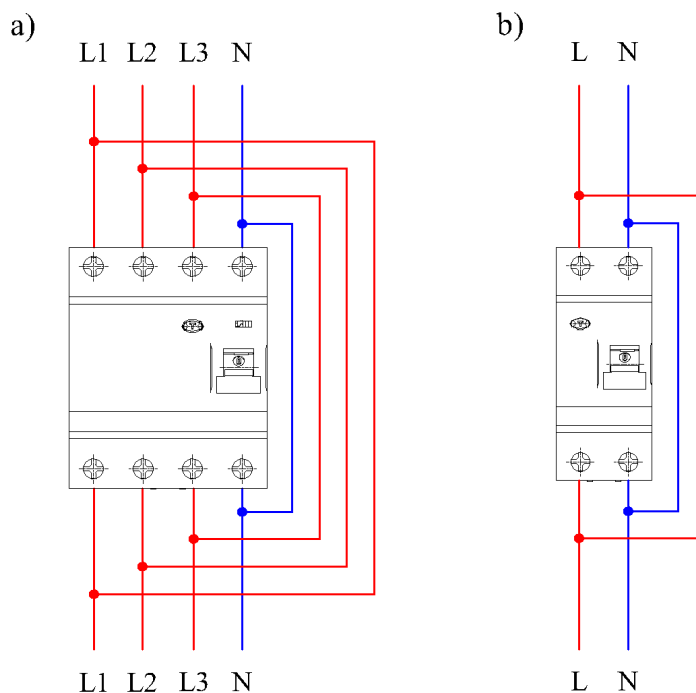
Niektóre dostępne mierniki impedancji pętli zwarciowej wykorzystują metody pomiaru IPZ teoretycznie pozwalające na pomiar w obwodach z wyłącznikami różnicowoprądowymi bez ich zbędnego wyzwalania. Każda z metod obarczona jest jednak szeregiem wad użytkowych wynikających z zastosowanych technologii pomiaru bądź wyniki otrzymane z pomiarów obarczone są znacznym błędem pomiarowym dającym w rezultacie wynik jedynie orientacyjny. Szybki rozwój energoelektroniki pozwolił na stworzenie mierników automatycznych umożliwiających wykonywanie pomiarów bez skomplikowanego i czasochłonnego montowania układów do pomiaru metodą techniczną. Jednocześnie dąży się do uzyskania wyników pomiarów o jak największej dokładności, a także bada się zachowanie wyłączników przy różnych prądach różnicowych [40, 68–83]. W rozdziale tym poddano krytycznej analizie kilka istniejących metod pomiaru IPZ z wykorzystaniem technik zapobiegających zbędnemu wyzwalaniu wyłączników różnicowoprądowych. Poniżej scharakteryzowano zasadę działania oraz typowe problemy występujące w każdej metodzie.

5.2. BOCZNIKOWANIE

Jedną z najprostszych metod zapobiegania zbędnemu wyzwalaniu wyłączników różnicowoprądowych podczas pomiaru impedancji pętli zwarciowej jest bocznikowe styków wyłącznika różnicowoprądowego. Boczniki w postaci odcinków przewodów montowane są pomiędzy zaciskami wyłącznika różnicowoprądowego (rys. 5.1) kolejno we wszystkich fazach i przewodzie neutralnym (w sieci TN-S).

Wśród osób wykonujących pomiary popularne są magnetyczne adaptery pomiarowe. Odcinki przewodów wyposażone są na końcach w magnesy, które można przymocować do śrub zacisków wyłącznika. Metoda ta jest znacznie szybsza i nie wymaga odkręcania śrub oraz rozwierania obwodów badanych, lecz jest jednocześnie niepoprawna i niezalecana. Typowa obciążalność tego typu adapterów i przewodów wynosi zaledwie kilka amperów ($2\div 4$) [84], co jest wartością niewystarczającą przy pomiarze IPZ metodami tradycyjnymi (mierniki wielkoprądowe), gdzie prąd pomiarowy wynosi kilka, kilkanaście, a nawet kilkadziesiąt amperów. Niepewny styk pomiędzy śrubą wyłącznika i magnesem może powodować zwiększenie rezystancji badanego

obwodu, a w rezultacie powstanie znacznych błędów pomiarowych. Adaptery magnetyczne zgodnie z przeznaczeniem powinny być stosowane jedynie do pomiarów napięciowych, a nie prądowych.



Rys. 5.1 Schemat bocznikowania wyłączników różnicowoprądowych: a) 4-biegunowych, b) 2-biegunowych

Prawidłowo wykonane bocznikowanie pozwala na wykorzystanie podczas pomiarów IPZ tradycyjnych mierników wieloprądowych pełnofalowych [67, 78, 85] lub nawet metody technicznej, szerzej opisanych w rozdziale 3.7. Brak konieczności stosowania specjalistycznego i kosztownego sprzętu pomiarowego przyczyniło się niegdyś do dużej popularności tej metody. Wraz ze wzrostem liczby wyłączników RCD montowanych w obwodach odbiorczych, osoby wykonujące pomiary instalacji elektrycznych zaprzestawały stosowania tej metody ze względu na jej czasochłonność. Do głównych wad można również zaliczyć konieczność bocznikowania wszystkich wyłączników RCD poprzedzających w obwodzie badanym. Należy wspomnieć również, że nawet prawidłowo wykonane bocznikowanie styków wyłącznika RCD zmienia (choć nieznacznie) parametry obwodu mierzonego oraz pozbawia obwód mierzony ochrony przy wystąpieniu upływu prądu w czasie pomiarów, a pomiary często wykonywane są w obiektach podczas ich normalnej pracy. Instalacja bocznika, dla bezpieczeństwa osoby wykonującej pomiary, powinna być przeprowadzona w stanie beznapięciowym, co wiąże się z przerwą w dostawie



energii elektrycznej do odbiorników. Sytuacja taka jest niedopuszczalna w miejscach, gdzie przerwa w zasilaniu może doprowadzić do zagrożenia zdrowia i życia ludzkiego, lub tam, gdzie narażałoby to użytkownika na straty materialne, np. brak dostępu do istotnych danych, czy wyłączenie z pracy linii produkcyjnej.

5.3. POMIAR MAŁYM PRĄDEM

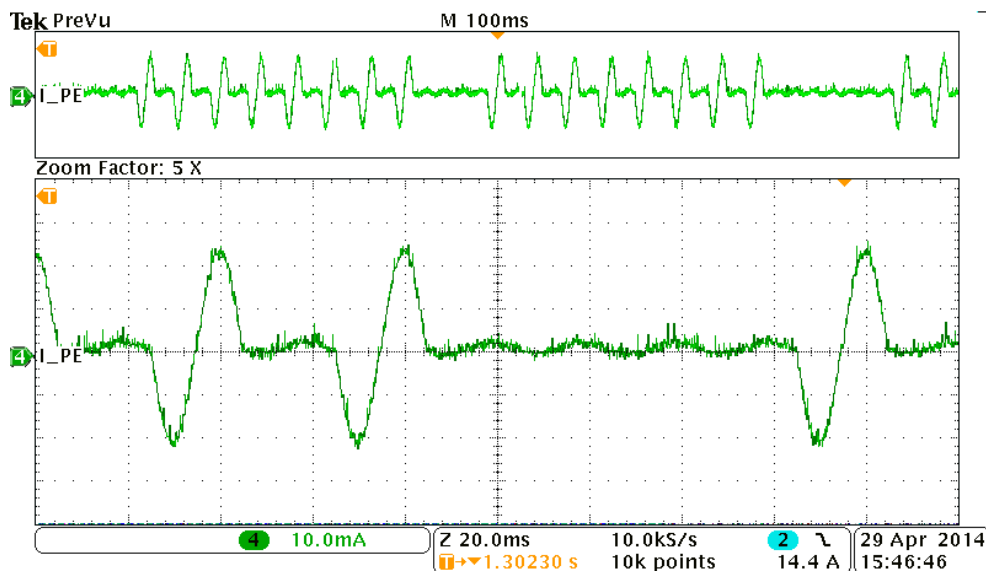
Podczas pomiaru IPZ metodami tradycyjnymi (metoda techniczna) prąd pomiarowy I_p przepływa przewodem fazowym L i ochronnym PE (w sieci TN-S). Prąd ten jest traktowany przez wyłącznik różnicowoprądowy jako prąd różnicowy. Jeżeli wartość prądu różnicowego jest większa niż połowa znamionowego prądu różnicowego wyłącznika $0,5I_{\Delta n}$, to może nastąpić jego wyzwolenie. Wyłączniki różnicowoprądowe powinny wyzwać w przedziale od $0,5 I_{\Delta n}$ do $I_{\Delta n}$, muszą wyzwolić przy prądzie równym lub większym $I_{\Delta n}$, natomiast przy $0,5 I_{\Delta n}$ lub poniżej tej wartości sprawny wyłącznik nie powinien zadziałać.

Wykonanie pomiaru IPZ prądem o wartości mniejszej niż połowa znamionowego prądu wyłącznika różnicowoprądowego $I_p \leq 0,5 I_{\Delta n}$ nie powoduje jego wyzwolenia podczas pomiaru [22]. Z powodu małej wartości prądu wyniki obarczone są dużymi błędami [67, 78, 85]. Mimo zastosowania małej wartości prądu pomiarowego, zasada samego pomiaru jest identyczna jak w metodzie technicznej. Mierzone jest napięcie przed załączeniem obciążenia pomiarowego i po jego załączeniu. Następnie na podstawie wzoru (3.20) obliczana jest wartość impedancji pętli zwarciowej.

Typowa wartość prądu pomiarowego I_p stosowana w miernikach komercyjnych wynosi $(10 \div 15)$ mA z uwagi na najczęściej stosowane w instalacjach odbiorczych wyłączniki RCD o prądzie znamionowym różnicowym $I_{\Delta n} = 30$ mA. Prąd płynący w obwodzie mierzonym podczas pomiaru powoduje nieduże spadki napięcia w instalacji poprzedzającej miejsce pomiaru i tym samym różnica napięć U_1 i U_2 jest bardzo mała. Niewielka różnica napięć mierzonych powoduje duże problemy z dokładnością pomiaru i wpływa to znacząco na błąd całkowity miernika oraz jego graniczny minimalny zakres mierzonej impedancji. Dodatkowo taki układ pomiarowy jest podatny na zakłócenia (wahania) napięcia zasilającego występujące podczas pomiaru. W przypadku chociażby niewielkiej zmiany napięcia zasilającego podczas pomiaru, prawidłowy wynik może być niemożliwy do uzyskania, gdy napięcie U_2 będzie wyższe od

napięcia U_1 co dawałoby w rezultacie ujemną wartość mierzonej impedancji pętli zwarciowej zgodnie ze wzorem (3.20). W takich przypadkach niektóre mierniki wyświetlają na wyświetlaczu informacje o błędzie, a inne wynik równy 0Ω , co może być mylące dla osoby wykonującej pomiary.

Niewielka wartość prądu pomiarowego nie powoduje, co prawda, wyzwania wyłącznika różnicowoprądowego, ale jest niewystarczająca do wykrywania słabych połączeń w badanym obwodzie, a wartość prądu pomiarowego daleka jest od rzeczywistych prądów zwarciowych występujących w obwodach odbiorczych badanych instalacji.



Rys. 5.2 Przebieg prądu pomiarowego w przewodzie PE przy wykorzystaniu miernika z opcją pomiaru małym prądem (skala: 10mA/dz.; podstawa czasu 20ms/dz.)

W danych katalogowych wybranych mierników IPZ wykorzystujących metodę pomiaru małym prądem można znaleźć informacje o ograniczeniach takich mierników do pomiarów impedancji pętli zwarciowej powyżej $0,5 \Omega$ [86–88]. Wynika z tego, że takie mierniki nie spełniają klasy dokładności pomiaru dla mierzonych impedancji pętli zwarciowych mniejszych niż $0,5 \Omega$. Należy zauważyć, że w instalacjach odbiorczych mogą występować wartości mniejsze niż $0,5 \Omega$, szczególnie przy niewielkiej odległości od stacji transformatorowej i znacznych przekrojach kabli i przewodów zasilających. W takich przypadkach stosowanie opisywanej metody jest bezcelowe i błędne.

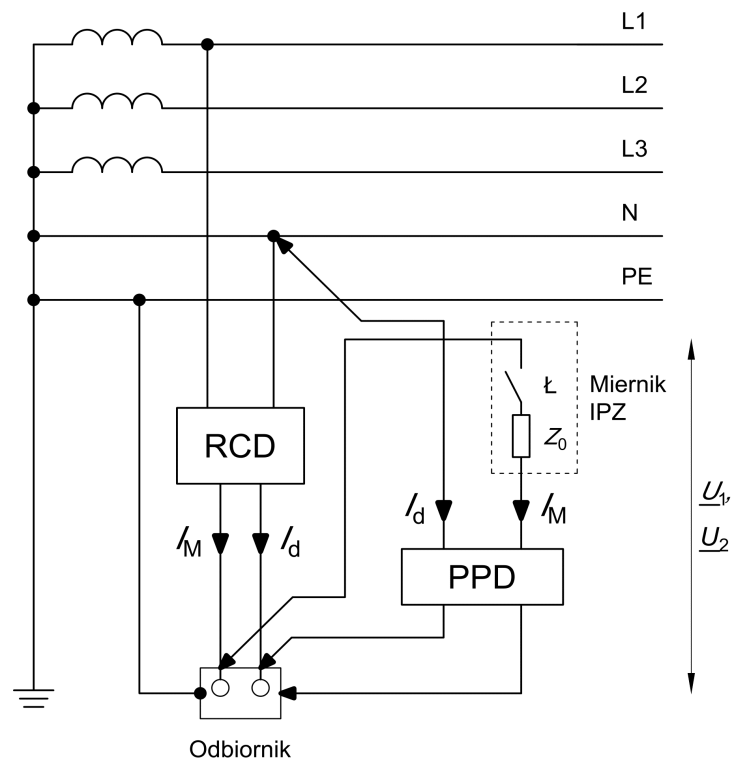


Zdecydowana większość aktualnie użytkowanych urządzeń, takich jak komputery, urządzenia AGD czy RTV charakteryzuje się pewnym naturalnym prądem upływowym. Spowodowane jest to głównie elementami filtrującymi w układzie zasilaczy. Kondensatory filtrujące włączone w obwód zasilania pomiędzy przewód fazowy L i przewód ochronny PE oraz przewód neutralny N i przewód ochronny PE charakteryzują się pewną upływnością [89]. W obwodach odbiorczych, do których przyłączone są urządzenia powodujące wpływ prądu do przewodu PE (szczególnie zestawy komputerowe) mniejszy niż połowa znamionowego prądu różnicowego wyłącznika RCD, zastosowanie opisanej metody pomiaru również jest wątpliwe. Prąd upływowy wynikający z normalnej pracy urządzeń w połączeniu z prądem pomiarowym może spowodować zbędne zadziałanie zabezpieczenia i tym samym uniemożliwić dokończenie pomiaru IPZ [90].

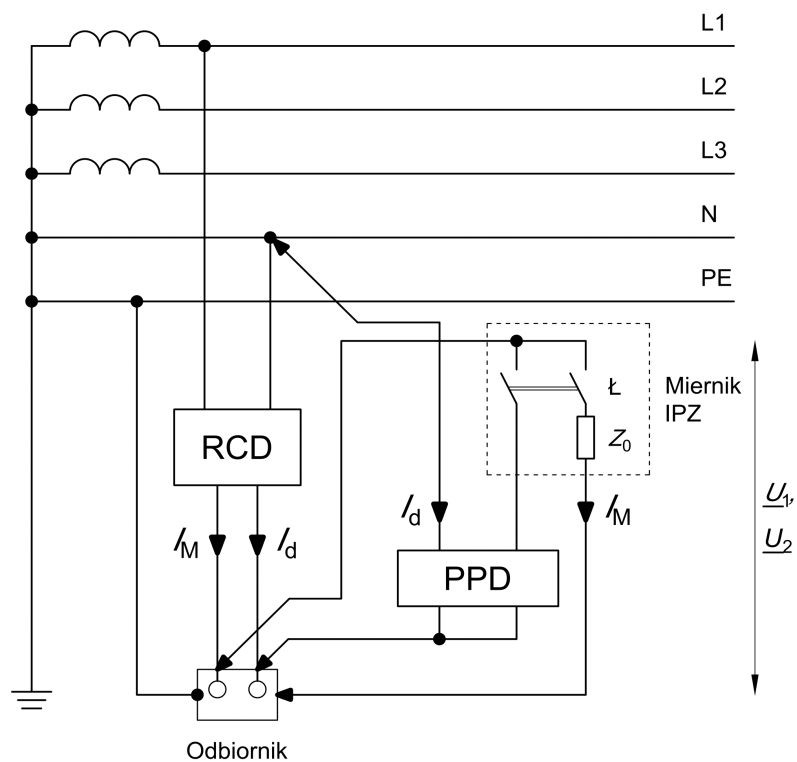
5.4. PRĄD DOPEŁNIAJĄCY

Przy pomiarze IPZ metodą techniczną [1] prąd pomiarowy przepływa umownie z przewodu fazowego do przewodu ochronnego przez impedancję obciążenia (rys. 3.11). Odpowiednio duża różnica prądów płynących w przewodach fazowych i neutralnym może powodować niechciane wyzwolenie wyłącznika różnicowoprądowego. Autorzy artykułu [85] przedstawili rozwiązanie [91], w którym pomiar impedancji pętli zwarciowej zbliżony jest do metody tradycyjnej opisanej w normie [1], ale zawiera element powodujący zrównoważenie prądów w przewodzie fazowym i neutralnym.

W rozwiązaniu z prądem dopełniającym wykorzystano przetwornik prądu dopełniającego w postaci przekładnika prądowego lub transformatora. W artykule [85] zaproponowano dwa rozwiązania połączenia przetwornika prądu pomiarowego: szeregowo z obciążeniem pomiarowym (rys. 5.3) lub równoległe do zacisków badanego odbiornika (rys. 5.4).



Rys. 5.3 Schemat układu pomiaru impedancji pętli bez wyzwalania RCD z przetwornikiem prądu dopełniającego PPD połączonym szeregowo z impedancją obciążenia pomiarowego Z_0 [85]



Rys. 5.4 Schemat układu pomiaru impedancji pętli bez wyzwalania RCD z przetwornikiem prądu dopełniającego PPD połączony równoległe do zacisków badanego odbiornika [85]



W jednym jak i drugim rozwiązaniu prąd płynący w przewodzie fazowym trafia do przetwornika prądu dopełniającego, gdzie jest transformowany. Strona wtórna przetwornika przyłączona jest do toru neutralnego zacisków odbiornika, a prąd w nim płynący ma wartość identyczną z prądem fazowym, ale o przeciwnym kierunku. Zabieg taki pozwala zmniejszyć różnicę prądów pomiędzy przewodem fazowym oraz neutralnym (objętych przez rdzeń przekładnika sumującego wyłącznika różnicowoprądowego) i tym samym zapobiega zbędnemu wyzwaniu wyłącznika RCD. W praktyce wartość prądu wychodzącego z przetwornika prądu dopełniającego nie musi być identyczna z wartością prądu fazowego. Niezrównoważenie może wynosić połowę wartości prądu znamionowego różnicowego wyłącznika RCD. W przypadku najczęściej stosowanych wyłączników (30 mA) różnica ta może wynosić nawet 15 mA, tak by wyłącznik nie wyzwolił podczas pomiaru.

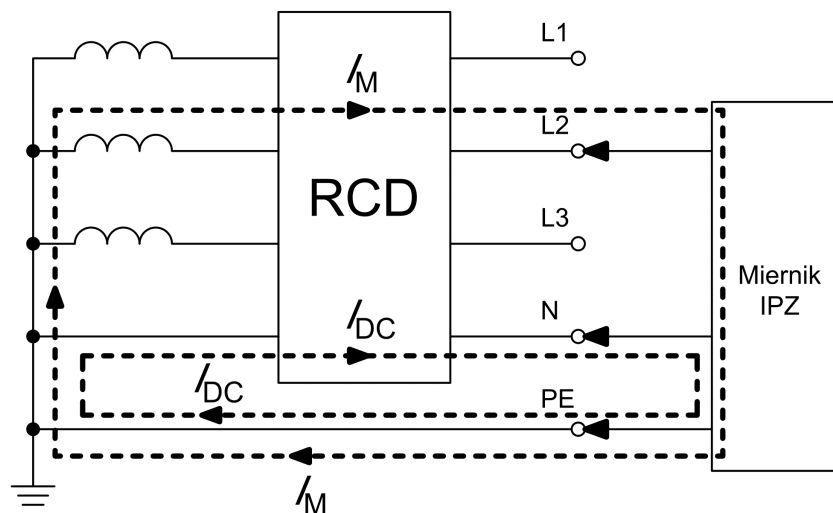
Prototypowy miernik wykonany w ramach pracy dyplomowej [79] umożliwia pomiar rezystancji pętli zwarciowej od $0,1 \Omega$ do 50Ω przy prądzie pomiarowym 4 A/40 ms [85, 91]. Rozwiązanie pomiaru IPZ z prądem dopełniającym jest skuteczne z punktu widzenia metrologicznego, ponieważ pozwala wykonać pomiar IPZ przy znacznym prądzie pełnofalowym, rzędu 4 A. Niestety funkcjonalnie i praktycznie miernik jest niewygodny ze względu na konieczność przyłączania jednego z przewodów proponowanego miernika do zacisku neutralnego przed wyłącznikiem różnicowoprądowym. Wyłączniki RCD montowane są zazwyczaj w rozdzielnicach głównych lub podrozdzielniach. Miejsce pomiaru może być znacznie oddalone od rozdzielnicy w przypadku dużych budynków. Stosowanie długich odcinków przewodów pomiarowych jest bardzo niewygodne i niepraktyczne [82]. Pomiar elektryczny powinny być wykonywane metodami dającymi rzetelne wyniki, ale jednocześnie z uwagi na koszt prac powinny być szybkie i łatwe do wykonania.

5.5. METODA Z NASYCIANIEM RDZENIA PRZEKŁADNIKA SUMUJĄCEGO WYŁĄCZNIKA RÓŻNICOWOPRĄDOWEGO

Skuteczny pomiar impedancji pętli zwarciowej znacznym prądem w obwodzie z wyłącznikiem różnicowoprądowym jest możliwy wtedy, gdy układ wyzwalający wyłącznika nie reaguje na kształt wymuszanego prądu pomiarowego. Sposób pomiaru wykorzystujący właściwości magnetyczne przekładnika sumującego wyłącznika RCD opisany został w patencie [66]. Metoda ta polega na wstępnym nasyceniu rdzenia przekładnika sumującego

wyłącznika RCD przez przepływ prądu stałego I_{DC} (rys. 5.5), a następnie wymuszeniu przepływu właściwego prądu pomiarowego I_M .

Prąd stały I_{DC} nasycający rdzeń przekładnika przepływa w pętli pomiędzy przewodem ochronnym a neutralnym, i jest stopniowo zwiększany w czasie, aż do chwili nasycenia przekładnika sumującego, po czym następuje przepływ prądu pomiarowego I_M o kształcie półfali i kierunku zgodnym z prądem I_{DC} w przewodzie ochronnym. Takie rozwiązanie pozwala na pomiar znacznymi prądami bez wyzwolenia wyłącznika różnicowoprądowego. Metoda ta została zastosowana w jednym z badanych mierników (rozdział 4.2), gdzie prąd nasycający miał wartość szczytową około 15 A, a prąd pomiarowy aż 28 A.



Rys. 5.5 Metoda pomiaru impedancji pętli zwarciowej z nasycaniem rdzenia przekładnika sumującego;
 I_M – prąd pomiarowy, I_{DC} – prąd stały nasycający

Silne nasycenie rdzenia przekładnika sumującego może jednak doprowadzić do zmiany jego właściwości magnetycznych, a nawet do jego uszkodzenia, co spowoduje brak reakcji na prąd zwarcia doziemnego i tym samym brak ochrony w zabezpieczanym obwodzie [85].



6. NOWA METODA POMIARU BEZ WYZWALANIA WYŁĄCZNIKÓW RÓŻNICOWOPRĄDOWYCH

6.1. ZAŁOŻENIA

Proponowana metoda ma za zadanie umożliwić wykonanie pomiaru rezystancji pętli zwarciowej bez zbędnego wyzwalania wyłączników RCD typu A i typu AC zabezpieczających badany obwód. Założono, że nie będzie konieczności ingerencji w obwód badany w żadnym miejscu instalacji elektrycznej. Jednocześnie metoda pomiaru ma być pozbawiona wad występujących w innych metodach opisanych w rozdziale 5.

Autor rozprawy założył, że opracowana metoda pomiaru będzie umożliwiała pomiar prądem o amplitudzie przynajmniej 100-krotnie większej niż znamionowy prąd różnicowy najpopularniejszych wyłączników różnicowoprądowych (30 mA) i jednocześnie pomiar nie będzie wyzwaliał wyłączników RCD w badanym obwodzie, a przyłączenie do badanego obwodu będzie wykonane na trzech zaciskach L, N i PE.

6.2. PODSTAWY TEORETYCZNE METODY POMIARU

Pomiar impedancji (rezystancji) pętli zwarciowej wymusza w obwodzie przepływ prądu pomiarowego I_M , który jest jednocześnie prądem różnicowym dla wyłącznika różnicowoprądowego. Przepływ prądu pomiarowego o wartości większej niż połowa znamionowego prądu różnicowego wyłącznika może spowodować jego wyzwolenie i jednocześnie uniemożliwić prawidłowe wykonanie pomiaru.

Reakcja wyłącznika różnicowoprądowego na różne przebiegi prądów pomiarowych zależy od jego typu i budowy. Najważniejszą cechą determinującą zadziałanie wyłącznika jest kształt pętli histerezy materiału, z którego wykonany jest rdzeń ferromagnetyczny przekładnika sumującego tego wyłącznika. Wyróżnia się trzy podstawowe kształty pętli histerezy: prostokątną, zaokrągloną i płaską (rys. 2.7).

Prąd pomiarowy I_M przepływający przez uzwojenie pierwotne przekładnika sumującego powoduje zaindukowanie się napięcia po stronie wtórnej przekładnika. Osiągnięcie pewnego określonego poziomu napięcia zaindukowanego, a tym samym prądu po stronie wtórnej przekładnika powoduje zadziałanie wyzwalacza i w rezultacie otwarcie styków wyłącznika. Czym wyższa wartość tego napięcia, tym szybciej i pewniej zostanie uruchomiony wyzwalacz i nastąpi



wyłączenie. Jeżeli natomiast prąd pomiarowy spowoduje zaindukowanie się napięcia mniejszego niż wymagane jest do zadziałania wyłączacza, to mimo przepływu prądu różnicowego wyłącznik nie wyzwoli.

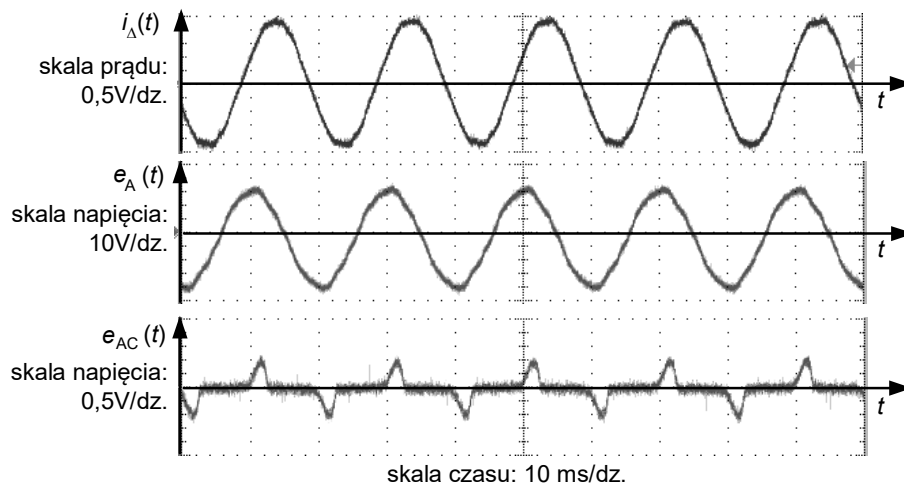
Jak dowodzą wyniki badania [25], charakterystyka prądu pomiarowego I_M przy pomiarze impedancji pętli zwarciowej ma wpływ na wartość napięcia zaindukowanego po stronie wtórnej przekładnika sumującego wyłącznika różnicowoprądowego. W związku z tym ma również wpływ na reakcję wyłącznika podczas wykonywania pomiaru.

W tradycyjnej (technicznej) metodzie pomiaru (rozdział 3.7), prąd pomiarowy ma charakterystykę sinusoidalną o wartości skutecznej wynikającej z zastosowanego obciążenia pomiarowego. Zmiana indukcji w rdzeniu przekładnika dla sygnału sinusoidalnego wynosi dwukrotność indukcji nasycenia, czyli $\Delta B = 2B_s$. Tak duża zmiana indukcji niezależnie od kształtu pętli histerezy powoduje wyzwolenie wyłącznika różnicowoprądowego przy przepływie sinusoidalnego prądu pomiarowego (rys. 2.9).

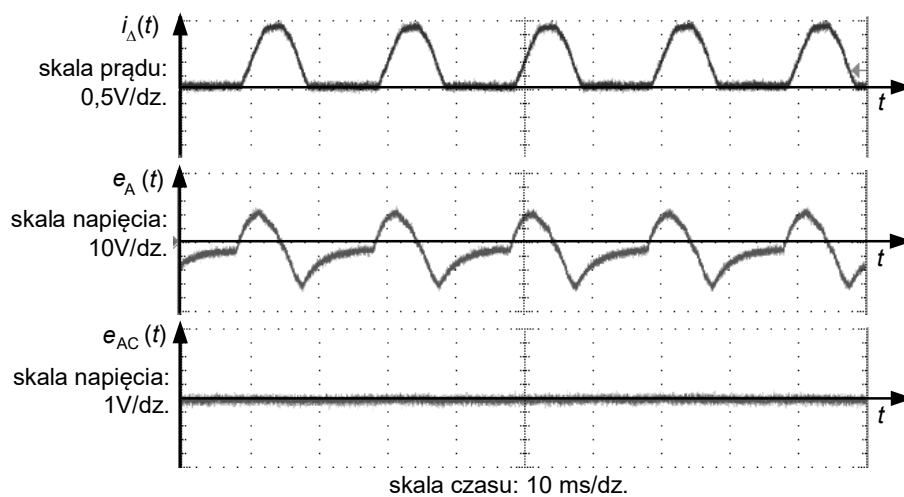
Na rys. 6.1 przedstawiono charakterystyki napięcia indukowanego po stronie wtórnej przekładnika sumującego przy przepływie prądu sinusoidalnego dla wyłączników typu AC z prostokątną pętlą histerezy oraz typu A z płaską pętlą histerezy. Wartość napięcia indukowanego po stronie wtórnej wyłącznika typu AC jest zdecydowanie mniejsza niż w przypadku wyłącznika typu A, ale jednocześnie w obu przypadkach wystarczająca do wyzwolenia wyłącznika. Charakterystyka napięcia indukowanego dla wyłącznika typu AC odbiega od przebiegu sinusoidalnego prądu różnicowego, spowodowane jest to prostokątnym kształtem pętli histerezy materiału ferromagnetycznego stosowanego w przekładnikach tego typu wyłączników.

W przypadku półfalowej (rys. 6.2) i wyprostowanej dwupołwkowo (rys. 6.3) charakterystyki prądu pomiarowego, napięcie indukowane po stronie wtórnej przekładnika sumującego dla wyłącznika typu AC jest bliskie zeru. Oznacza to, że prąd różnicowy o takich charakterystykach nie spowoduje wyzwolenia wyłącznika typu AC. Potwierdza to tab. 4.1, gdzie przy badaniu wyłączników różnicowoprądowych miernikami o półfalowej charakterystyce prądu pomiarowego nie wyzwalała większość wyłączniki typu AC lub wyzwalały tylko za pierwszym razem. Warto nadmienić, że niektóre wyłączniki AC wyzwalały jednak przy przepływie prądu półfalowego, co spowodowane jest stosowaniem w nich przekładników sumujących takich jak te,

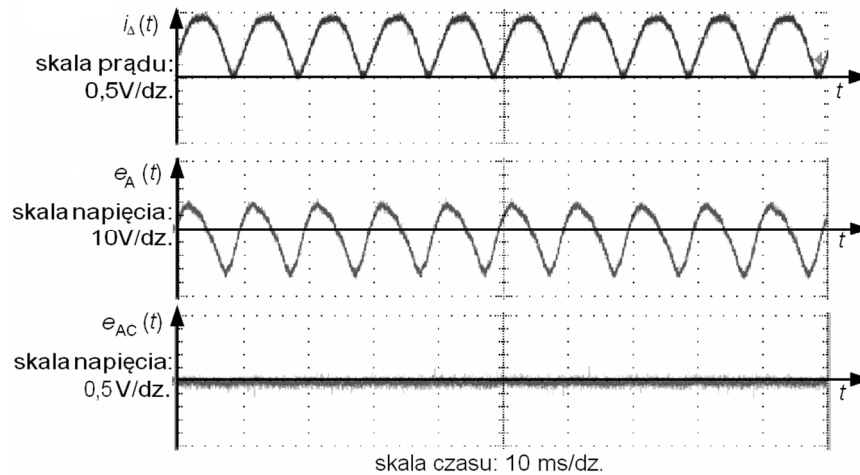
które są montowane w wyłącznikach typu A czyli o płaskiej pętli histerezy. Przepływ prądu półfalowego i pełnofalowego powoduje zaindukowanie się znacznego napięcia po stronie wtórnej przekładnika wyłączników typu A. Zależność tę potwierdzają również badania autora, których wyniki przedstawiono w tab. 4.1, gdzie przepływ pomiarowego prądu półfalowego powodował wyzwolenie wszystkich badanych wyłączników typu A.



Rys. 6.1 Charakterystyki napięcia indukowanego po stronie wtórnej przekładnika sumującego wyłącznika różnicowoprądowego typu A: $e_A(t)$ oraz typu AC: $e_{AC}(t)$ przy przepływie prądu różnicowego $i_Δ(t)$ o charakterystyce sinusoidalnej

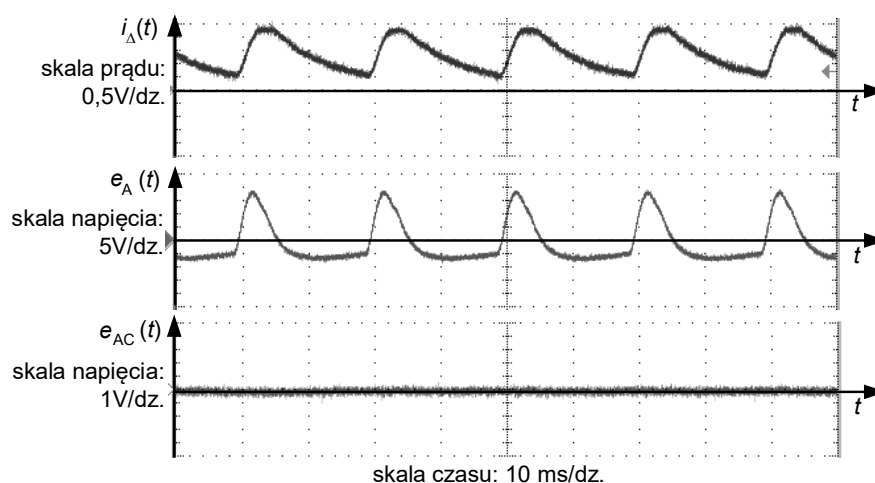


Rys. 6.2 Charakterystyki napięcia indukowanego po stronie wtórnej przekładnika sumującego wyłącznika różnicowoprądowego typu A: $e_A(t)$ oraz typu AC: $e_{AC}(t)$ przy przepływie prądu różnicowego $i_Δ(t)$ o charakterystyce półfalowej



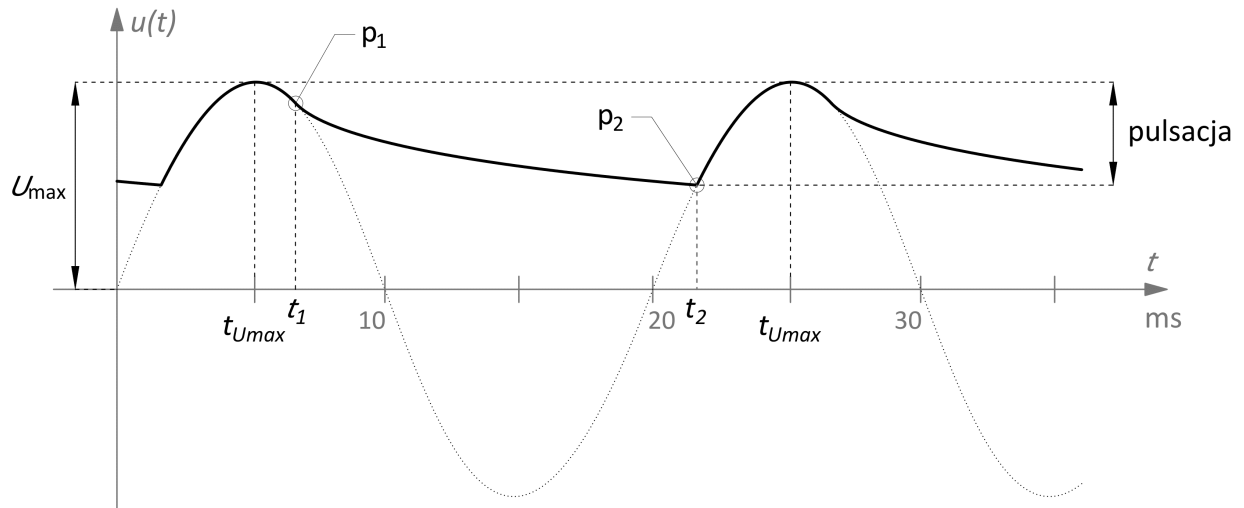
Rys. 6.3 Charakterystyki napięcia indukowanego po stronie wtórnej przekładnika sumującego wyłącznika różnicowoprądowego typu A: $e_A(t)$ oraz typu AC: $e_{AC}(t)$ przy przepływie prądu różnicowego $i_{\Delta}(t)$ o charakterystyce wyprostowanej dwupołkowo

Zaprezentowane powyżej wyniki badań przyczyniły się do opracowania i opatentowania [91] przez autora rozprawy **nowej charakterystyki prądu pomiarowego**. Prąd różnicowy $i_{\Delta}(t)$ o charakterystyce zaprezentowanej na rys. 6.4 jest prądem stałym o niewielkim tętnieniu będącym przebiegiem półfalowym wygładzonym. Przepływ prądu o takiej charakterystyce nie powoduje zaindukowania napięcia po stronie wtórnej przekładnika sumującego wyłącznika różnicowoprądowego typu AC, a napięcie indukowane dla wyłącznika typu A jest na tyle małe, że nie powoduje zadziałania wyłącznika (porównanie rys. 6.1, rys. 6.2, rys. 6.3 i rys. 6.4).



Rys. 6.4 Charakterystyki napięcia indukowanego po stronie wtórnej przekładnika sumującego wyłącznika różnicowoprądowego typu A: $e_A(t)$ oraz typu AC: $e_{AC}(t)$ przy przepływie prądu różnicowego $i_{\Delta}(t)$ o charakterystyce półfalowej wygładzonej

Dla zmniejszenia pulsacji prądu i napięcia pomiarowego w układzie zastosowano kondensator filtrujący C_0 (rys. 6.6). Charakterystyka napięcia pomiarowego na rezystorze R_0 i tożsamego z nią prądu pomiarowego została schematycznie przedstawiona na rys. 6.5.



Rys. 6.5 Teoretyczny przebieg w stanie quasi-ustalonym spadku napięcia na rezystorze pomiarowym R_0

W punkcie p_1 (chwila t_1 na rys. 6.5) napięcie sieci zasilającej jest równe napięciu na kondensatorze. Napięcie sieci zasilającej staje się niższe niż napięcie na kondensatorze C_0 i zaczyna się on rozładowywać. W chwili gdy napięcie sieci zasilającej przyjmuje wartości ujemne dioda prostownicza D przechodzi w stan zaporowy, a kondensator C_0 nadal jest rozładowywany przez rezystancję pomiarową R_0 (rys. 6.6). W chwili t_2 (rys. 6.5) napięcie sieci zasilającej osiąga wartość równą napięciu w częściowo rozładowanym kondensatorze C_0 i ponownie jest on ładowany do wartości maksymalnej napięcia sieci zasilającej, pomniejszonej o spadek napięcia na diodzie D . Spadek napięcia na diodzie D powoduje przesunięcie punktu p_1 do chwili t_1 w stosunku do czasu osiągania wartości maksymalnej napięcia sieci zasilającej t_{Umax} . Różnica napięć pomiędzy wartością minimalną a maksymalną w stanie quasi-ustalonym nazywana jest pulsacją.

Prąd pomiarowy I_M będący ilorazem napięcia $u(t)$ i rezystancji pomiarowej R_0 ma charakterystykę identyczną jak ta przedstawiona na rys. 6.5. Im mniejsza jest wartość pulsacji tym mniejsza zmiana indukcji w rdzeniu przekładnika sumującego wyłącznika różnicowoprądowego i tym samym mniejsza wartość napięcia zaindukowanego po stronie wtórej tego przekładnika. Niewielka wartość napięcia zaindukowanego nie pozwala na uruchomienie wyzwalacza i tym samym zapobiega niechcianym wyzwoleniom wyłącznika różnicowoprądowego podczas pomiaru.



6.3. ZASADA DZIAŁANIA NOWEGO MIERNIKA REZYSTANCJI PĘTLI ZWARCIOWEJ

Nowa metoda pomiaru, która została przez autora opatentowana [6], polega na stopniowym zwiększaniu pulsującego prądu pomiarowego w celu wykonania pomiaru rezystancji pętli zwarciowej bez wyzwalania wyłącznika różnicowoprądowego. Należy zauważyć, że metoda pozwala na pomiar rezystancji pętli zwarciowej, a nie impedancji, ale w obwodach odbiorczych z wyłącznikami różnicowoprądowymi jest to wystarczające, co opisano w rozdziałach 3.4 i 3.5. Błąd wynikający z uproszczenia nie przekracza w praktyce wartości 1%.

Proponowana metoda pomiaru również opiera się na zasadzie sztucznego zwarcia. W pierwszej kolejności mierzone jest napięcie szczytowe pomiędzy przewodem fazowym i przewodem ochronnym, po czym załączana jest rezystancja obciążenia i ponownie mierzone jest napięcie szczytowe między tymi samymi zaciskami, tzn. L i PE. Różnica napięć z obu pomiarów stanowi podstawę do obliczenia rezystancji pętli zwarciowej na podstawie wzoru (6.1).

$$R = R_0 \left(\frac{U_1}{U_2} - 1 \right) \quad (6.1)$$

gdzie:

R – rezystancja pętli zwarciowej,

R_0 – rezystancja obciążenia układu pomiarowego,

U_1 – wartość szczytowa napięcia w miejscu pomiaru bez załączonego obciążenia pomiarowego,

U_2 – wartość szczytowa napięcia w miejscu pomiaru z załączonym obciążeniem pomiarowym.

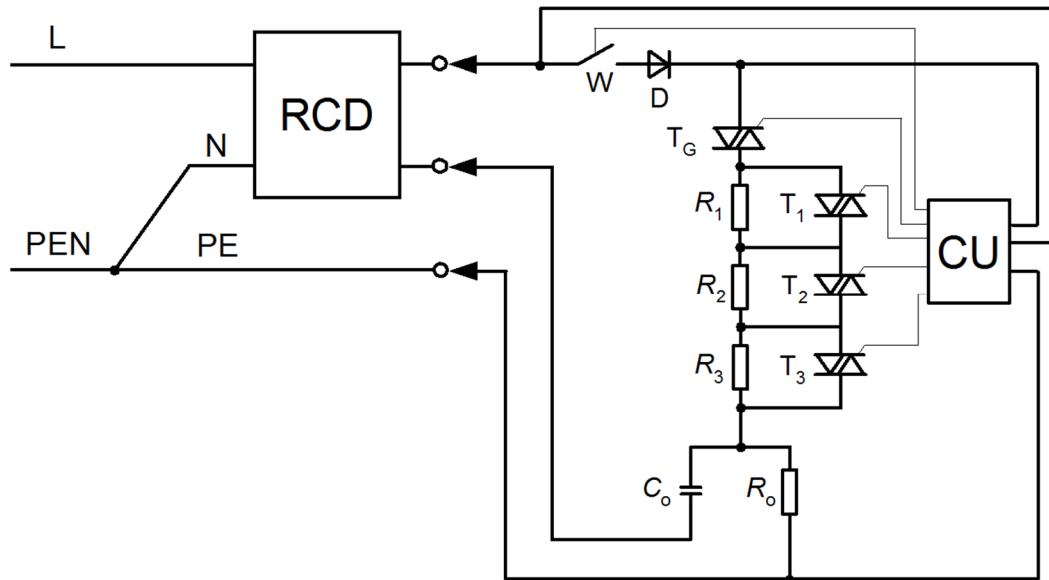
W celu zapobiegania wyzwoleniu wyłącznika różnicowoprądowego chroniącego badany obwód, prąd stały pulsujący jest stopniowo zwiększany i jednocześnie wygładzany przez kondensator filtrujący.

Podstawowy układ pomiarowy składa się zasadniczo z 2 bloków: sterującego i wykonawczo-pomiarowego (rys. 6.6).

Blok sterujący składa się z jednostki sterującej CU (ang. *control unit*) odpowiedzialnej za pomiar napięcia, załączanie triaków oraz łącznika W. Dodatkowo CU odpowiada za wyliczanie rezystancji pętli zwarciowej na podstawie zmierzonych napięć oraz stanowi interfejs komunikacyjny dla użytkownika.



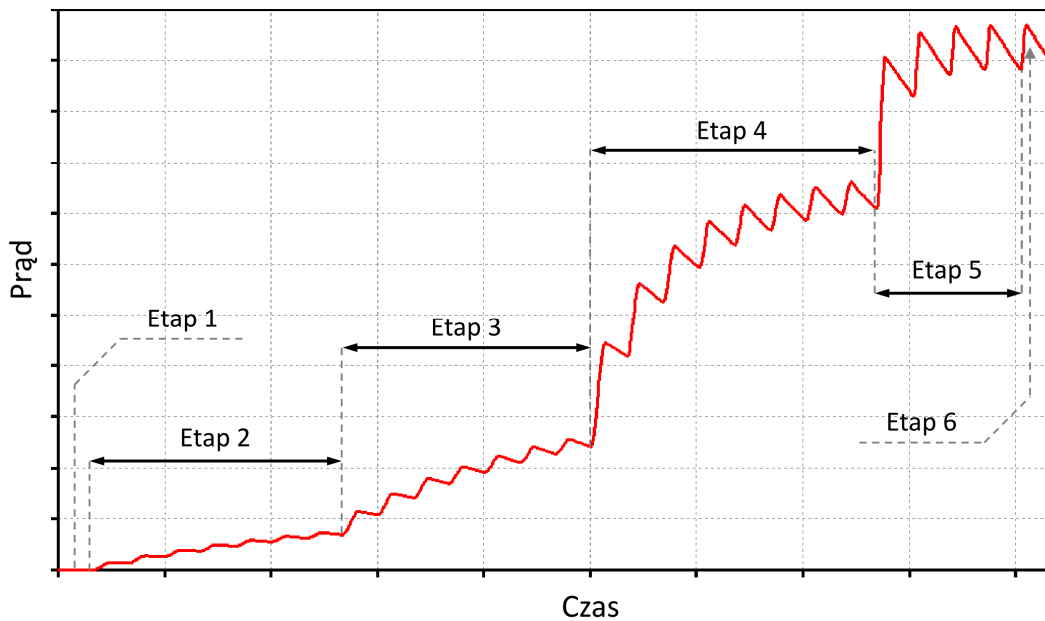
Blok wykonawczo-pomiarowy składa się z łącznika W załączanego w chwili rozpoczęcia pomiaru, diody prostowniczej D , triaków: głównego T_G i triaków bocznikujących T_1 , T_2 , T_3 , rezystorów ograniczających prąd R_1 , R_2 , R_3 oraz rezystora pomiarowego R_0 i kondensatora wygładzającego przebieg prądu pomiarowego C_0 .



Rys. 6.6 Schemat układu do pomiaru rezystancji pętli zwarciowej nową metodą

Procedura pomiaru składa się z 6 etapów następujących po sobie w określonych odstępach czasowych (rys. 6.7). Odstęp pomiędzy poszczególnymi etapami można zmieniać za pomocą ustawień w jednostce sterującej CU:

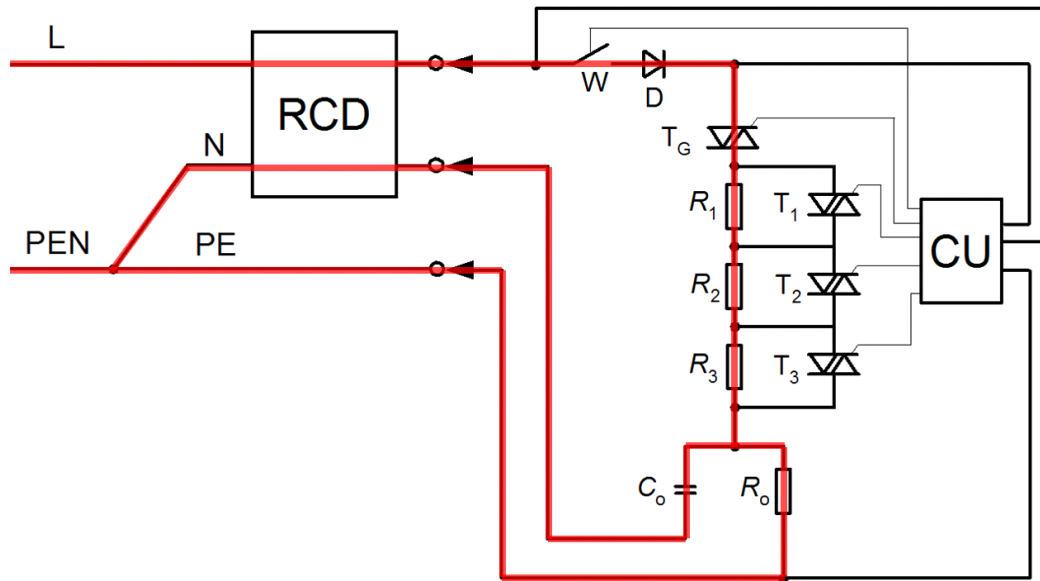
- etap 1 – załączenie łącznika W i pomiar napięcia bez obciążenia pomiarowego R_0 ;
- etap 2 – załączenie triaka głównego T_G ;
- etap 3 – bocznikowanie rezystora R_1 ;
- etap 4 – bocznikowanie rezystora R_2 ;
- etap 5 – bocznikowanie rezystora R_3 ;
- etap 6 – pomiar napięcia przy załączonym obciążeniu pomiarowym R_0 .



Rys. 6.7 Charakterystyka prądu pomiarowego I_{PE} płynącego w przewodzie ochronnym w czasie pomiaru rezystancji pętli zwarcia z podziałem na etapy pomiaru

W chwili rozpoczęcia procedury pomiaru (**etap 1**) załączany jest łącznik W za pomocą sygnału z CU . Wszystkie triaki są w stanie zaporowym i prąd nie płynie przez rezystor pomiarowy. Przy pomocy CU rejestrowany jest przebieg napięcia względem przewodu fazowego i ochronnego za diodą prostowniczą. Z zarejestrowanego przebiegu wybierane są i uśredniane próbki wartości szczytowych napięcia zasilającego, i zapisywane w pamięci, jako wartość U_1 .

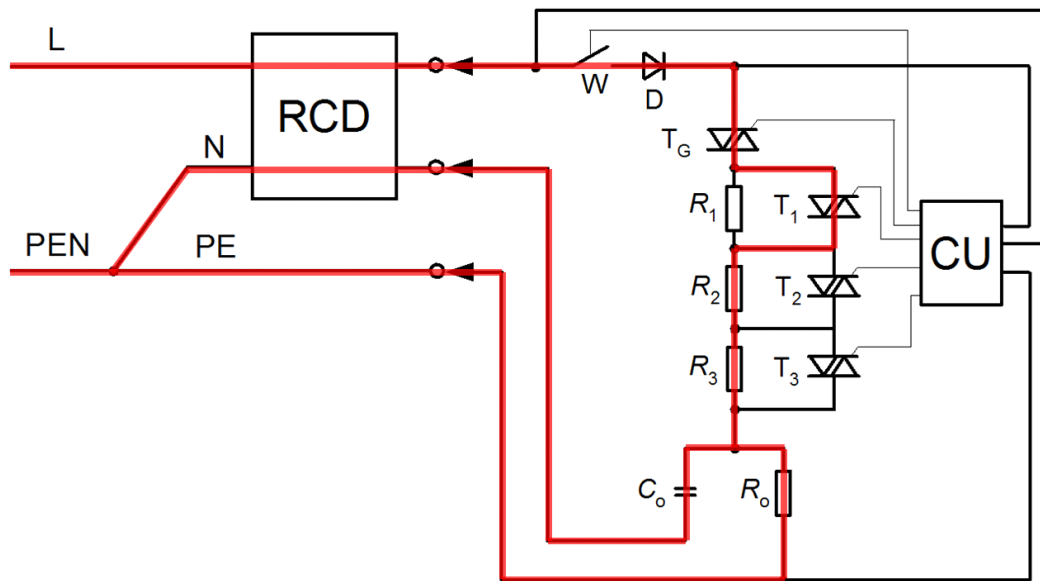
W **etapie 2** triak główny T_G zostaje wysterowany sygnałem z CU i przechodzi ze stanu zaporowego w stan przewodzenia. Prąd płynie przez diodę prostowniczą D , przepuszczając tylko dodatnie półfale prądu. Dalej prąd płynie przez rezystory od R_1 do R_3 ograniczające jego wartość. Sumaryczna wartość rezystancji gałęzi ograniczającej prąd ($R_1 + R_2 + R_3$) jest na tyle duża, że prąd płynący do przewodu ochronnego nie powoduje wyzwolenia wyłącznika RCD. Ostatecznie prąd dzieli się i przepływa częściowo przez rezystor pomiarowy R_0 i kondensator C_0 , co powoduje jego ładowanie. Początkowo rozładowany kondensator (o niewielkiej rezystancji wewnętrznej) powoduje ograniczenie prądu płynącego przez R_0 , następuje łagodne narastanie prądu pomiarowego wraz z narastaniem napięcia zasilającego. Jest to kluczowy proces pozwalający na ograniczenie zmian indukcji magnetycznej w rdzeniu przekładnika sumującego i braku reakcji na przepływ takiego prądu przez wyłącznik RCD.



Rys. 6.8 Przepływ prądu w układzie pomiarowym w 2 etapie pomiaru
(kolorem czerwonym oznaczono drogę przepływu prądu)

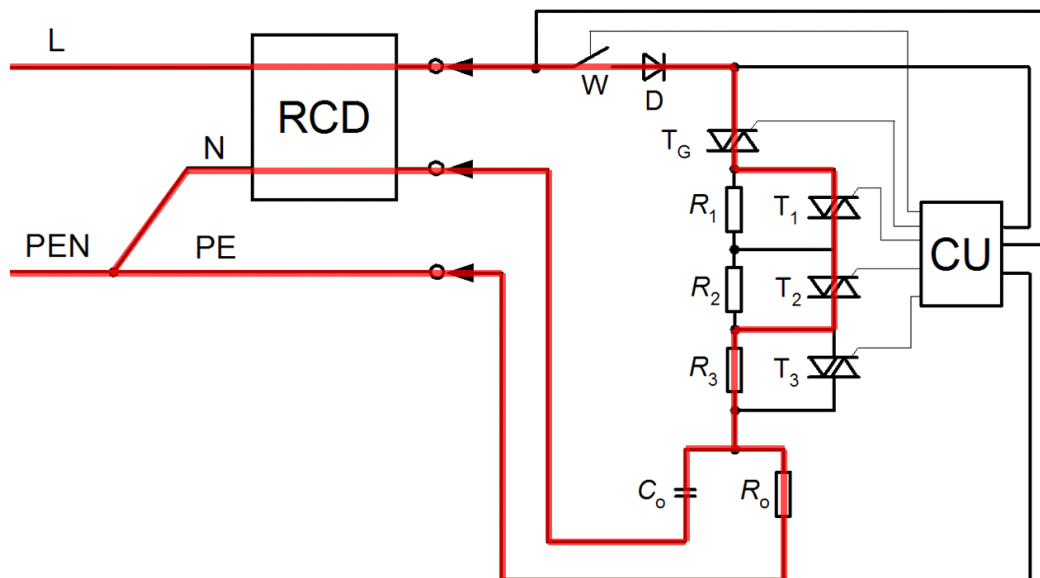
Z każdym dodatnim przebiegiem napięcia zasilającego kondensator C_0 jest doładowywany, natomiast w chwili, gdy napięcie zasilające przechodzi przez zero i przyjmuje wartości ujemne dioda prostownicza wchodzi w stan zaporowy i blokuje przepływ prądu z sieci zasilającej (przebieg jednopółkowy). W tej chwili kondensator C_0 zaczyna się rozładowywać się przez rezystancję pomiarową R_0 . Takie rozwiązanie powoduje, że wartość prądu płynącego przez R_0 nie zmienia się skokowo, co zapobiega zaindukowaniu się w uzwojeniu wtórnym przekładnika sumującego wyłącznika RCD odpowiednio wysokiego napięcia niezbędnego do wyzwolenia tego wyłącznika.

W chwili rozpoczęcia **etapu 3**, sygnał sterujący z CU wprowadza triak T_1 w stan przewodzenia i tym samym powoduje zbocznikowanie rezystora R_1 (triaki T_2 i T_3 są nadal w stanie zaporowym). Wypadkowa rezystancja obwodu pomiarowego zmniejsza się i zaczyna płynąć większy prąd przez rezystor R_0 oraz kondensator C_0 . Kondensator ładuje się do napięcia wyższego niż wcześniej w związku z obniżeniem całkowitej rezystancji toru jego ładowania.

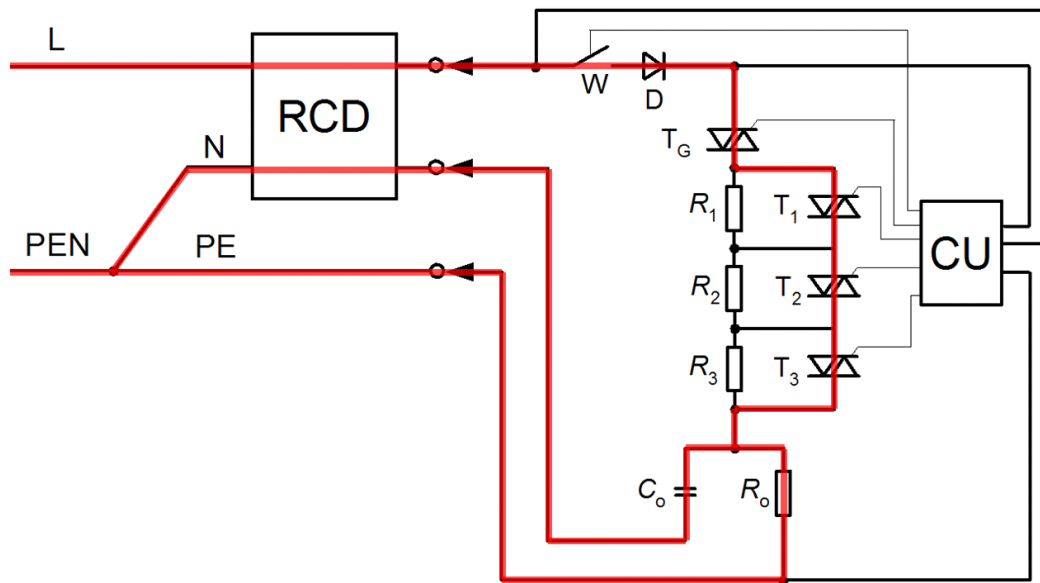


Rys. 6.9 Przepływ prądu w układzie pomiarowym w 3 etapie pomiaru (kolorem czerwonym oznaczono drogę przepływu prądu)

Etapy 4 (rys. 6.10) i **5** (rys. 6.11) są analogiczne do etapu 3 z tym, że załączane są odpowiednio triaki T_2 i T_3 , przez co bocznikowane są kolejno rezystory R_2 i R_3 . Prąd pomiarowy stopniowo się zwiększa, aż do osiągnięcia wartości szczytowej zależnej od rezystancji pomiarowej R_0 . Kondensator ładuje się w kolejnych cyklach do wartości maksymalnej.



Rys. 6.10 Przepływ prądu w układzie pomiarowym w 4 etapie pomiaru (kolorem czerwonym oznaczono drogę przepływu prądu)



Rys. 6.11 Przepływ prądu w układzie pomiarowym w 5 etapie pomiaru (kolorem czerwonym oznaczono drogę przepływu prądu)

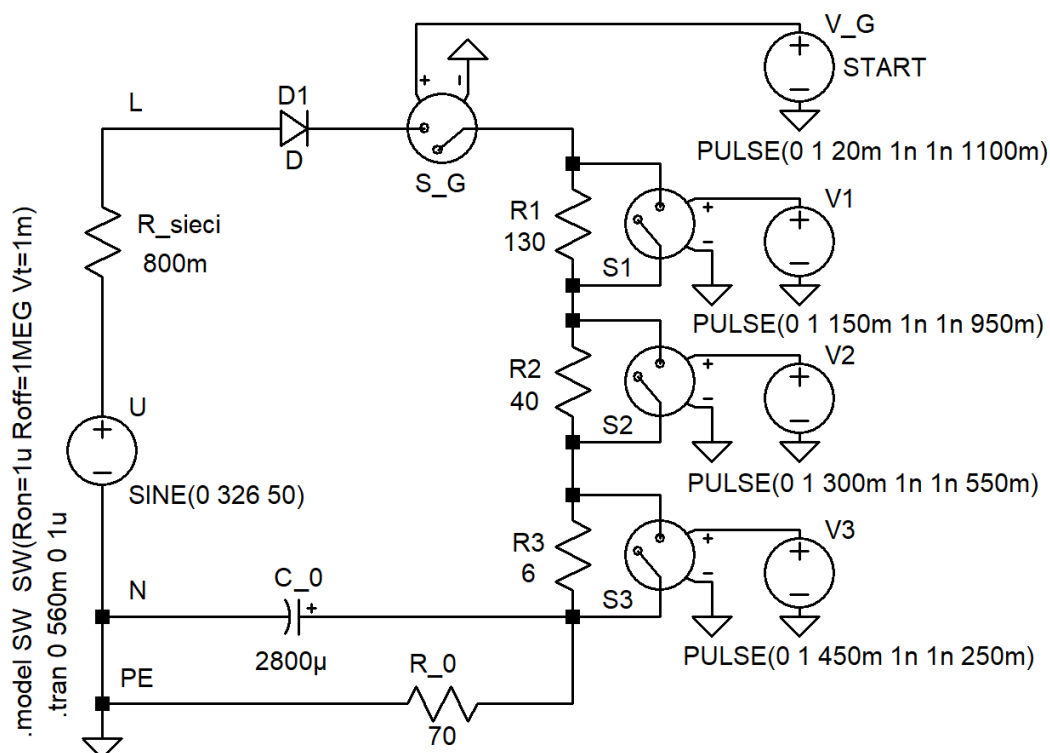
W etapie 6, po ustabilizowaniu się układu (naładowaniu kondensatora C_0 do wartości maksymalnej), następuje pomiar napięcia szczytowego U_2 za diodą prostowniczą D , w sposób analogiczny jak w przypadku pomiaru w etapie 1.

Zakończenie pomiaru odbywa się w odwrotnej kolejności, ale odstępy czasowe pomiędzy poszczególnymi etapami są krótsze. Triaki są kolejno wyłączane począwszy T_3 do T_1 oraz T_G . Ostatni wyłączany jest łącznik W odłączając miernik od obwodu badanego. Stopniowe wyłączanie triaków wykonywane jest w celu rozładowania kondensatora C_0 , zapobiega to również wyzwoleniu wyłącznika po zakończeniu pomiaru przez gwałtowną zmianę wartości prądu płynącego przez przewód PE.

6.4. SYMULACJE

Proces weryfikacji nowej metody rozpoczęto od symulacji komputerowych w celu dobrania odpowiednich elementów składowych układu. Stworzono komputerowy model układu pomiarowego za pomocą środowiska symulacyjnego LTspice. Przy użyciu narzędzi dostępnych w programie, przygotowano schemat układu pomiarowego przedstawiony na rys. 6.12. Dla ułatwienia i przyspieszenia symulacji, w miejsce triaków T_1 , T_2 , T_3 i T_G z rys. 6.6 wstawiono łączniki odpowiednio S_1 , S_2 , S_3 i S_G symulujące pracę triaków. Pominięto łącznik W , ponieważ jest on zbędny do symulacji i niepotrzebnie komplikował układ. Dla łączników S przyjęto model

rezystancji zestyku na poziomie $1\text{ m}\Omega$ dla łącznika zamkniętego i $1\text{ M}\Omega$ dla łącznika otwartego. Łączniki w programie sterowane są napięciowo za pomocą źródeł napięciowych o przebiegu impulsowym prostokątnym z możliwą regulacją czasu załączenia i wyłączenia impulsu. Źródła napięciowe oznaczono odpowiednio dla łączników jako V1, V2, V3 i V_G. Elementy takie jak diody, kondensatory i rezystory zaczerpnięto wprost z bazy danych programu symulacyjnego jako elementy podstawowe.



Rys. 6.12 Schemat symulowanego układu z programu LTSpice. Podane wartości są przykładowe

Na schemacie symulacyjnym dodano źródło U wymuszające przebieg napięcia sinusoidalnego o amplitudzie 326V (wartość skuteczna około 230V) i częstotliwości 50 Hz oraz rezystor R_{sieci} symulujący rezystancję pętli zwarciowej mierzonego obwodu.

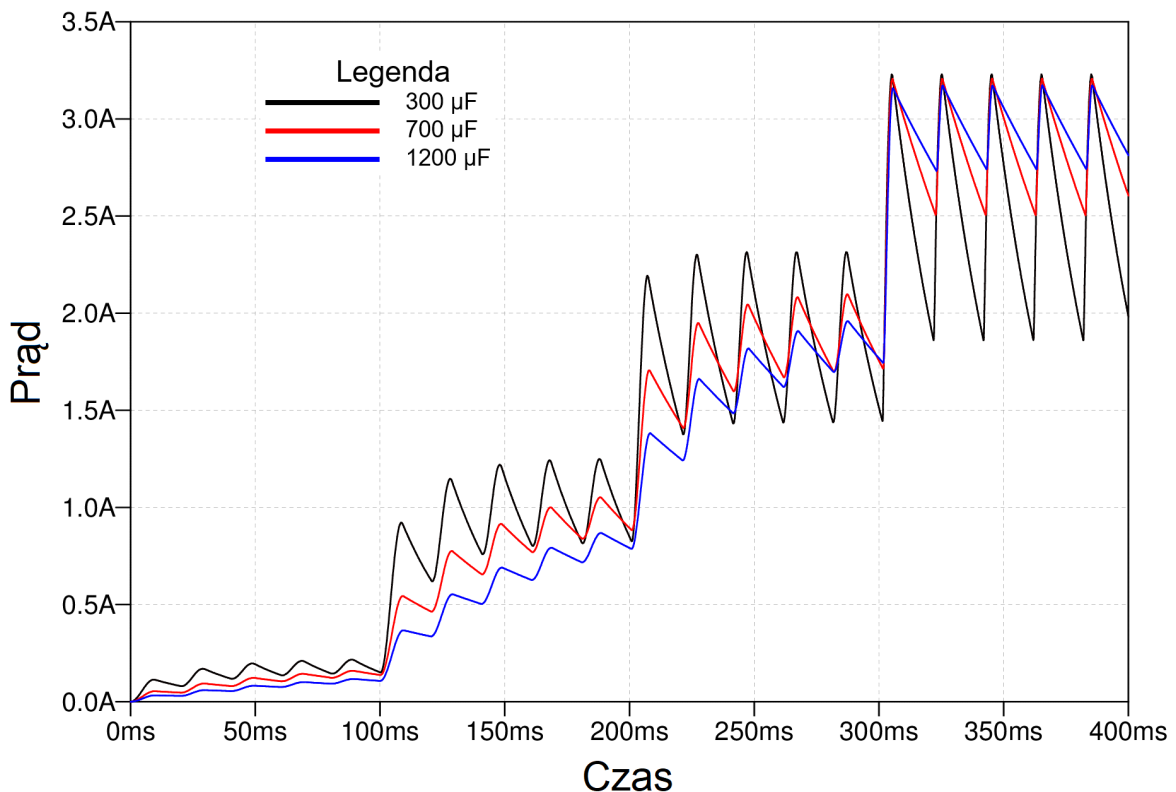
Wykonanie symulacji pozwoliło na odpowiednie dobranie parametrów poszczególnych elementów układu tak, aby uzyskać przebieg prądu niepowodujący zadziałania wyłącznika RCD. Ważnym parametrem było sprawdzenie wartości mocy strat na rezystorach R1-R3 i R_0 tak, aby dobrać ich moc znamionową podczas budowy stanowiska laboratoryjnego.

Podczas procesu symulacji zmieniano rezystancję i pojemność układu pomiarowego. Wartości rezystancji R1, R2, R3 i R_0 oraz pojemności C_0 dobrano tak, aby stromość zbocza

narastającego prądu w przewodzie ochronnym była jak najmniejsza i nie powodowała wyzwania wyłącznika RCD podczas pomiaru. W tym celu przeprowadzono szereg testów i symulacji określając zależności wpływu zmian parametrów wspomnianych elementów na charakterystykę prądu pomiarowego.

– Wpływ zmiany pojemności C_0

Zwiększanie pojemności kondensatora filtrującego pozytywnie wpływa na zmniejszenie tętnienia prądu pomiarowego, ale jednocześnie zmniejsza jego amplitudę i powoduje pobór znacznych impulsów prądu z sieci do ładowania dużej pojemności kondensatora, co wymusza konieczność stosowania diody prostowniczej o znacznej maksymalnej mocy strat.

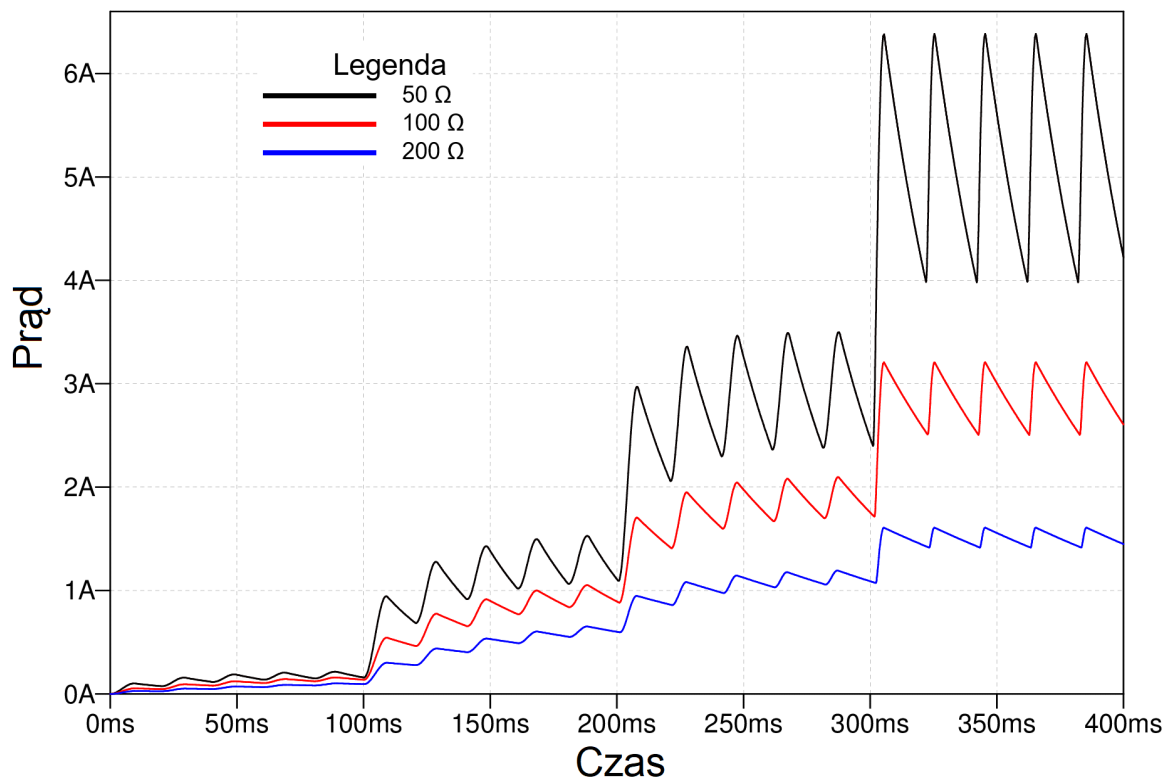


Rys. 6.13 Charakterystyka prądu pomiarowego w przewodzie PE dla różnych pojemności kondensatora C_0 . $R_0 = 100 \Omega$

Warto zwrócić uwagę, że wraz ze wzrostem pojemności kondensatora C_0 zwiększa się przesunięcie fazowe napięcia U_2 względem napięcia U_1 . Jest to efekt niepożądany z uwagi na rosnący wpływ pojemności kondensatora, a w zasadzie jego impedancji zastępczej na wartość sumaryczną obciążenia pomiarowego.

– **Wpływ zmiany rezystancji R_0**

Zmniejszanie rezystancji pomiarowej R_0 powoduje wzrost amplitudy prądu pomiarowego, co jest istotne z punktu widzenia dokładności pomiaru (zmniejszenie błędów pomiarowych), ale jednocześnie powoduje to szybsze rozładowanie kondensatora C_0 i tym samym zwiększenie tętnienia prądu, co może przyczynić się do niechcianego wyzwolenia wyłącznika.



Rys. 6.14 Charakterystyka prądu pomiarowego w przewodzie PE dla różnych rezystancji rezystora R_0 .
 $C_0 = 700\mu\text{F}$

Wstępnie dobrane parametry zostały wykorzystane przy budowie stanowiska laboratoryjnego (rozdział 6.6), gdzie w procesie weryfikacji eksperymentalnej dobrano ostateczne wartości elementów układu, tak by z jednej strony amplituda prądu pomiarowego była jak największa, ale jego tętnienie na tyle małe, by nie powodować niechcianego wyzwolenia wyłącznika RCD.



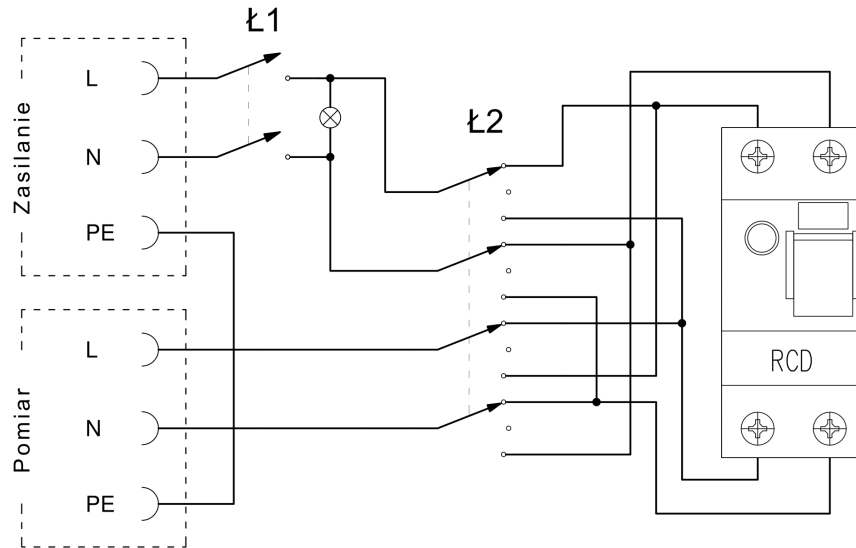
6.5. PRZYSTAWKA DO BADANIA WYŁĄCZNIKÓW RÓŻNICOWOPRĄDOWYCH

Podczas różnych badań z wykorzystaniem wyłączników RCD i mierników impedancji pętli zwarciowej wielokrotnie przyłączano różne mierniki do wyłączników. Każdorazowe przyłączenie wyłącznika do układu laboratoryjnego oraz zmiana polaryzacji (tzn. umownego przepływu prądu przez wyłącznik podczas pomiaru np. podczas badań z rozdziału 4.3) było problematyczne i czasochłonne. W celu zwiększenia powtarzalności pomiarów przez zachowanie równych odstępów czasu pomiędzy poszczególnymi pomiarami, również przy zmianie polaryzacji, autor rozprawy zaprojektował, zbudował i przetestował przystawkę pomiarową do badania wyłączników RCD.

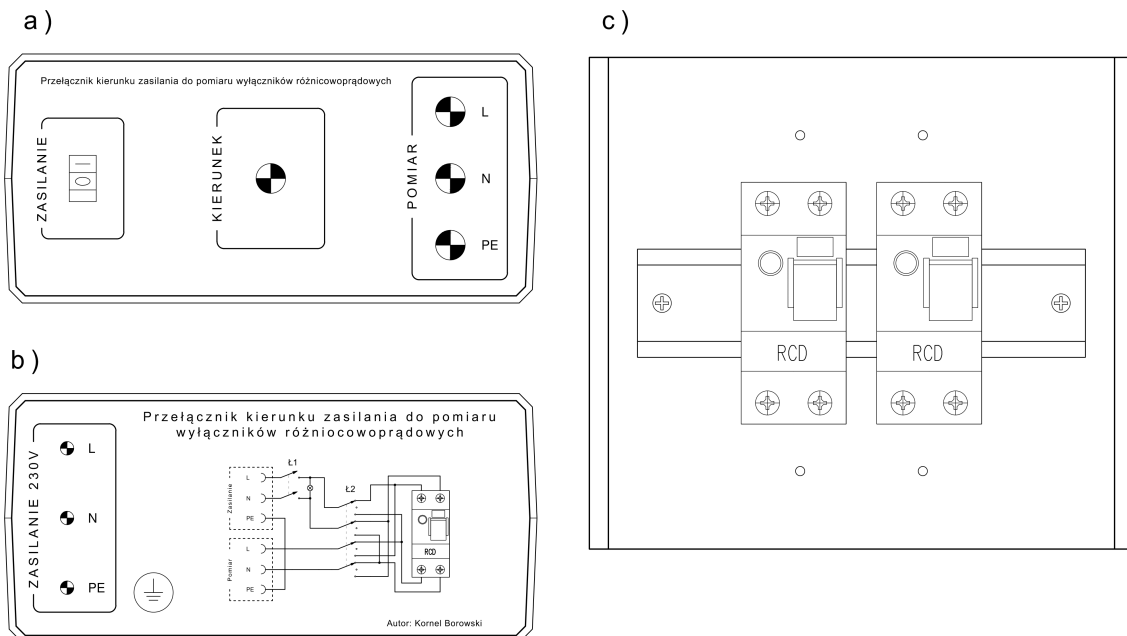
Głównymi założeniami konstrukcji było: możliwość szybkiej zmiany polaryzacji wyłącznika w obwodzie badanym, łatwość przyłączenia wyłączników za pomocą giętkich przewodów oraz zwiększenie bezpieczeństwa podczas pomiarów. Wszystkie postawione założenia i wymagania zostały spełnione.

Za obudowę przystawki posłużyła izolowana plastikowa obudowa typu Z1P o wymiarach 198 mm x 188 mm x 70 mm. Na wierzchu obudowy zainstalowano odcinek typowej szyny montażowej TH35 do szybkiego i pewnego montażu i demontażu badanych wyłączników. Przez otwory w górnej płycie wyprowadzono 4 giętkie przewody zakończone zaprasowanymi końcówkami kablowymi do przyłączenia wyłączników. Na panelu frontowym (rys. 6.16 a) umieszczono wyłącznik główny z podświetleniem w postaci łącznika 2-biegunowego (rys. 6.15 – oznaczenie Ł1). Głównym założeniem instalacji wyłącznika głównego było zwiększenie bezpieczeństwa przez wyłączenie zasilania sieci odłączając przewód fazowy i neutralny. Miało to zapobiec pojawieniu się niebezpiecznego napięcia w układzie w przypadku zamiany przewodów zasilających L z N i odłączaniu tylko jednego przewodu. Przy błędnym połączeniu odłączany mógłby być tylko przewód N zasilania stwarzając zagrożenie dla użytkownika. Dodatkowo lampka wbudowana w łącznik informuje użytkownika o obecności napięcia zasilającego doprowadzonego do badanego wyłącznika. Element pozwalający na przełączanie kierunku zasilania wyłącznika różnicowoprądowego (rys. 6.15 – oznaczenie Ł2) to 4-biegunowy trzypozycyjny dźwigniowy łącznik mechaniczny typu I-0-II. Pozycja środkowa wyłącznika rozłącza zasilanie wyłącznika z obu stron. Na panelu tylnym (rys. 6.16 b) osadzono gniazda laboratoryjne do przyłączenia zasilania z sieci, natomiast na panelu przednim (rys. 6.16 a) gniazda laboratoryjne bezpieczne

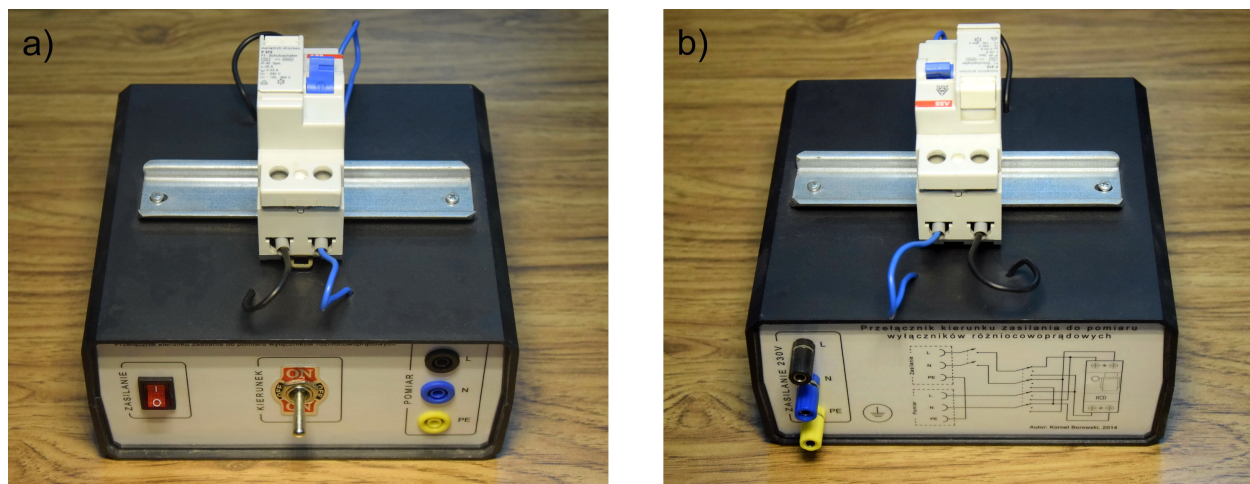
(z kołnierzem) do przyłączenia odbiornika lub miernika. Widok gotowego urządzenia przedstawiono na rys. 6.17. Przystawki nie wyposażono w elementy zabezpieczeń przetężeniowych i zwarciovych, ponieważ były one zamontowane w laboratoryjnej tablicy rozdzielczej, z której zasilany był cały układ badawczy.



Rys. 6.15 Schemat układu przełącznika kierunku zasilania wyłączników różnicowoprądowych



Rys. 6.16 Widok projektu przełącznika kierunku zasilania wyłączników różnicowoprądowych: a) panel przedni, b) panel tylny, c) widok z góry



Rys. 6.17 Zdjęcie przełącznika kierunku zasilania wyłączników różnicowoprądowych: a) widok z przodu, b) widok z tyłu

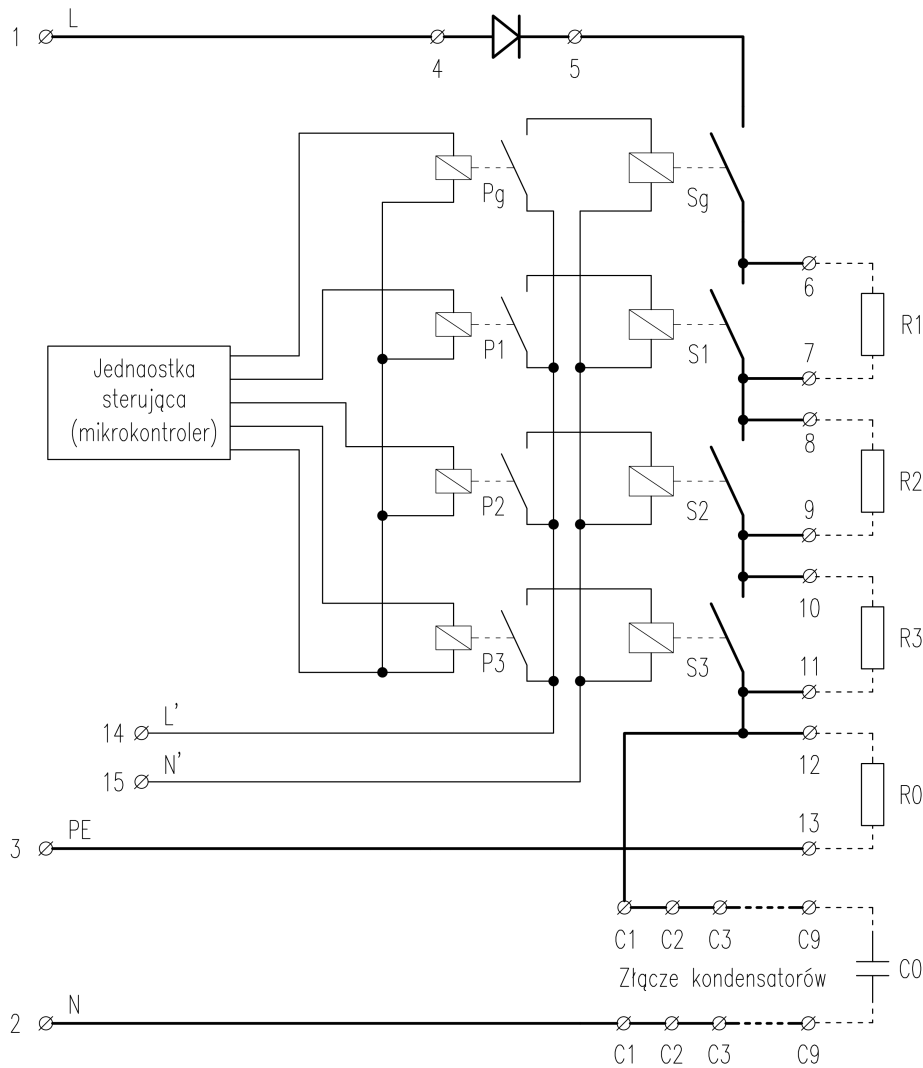
6.6. BUDOWA STANOWISKA LABORATORYJNEGO – MIERNIK REZYSTANCJI PĘTLI ZWARCIOWEJ

Symulacje w programach obliczeniowych pozwoliły na dobór odpowiednich elementów układu eksperymentalnego miernika rezystancji pętli zwarciowej oraz sprawdzenie poprawności jego działania. Założenia poczynione na etapie symulacji nie uwzględniają jednak wszystkich parametrów rzeczywistego układu oraz wpływu czynników zewnętrznych. Dla sprawdzenia poprawności założeń oraz wykonania rzeczywistych pomiarów i tym samym udowodnienia tezy głównej tej rozprawy doktorskiej, autor rozprawy zbudował stanowisko laboratoryjne zawierające model nowego miernika rezystancji pętli zwarciowej [92].

Głównym założeniem pierwszej wersji stanowiska laboratoryjnego była prosta budowa z możliwością łatwej rekonfiguracji i dalszej rozbudowy. Zadbano również o możliwość łatwego przyłączenia elementów pomiarowych niezbędnych podczas badań, za pomocą złącz śrubowych. Optymalizacja wielkości i ciężaru samego miernika nie były brane pod uwagę w pierwszej wersji układu ze względu na jego laboratoryjny i eksperymentalny charakter.

Główną różnicą pomiędzy pierwszą wersją miernika, a podstawowym schematem układu do pomiaru rezystancji pętli zwarciowej (rys. 6.6), to sposób bocznikowania rezystorów i załączania układu. Na schemacie podstawowym zastosowano triaki natomiast w stanowisku laboratoryjnym zastąpiono je stycznikami, podobnie jak na schemacie symulacyjnym z rys. 6.12. Główną zaletą stosowania styczników była łatwość ichysterowania oraz pełna separacja galwaniczna pomiędzy układem pomiarowym a układem sterującym. Schemat układu stanowiska

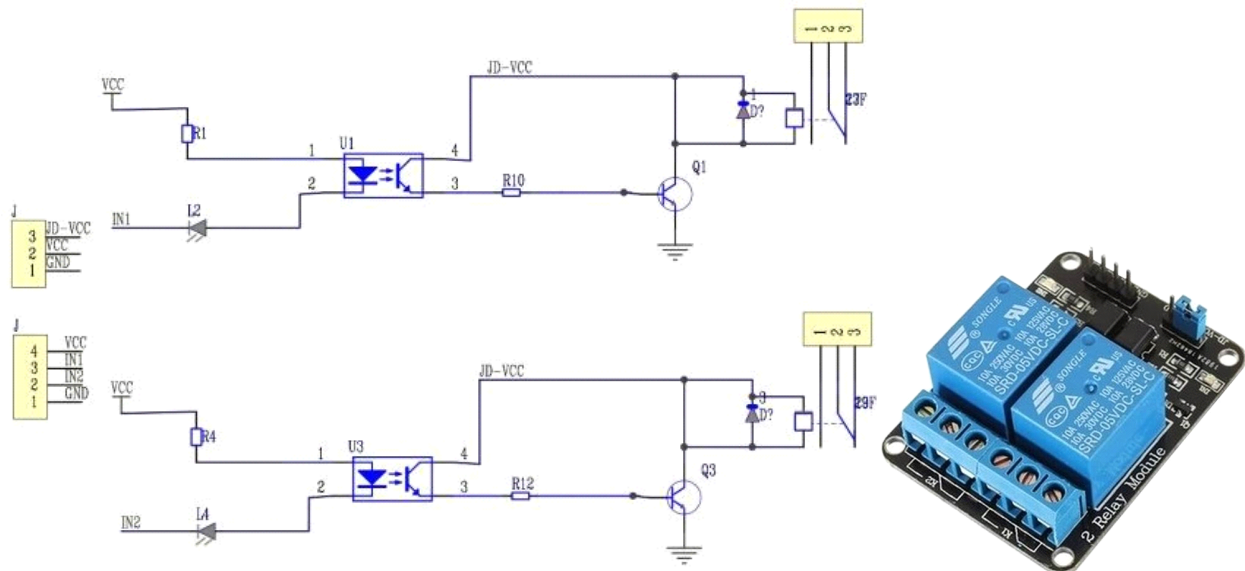
laboratoryjnego przedstawiono na rys. 6.18. Wadą styczników jest ich duży gabaryt, ciężar oraz konieczność doprowadzenia dodatkowego zasilania do sterowania ich cewkami.



Rys. 6.18 Schemat stanowiska laboratoryjnego (wersja 1)

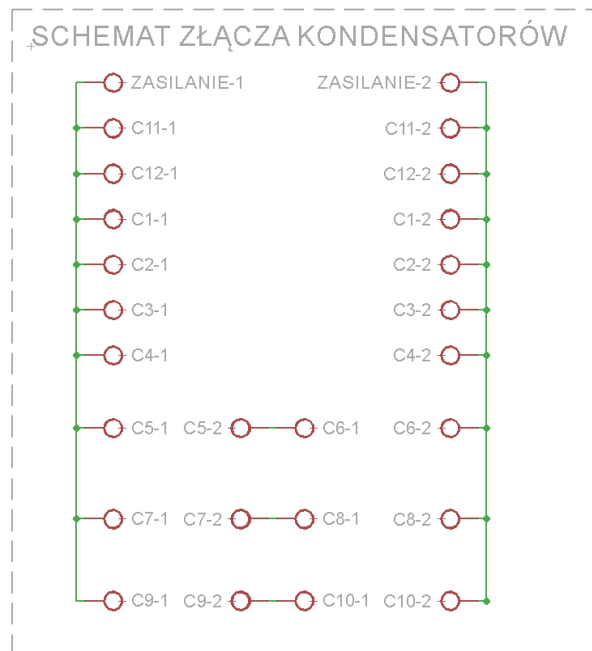
Stanowisko laboratoryjne wyposażono w złącza śrubowe typu ZUG-4 do przyłączenia przewodów o maksymalnym przekroju 4 mm^2 [93]. Złącza zostały umieszczone na skraju stanowiska dla łatwego przyłączania. Złącze śrubowe wykorzystano również do przyłączenia diody prostowniczej D (zaciski 4 i 5 na rys. 6.18) w celu jej łatwej wymiany. Bocznikowanie rezystorów R1 - R3 odbywa się za pomocą styczników IDX-23 o maksymalnym prądzie termicznym I_{th_s} równym 60 A na każdy z 3 torów stycznika. W układzie wykorzystano po 1 torze dla każdego stycznika. Napięcie robocze cewek styczników IDX-23 wynosi 220 V prądu przemiennego ale producent dopuszcza zasilanie ich napięciem 230 V [94]. Dla zapewnienia

sterowania styczników Sg, S1, S2 i S3 zastosowano przekaźniki SRD-5VDC-SL-C, których cewka sterowana jest napięciem stałym o wartości 5 V [95]. Przekaźniki zamontowane są parami na pomocniczej płytce drukowanej wyposażonej w transoptory zapewniające pełną izolację galwaniczną i zmniejszające pobór prądu z obwodów wyjściowych mikrokontrolera. Takie rozwiązanie pozwoliło na bezpieczne załączanie styczników bocznikujących oraz dopasowanie napięć wyjściowych mikrokontrolera i cewek styczników. Zasilanie cewek przekaźników doprowadzono bezpośrednio z płytki modułu sterowania. Dla uproszczenia schematu przedstawionego na rys. 6.18 transoptory i elementy dodatkowe płytek pomocniczych przekaźników Pg, P1, P2 i P3 zostały pominięte. Szczegółowy schemat modułu przekaźników wraz z widokiem płytki drukowanej przedstawiono na rys. 6.19.

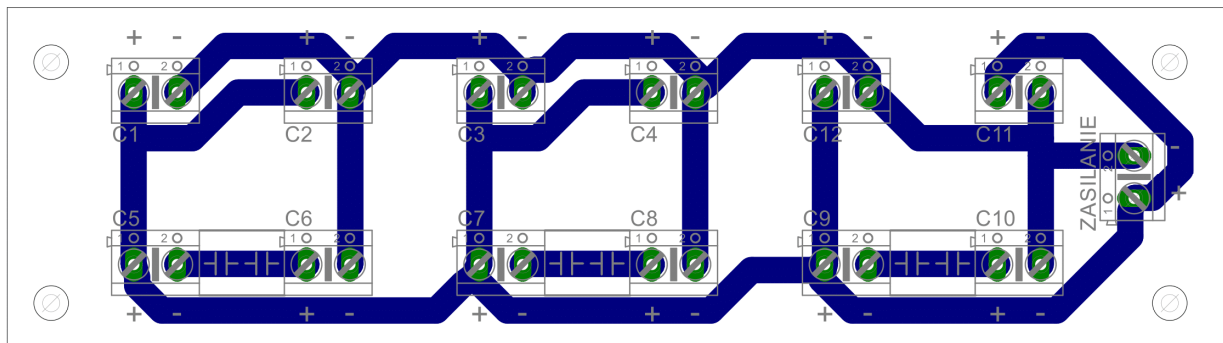


Rys. 6.19 Schemat i widok modułu przekaźników z optoizolacją [96]

Rezystory R1 - R3 oraz R0 (rys. 6.18) przyłączono za pomocą przewodów do złącz śrubowych o numerach od 6 do 13. Umożliwia to szybką wymianę rezystora. Do przyłączenia kondensatora C_0 zaprojektowano i wykonano przystawkę opisaną na schemacie (rys. 6.18) jako złącze kondensatorów. Dzięki niemu możliwe jest równoległe i szeregowe przyłączenie maksymalnie do 12 kondensatorów w konfiguracji 6 równoległe i 3 zestawy po 2 kondensatory połączone szeregowo. Złącze kondensatorów daje duże możliwości przyłączenia kondensatorów o różnych wartościach pojemności, dzięki czemu można uzyskać pożądaną pojemność sumaryczną. Schemat złącza kondensatorów przedstawiono na rys. 6.20, natomiast układ ścieżek płytki drukowanej na rys. 6.21.



Rys. 6.20 Schemat złącza kondensatorów



Rys. 6.21 Układ ścieżek i opisów płytki drukowanej złącza kondensatorów

Do zacisków śrubowych 14 i 15 (rys. 6.18) przyłączono odpowiednio przewód fazowy i neutralny zasilania pomocniczego do zasilania cewek styczników (oznaczenie L' i N'). Zasilanie doprowadzane jest z oddzielnego obwodu instalacji lub sprzed wyłącznika różnicowoprądowego zabezpieczającego badany obwód. Takie rozwiązanie nie wprowadza dodatkowego obciążenia dla obwodu badanego wyłącznika różnicowoprądowego. Niedogodność związana z przyłączaniem dodatkowego obwodu zasilającego występuje tylko w wersji laboratoryjnej miernika. Kolejna wersja będąca w trakcie opracowania, opisana w rozdziale 7.2, nie wymaga dodatkowego zasilania, ponieważ styczniki i przekaźniki zastąpiono triakami.

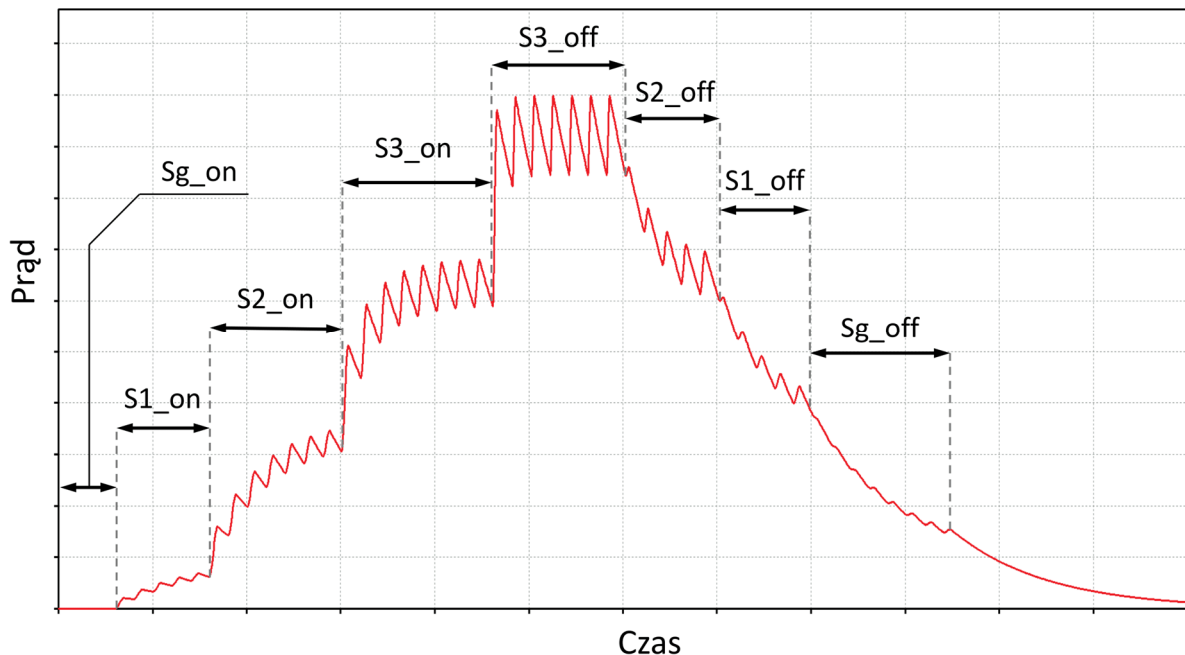


Do sekwencyjnego załączania przekaźników zasilających odpowiednie cewki styczników wykorzystano moduł Arduino Leonardo z mikrokontrolerem ATmega32u4 [97]. Zasilanie modułu jednostki sterującej doprowadzono bezpośrednio ze złącza USB połączonego z komputerem. Połączenie USB umożliwia również programowanie mikrokontrolera oraz komunikację pomiędzy modułem a komputerem w celu rozpoczęcia pomiaru, zmiany ustawień czy odczytu danych.

Program sterujący został napisany w środowisku Arduino IDE w języku programowania C. Program mikrokontrolera pozwala na dwukierunkową komunikację pomiędzy mikrokontrolerem i komputerem z wykorzystaniem komunikacji szeregowej realizowanej również przez złącze USB. W programie zdefiniowano czasy załączenia i wyłączenia poszczególnych styczników, pośrednio przez przekaźniki tak, aby prąd pomiarowy stopniowo narastał jak pokazano na rys. 6.7. Czasy załączeń i wyłączeń styczników zostały wstępnie oszacowane na podstawie symulacji, natomiast dokładne ich wartości ustalono w trakcie badań na stanowisku laboratoryjnym. Zestawienie zmiennych użytych w programie (kod programu sterującego w rozdz. 11) wraz z objaśnieniem przedstawiono w tab. 6.1. Graficzną reprezentację czasów załączenia i wyłączenia przekaźników przedstawiono na rys. 6.22.

Tab. 6.1 Zmienne programu sterującego

Zmienna	Opis zmiennej
Sg_on	Zwłoka w załączeniu stycznika Sg w milisekundach
S1_on	Zwłoka w załączeniu stycznika S1 w milisekundach
S2_on	Zwłoka w załączeniu stycznika S2 w milisekundach
S3_on	Zwłoka w załączeniu stycznika S3 w milisekundach
Sg_off	Zwłoka w wyłączeniu stycznika Sg w milisekundach
S1_off	Zwłoka w wyłączeniu stycznika S1 w milisekundach
S2_off	Zwłoka w wyłączeniu stycznika S2 w milisekundach
S3_off	Zwłoka w wyłączeniu stycznika S3 w milisekundach

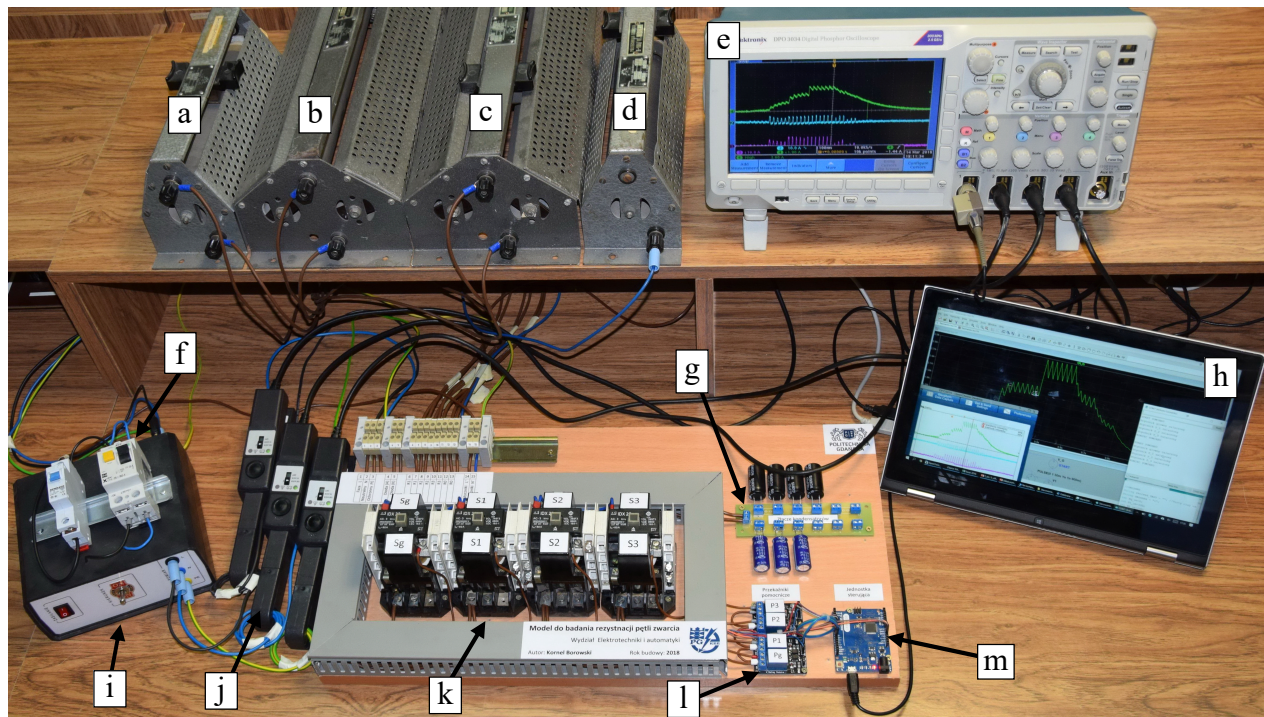


Rys. 6.22 Charakterystyka prądu pomiarowego I_{PE} płynącego w przewodzie ochronnym z zaznaczonymi czasami opóźnienia załączenia i wyłączenia styczników

Czasy załączenia i wyłączenia styczników są w przybliżeniu takie same jak czasy załączenia i wyłączenia przekaźników. Różnica pomiędzy nimi wynika z opóźnienia reakcji cewki stycznika w stosunku do reakcji styków przekaźnika. Na potrzeby badań laboratoryjnych stanowiska testowego to opóźnienie nie stanowiło problemu. Problem ten nie będzie występował w kolejnej wersji miernika gdzie styczniki zostaną zastąpione przez triaki.

Na rys. 6.23 zaprezentowano widok kompletnego stanowiska laboratoryjnego miernika rezystancji pętli zwarciowej bez wyzwalania wyłączników różnicowoprądowych z wykorzystaniem nowej metody. Na rysunku zaznaczono poszczególne elementy układu opisane szczegółowo powyżej. Do pomiaru napięć i prądów wykorzystano oscyloskop cyfrowy wraz z sondami prądowymi wyposażonymi w przekładniki prądowe w postaci cęgów. Miernikiem można sterować za pomocą komputera wyposażonego w terminal komunikacyjny. Komenda „START” wysłana do mikrokontrolera z komputera za pomocą portu szeregowego pozwala na rozpoczęcie sekwencji pomiaru. Jednocześnie w oknie terminalu komunikacyjnego wyświetlane są zrealizowane etapy pomiaru jak np. załączenie i wyłączenie poszczególnych styczników oraz informacja o zakończeniu pomiaru. Alternatywną metodą rozpoczęcia pomiaru bez użycia komputera jest podanie stanu niskiego na pin 0 mikrokontrolera (zwarcie pinu 0 z masą mikrokontrolera, np. za pomocą przycisku). W przypadku rezygnacji z komputera należy

doprowadzić dodatkowe zasilanie do płytki mikrokontrolera za pomocą złącza USB (5 V) lub za pomocą gniazd DC z zasilacza prądu stałego o napięciu 12 V.



Rys. 6.23 Widok kompletnego stanowiska laboratoryjnego miernika rezystancji pętli zwarciowej: a - rezystor R_0 , b - rezystor R_1 , c - rezystor R_2 , d - rezystor R_3 , e - oscyloskop cyfrowy, f - wyłącznik różnicowoprądowy, g - złącze kondensatorów (C_0), h - komputer sterujący, i - przystawka do pomiaru wyłączników RCD, j - cęgi prądowe, k - styczniki (od lewej Sg, S1, S2, S3), l - przełączniki pomocnicze, m - jednostka sterująca (mikrokontroler)

6.7. WYNIKI BADAŃ

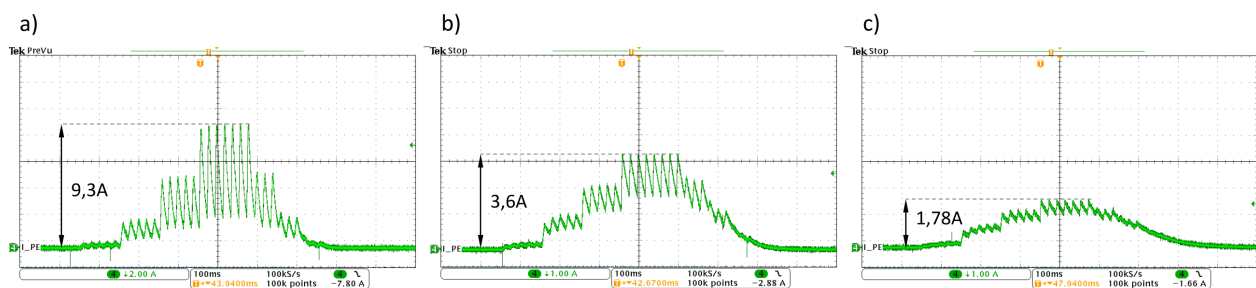
Badania związane z nową metodą pomiaru rezystancji pętli zwarciowej nie powodującą wyzwalań wyłączników różnicowoprądowych podczas pomiaru [98, 99] opierały się głównie na odpowiednim doborze charakterystyki prądu pomiarowego. Symulacje przeprowadzone w programie LTspice (rozdział 6.4) umożliwiły wstępny dobór rezystancji rezystorów $R_0 - R_3$ i kondensatora C_0 , tak by prąd pomiarowy narastał stopniowo. Zbyt gwałtowna zmiana prądu pomiarowego będącego jednocześnie prądem różnicowym dla wyłącznika RCD mogłaby spowodować zaindukowanie się odpowiednio wysokiego napięcia po stronie wtórnej jego przekładnika sumującego i w konsekwencji niechciane wyzwolenie wyłącznika. W symulacjach sprawdzono również wartości prądów płynących przez różne elementy układu i obliczono straty mocy w celu dobrania odpowiednich podzespołów.

W trakcie badań wykonano szereg pomiarów z różnymi parametrami elementów mających wpływ na charakterystykę prądu pomiarowego, tj. rezystorów od R_0 do R_3 i kondensatora C_0 . Wartość sumaryczna rezystancji rezystorów R_1 , R_2 , R_3 ma wpływ na ograniczenie wartości prądu w drugim etapie pomiaru (pierwszy etap związany jest z załączeniem miernika i pomiarem napięcia sieci bez obciążenia pomiarowego). Odpowiednio rezystory R_2 i R_3 (połączone szeregowo) ograniczają prąd w etapie trzecim, a rezystor R_3 ogranicza prąd w etapie czwartym. Podczas testów zmieniano rezystancję rezystora R_0 (50Ω , 100Ω , 200Ω) i pojemność kondensatora C_0 ($300 \mu\text{F}$, $700 \mu\text{F}$, $1200 \mu\text{F}$).

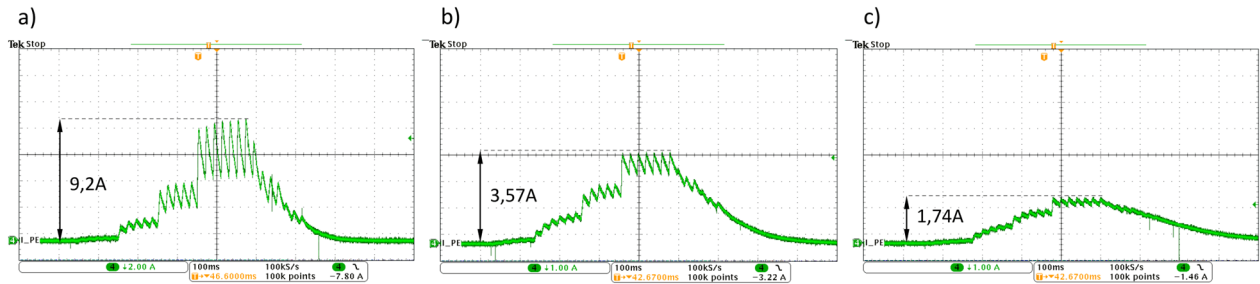
Poniżej, na rys. 6.24, rys. 6.25 i rys. 6.26, przedstawiono przebiegi prądu pomiarowego przy różnych konfiguracjach układu pomiarowego ze zmianą wartości elementów R_0 i C_0 . W tab. 6.2 zestawiono wartości elementów R_0 i C_0 , dla których wykonano pomiary, numer rysunku z charakterystyką prądu I_{PE} płynącego w przewodzie ochronnym podczas pomiaru oraz jego wartością szczytową.

Tab. 6.2 Zestawienie numeracji rysunków charakterystyk prądu I_{PE} wraz z jego wartością szczytową dla różnych wartości C_0 i R_0

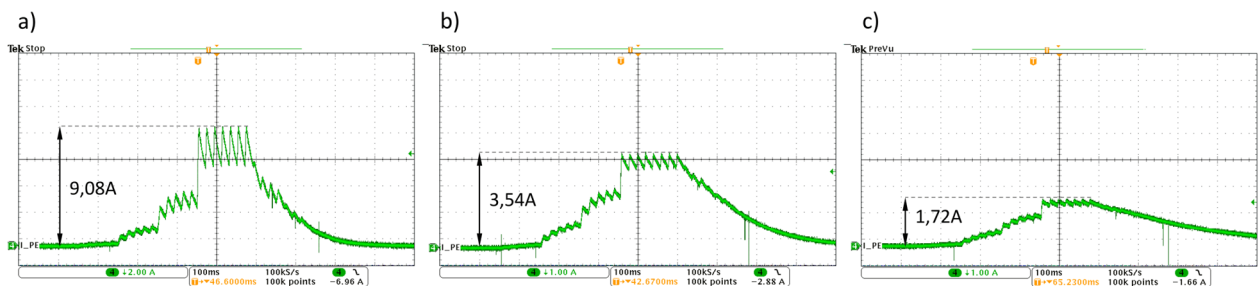
$C_0 \backslash R_0$	50Ω		100Ω		200Ω	
	nr rys.	I_{PE} – wartość szczytowa [A]	nr rys.	I_{PE} – wartość szczytowa [A]	nr rys.	I_{PE} – wartość szczytowa [A]
$300 \mu\text{F}$	rys. 6.24 a	9,30	rys. 6.24 b	3,60	rys. 6.24 c	1,78
$700 \mu\text{F}$	rys. 6.25 a	9,20	rys. 6.25 b	3,57	rys. 6.25 c	1,74
$1200 \mu\text{F}$	rys. 6.26 a	9,08	rys. 6.26 b	3,54	rys. 6.26 c	1,72



Rys. 6.24 Charakterystyka prądu pomiarowego I_{PE} płynącego w przewodzie ochronnym przy $C_0 = 300 \mu\text{F}$ i $R_0 =$: a) 50Ω , b) 100Ω , c) 200Ω



Rys. 6.25 Charakterystyka prądu pomiarowego I_{PE} płynącego w przewodzie ochronnym przy $C_0 = 700 \mu\text{F}$ i $R_0 =$: a) 50Ω , b) 100Ω , c) 200Ω



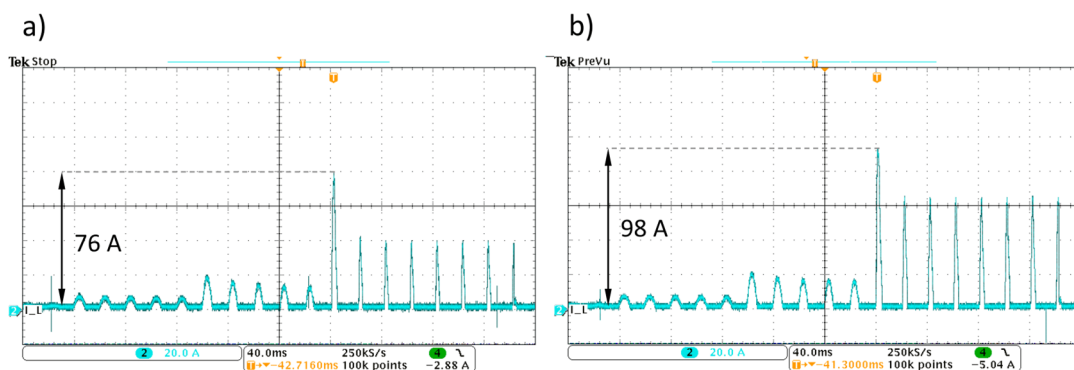
Rys. 6.26 Charakterystyka prądu pomiarowego I_{PE} płynącego w przewodzie ochronnym przy $C_0 = 1200 \mu\text{F}$ i $R_0 =$: a) 50Ω , b) 100Ω , c) 200Ω

Zwiększanie pojemność kondensatora C_0 zmniejsza pulsację prądu pomiarowego (porównanie rys. 6.24, rys. 6.25, rys. 6.26), ale jednocześnie nieznacznie obniża jego wartość szczytową. Mniejsze tętnienie prądu pomiarowego zmniejsza zmiany indukcji w rdzeniu przekładnika sumującego i w rezultacie zachodzi mniejsze ryzyko wyzwolenia wyłącznika. Rezystor obciążenia R_0 ma zdecydowany wpływ na wartość szczytową prądu pomiarowego (im mniejsza jego wartość tym większy prąd). Zwiększenie prądu pomiarowego powoduje jednak wzrost pulsacji. Czym większy prąd pomiarowy tym mniejszy błąd pomiaru, ale jednocześnie większe ryzyko wyzwolenia wyłącznika. Dobór odpowiedniej kombinacji wartości R_0 i C_0 stanowi kompromis pomiędzy jak największym prądem pomiarowym i jednocześnie jak najmniejszymi jego tętnieniami.

Badania rzeczywistego układu wykonano analogicznie jak w symulacjach dla sprawdzenia jego poprawności. Jednocześnie sprawdzano zachowanie się wyłączników różnicowoprądowych przy różnych konfiguracjach elementowych, ponieważ nie wszystkie konfiguracje dawały oczekiwany efekt niewyzwalania wyłącznika podczas pomiaru. Ostateczny dobór elementów układu przestawiono w tab. 6.3.

Porównując przebiegi prądu pomiarowego I_{PE} płynącego w przewodzie ochronnym podczas symulacji w programie LTspice (rys. 6.13 i rys. 6.14) z przebiegami zarejestrowanymi oscyloskopem cyfrowym w rzeczywistym układzie pomiarowym (rys. 6.24, rys. 6.25, rys. 6.26) zauważyć można zbliżony kształt charakterystyki, a także zbliżone wartości szczytowe prądu I_{PE} . Niewielkie różnice wynikają z niedokładności elementów rzeczywistych, a także z dodatkowych rezystancji przewodów i połączeń. Porównanie symulacji i rzeczywistych pomiarów potwierdza prawidłowość budowy stanowiska laboratoryjnego i jego skuteczne działanie zgodne z założeniami projektowymi.

Warto zauważyć, że zastosowanie kondensatora C_0 o znacznej pojemności w połączeniu z rezystorem R_0 o niewielkiej rezystancji daje w rezultacie prąd pomiarowy o znacznej wartości szczytowej i niewielkim tętnieniu. Wydawać by się mogło, że jest to rozwiązanie najbardziej optymalne, niestety wiąże się to ze znacznym wzrostem prądu płynącego przewodem fazowym L i neutralnym N. Związane jest to z koniecznością ładowania znacznej pojemności szczególnie po zbocznikowaniu rezystorów R_1 , R_2 i R_3 , gdy prąd ładowania kondensatora ograniczony jest tylko przez równoległe połączony rezystor R_0 . Podczas badań wartość szczytowa prądu w przewodzie fazowym L (dla $C_0 = 1200 \mu\text{F}$ i $R_0 = 50 \Omega$) osiągnęła prawie 100 A (rys. 6.27), co wymusiło konieczność dobrania elementów obwodu o odpowiednich parametrach, by nie zostały uszkodzone.



Rys. 6.27 Charakterystyka prądu w przewodzie fazowym L przy $C_0 = 1200 \mu\text{F}$ i $R_0 =$: a) 100Ω , b) 50Ω

Wielokrotne próby i badania pozwoliły na wybór najbardziej korzystnych parametrów elementów układu dla uzyskania jak największego prądu pomiarowego przy jednoczesnym zachowaniu jego niewielkiego tętnienia, dzięki czemu w rezultacie uzyskuje się brak wyzwiania



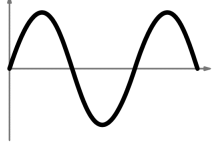
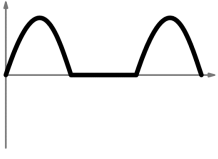

wyłącznika różnicowoprądowego podczas pomiaru. W tab. 6.3 zestawiono parametry układu pomiarowego, które zostały wykorzystane przy ostatecznych próbach miernika.

Tab. 6.3 Parametry charakterystyczne miernika rezystancji pętli zwarciowej

Parametr	Wartość	Jednostka
rezystancja R_0	100	Ω
rezystancja R_1	450	Ω
rezystancja R_2	41	Ω
rezystancja R_3	13	Ω
Pojemność C_0	700	μF
Prąd pomiarowy (wartość szczytowa)	3,57	A
Prąd w przewodzie L (wartość szczytowa)	48,4	A
Całkowity czas pomiaru	580	ms

W tab. 6.4 przedstawiono wyniki badań zachowania się 14 wyłączników różnicowoprądowych przy pomiarze impedancji pętli zwarciowej dostępnymi na rynku miernikami (prąd sinusoidalny, prąd półfalowy) oraz przy pomiarze rezystancji miernikiem według propozycji autora. W przypadku mierników dostępnych na rynku zbędne wyzwalanie („+” w komórce z wynikiem) następowało podczas większości prób prądem półfalowym, a przy prądzie sinusoidalnym za każdym razem. Przy zastosowaniu proponowanej metody pomiaru zbędne wyzwolenie wyłączników różnicowoprądowych nie nastąpiło ani razu („-” w komórce z wynikiem).

Tab. 6.4 Wyniki badań reakcji wyłączników różnicowoprądowych o $I_{\Delta n} = 30 \text{ mA}$ na różny prąd pomiarowy. Zwłoczność: B – bezzwłoczny, G – krótkozwłoczny

Charakterystyka prądu pomiarowego	Polaryzacja	Nazwa wyłącznika	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9	W10	W11	W12	W13	W14			
			W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9	W10	W11	W12	W13	W14			
		Nr próby	1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
			2	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
			3	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
		Nr próby	1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
			2	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
			3	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	dodatnia	Nr próby	1	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+		
			2	-	+	+	+	+	-	+	+	-	-	+	+	-	-		
			3	-	+	+	+	+	-	+	+	-	-	+	+	-	-	-	
	ujemna	Nr próby	1	+	+	-	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	
			2	-	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	+	-	-	-	
			3	-	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	+	-	-	-	
	dodatnia	Nr próby	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
			2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
			3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	ujemna	Nr próby	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
			2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
			3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Typ wyzwiania			AC	A	A	AC	AC	AC	A	A	AC	AC	A	A	AC	AC			
Zwłoczność			B	B	B	B	B	B	B	B	B	G	B	B	B	B			

Wyniki zestawione w tab. 6.4 potwierdzają skuteczność proponowanej metody do pomiaru rezystancji pętli zwarciowej w obwodach chronionych wyłącznikami różnicowoprądowymi typu AC i typu A.



7. PODSUMOWANIE

7.1. WNIOSKI KOŃCOWE Z BADAŃ

Konieczność wykonywania pomiarów impedancji pętli zwarciowej wynika z obowiązujących przepisów i norm. Szybko zwiększająca się liczba wyłączników różnicowoprądowych instalowanych w obwodach odbiorczych nie ułatwia pomiarów ze względu na niechciane wyzwalanie tych wyłączników podczas pomiaru metodami tradycyjnymi. Istniejące znane metody teoretycznie pozwalają na pomiar bez wyzwalania tych wyłączników, ale każda z nich ma szereg wad, które niejednokrotnie utrudniają lub nawet uniemożliwiają ich stosowanie w warunkach rzeczywistych, albo ich dokładność jest bardzo mała. W rozprawie udowodniono, że pomiar rezystancji pętli zwarciowej jest w zupełności wystarczający do oceny stanu ochrony przeciwporażeniowej w badanych obwodach odbiorczych z zainstalowanymi wyłącznikami w porównaniu z pomiarem impedancji pętli zwarciowej. Analizy różnego rodzaju sieci zasilających i określenie stosunku rezystancji do reaktancji poszczególnych elementów obwodu zwarciowego pokazały, że błąd wynikający z uproszczenia pomiaru tylko rezystancji pętli zwarciowej (w stosunku do pomiaru impedancji pętli zwarciowej) jest mniejszy niż 1%. W obwodach bez wyłączników różnicowoprądowych nadal najskuteczniejsze okazują się tradycyjne metody techniczne o dużym prądzie pomiarowym.

Opracowana przez autora rozprawy metoda pomiaru rezystancji pętli zwarciowej pozwala na wykonanie skutecznych i dokładnych pomiarów bez wyzwalania wyłączników typu AC i typu A, a jednocześnie pozbawiona jest wad istniejących mierników. W toku badań naukowych udowodniono tezę główną i tezę pomocniczą podstawioną przez autora na początku rozprawy.

Niniejsza rozprawa doktorska nie wyczerpuje w całości tematu pomiaru rezystancji pętli zwarciowej z użyciem nowej metody. W pracy opisano istotny problem, jakim są pomiary impedancji (rezystancji) pętli zwarciowej w obwodach chronionych wyłącznikami różnicowoprądowymi. Szczegółowo scharakteryzowano zasadę działania nowej metody pomiaru. Dla udowodnienia jej skuteczności, zaprojektowano, zbudowano i przetestowano stanowisko laboratoryjne, które nie jest jeszcze miernikiem komercyjnym, głównie ze względu na gabaryt i wagę. Proces miniaturyzacji, rozbudowy i komercjalizacji miernika wykorzystującego nową metodę pomiaru jest kolejnym kierunkiem badań autora, które już rozpoczął.



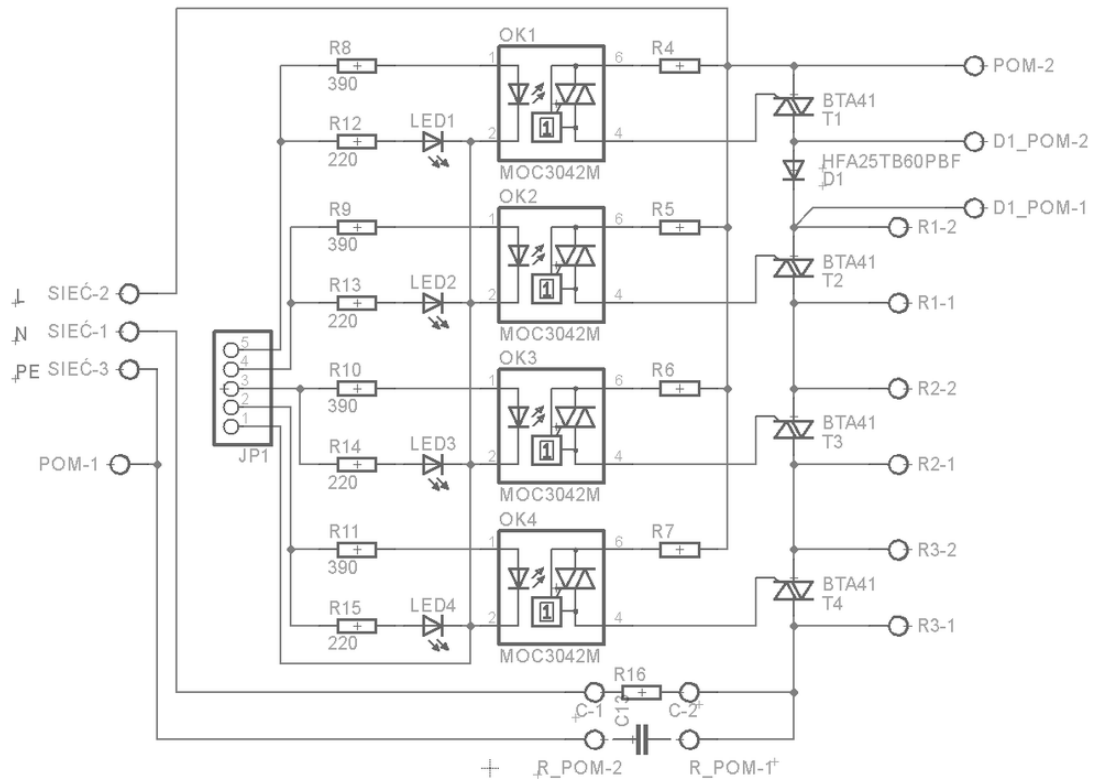
Narastająca liczba instalowanych wyłączników różnicowoprądowych i przyczyniająca się do tego wymiana starych instalacji odbiorczych z układu TN-C na TN-S w istniejących budynkach sprawia, że poszukuje się szybkich, dokładnych i skutecznych metod do pomiarów ochronnych. Wszystkie te czynniki wpływają na zainteresowanie nową metodą pomiaru i konieczność dalszych prac badawczych.

7.2. KIERUNEK DALSZYCH BADAŃ

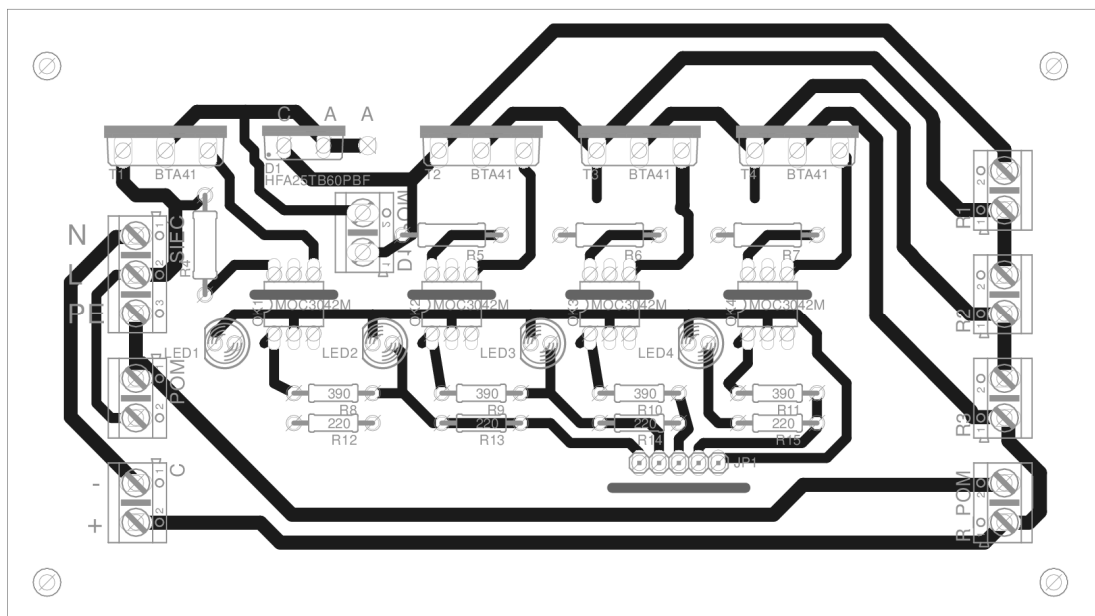
Dalsze prace nad metodą pomiaru związane są z udoskonaleniem sposobu bocznikowania rezystorów ograniczających prąd pomiarowy, zwiększeniem liczby stopni rezystorów i, co najważniejsze, nad zwiększeniem wartości prądu pomiarowego dla uzyskania jeszcze większej dokładności pomiaru.

Autor rozprawy planuje budowę prototypu miernika wykorzystującego nową metodę pomiaru rezystancji pętli zwarciowej. W stosunku do modelu laboratoryjnego mają zostać zastosowane łączniki energoelektronicznie w postaci triaków lub tyrystorów zamiast dużych i ciężkich styczników. Planuje się również zastąpić obecny układ sterowania zbudowany na podstawie mikrokontrolera AVR na miniaturowy komputer połączony z przetwornikami analogowo-cyfrowymi do bezpośredniego pomiaru napięć w układzie bez użycia oscyloskopu. Użycie minikomputera pozwoli na zastosowanie w mierniku wyświetlacza dotykowego z możliwością obsługi wszystkich funkcji i odczytu mierzonych parametrów bezpośrednio na nim. Uniezależnienie miernika od zasilania zewnętrznego ma zostać zapewnione dzięki wbudowanej baterii oraz odpowiedniej przetwornicy napięć.

W chwili pisania rozprawy doktorskiej autor jest w trakcie testowania nowej płytki drukowanej z zainstalowanymi triakami typu BTA41 [100] oraz szybką diodą prostowniczą o niskim spadku napięcia [101] (rys. 7.1 do rys. 7.3). Do bocznikowania rezystorów R_1 , R_2 i R_3 autor zdecydował się na zastosowanie triaków typu BTA41 o prądzie ciągłym równym 40 A, mimo że w układzie mogą wystąpić prądy rzędu 100 A. Zgodnie z kartą katalogową triaka BTA41 [100] pozwala on na chwilowe przewodzenie prądu rzędu setek amperów. Zastosowanie optotriaków MOC3042M pozwala na separację galwaniczną pomiędzy układem wykonawczym (traki) a układem sterowania czyli minikomputerem. Optotriaki wyposażone są w układ detekcji przejścia prądu przez „0”, co umożliwia ich wyłączanie w odpowiedniej chwili i zapobiega powstawaniu przepięć w układzie [102].



Rys. 7.1 Schemat ideowy nowej wersji miernika rezystancji pętli zwarciowej



Rys. 7.2 Schemat płytki drukowanej nowej wersji miernika rezystancji pętli zwarciowej



8. LITERATURA

1. PN-HD 60364-6:2008 Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 6: Sprawdzenie.
2. Obwieszczenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 17 lipca 2015 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, Dz.U.2015.1422.
3. PN-HD 60364-4-41:2009 Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 4-41: Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa – Ochrona przed porażeniem elektrycznym.
4. Czapp S.: Pomiar impedancji pętli zwarciowej w obwodach z RCD i w obwodach zasilanych z UPS. INPE: Informacje o Normach i Przepisach Elektrycznych, 2017, nr 214–215, s. 3–18.
5. Czapp S.: Problemy pomiaru impedancji pętli zwarciowej w nowoczesnych instalacjach niskiego napięcia. W: Innowacje, pomiary i bezpieczeństwo w elektroenergetyce, seria Automatyka, Elektryka, Zakłócenia, INFOTECH, Gdańsk 2017, s. 45-52, ISBN 978-83-934772-9-6.
6. Czapp S., Borowski K.: Układ do pomiaru rezystancji pętli zwarciowej w obwodach chronionych wyłącznikami różnicowoprądowymi typu AC i typu A, patent nr 227183, 2017.
7. Czapp S.: Wyłączniki różnicowoprądowe w ochronie przeciwporażeniowej przy odkształconym prądzie różnicowym. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 2009. ISBN 978-83-7348-287-6.
8. Czapp S., Musiał E.: Wyłączniki ochronne różnicowoprądowe – Część 1, Zeszyt 56, Stowarzyszenie Elektryków Polskich – Centralny Ośrodek Szkolenia i Wydawnictw, Zakład Wydawniczy INPE w Bełchatowie, 2016. ISBN 978-83-945411-1-8.
9. PN-HD 60364-7-704:2010 Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 7-704: Wymagania dotyczące specjalnych instalacji lub lokalizacji – Instalacje na terenie budowy i rozbiórki.
10. PN-HD 60364-7-701:2010 Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 7-701: Wymagania dotyczące specjalnych instalacji lub lokalizacji – Pomieszczenia wyposażone w wannę lub prysznic.
11. PN-IEC 60364-7-705:2007 Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Wymagania dotyczące specjalnych instalacji lub lokalizacji – Gospodarstwa rolnicze i ogrodnicze.
12. PN-HD 60364-7-714:2012 Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 7-714: Wymagania dotyczące specjalnych instalacji lub lokalizacji – Instalacje oświetlenia zewnętrznego.
13. PN-HD 60364-7-703:2007 Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych – Część 7-703: Wymagania dotyczące specjalnych instalacji lub lokalizacji – Pomieszczenia i kabiny zawierające ogrzewacze sauny.
14. PN-HD 60364-5-559:2010 Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych – Część 5-55: Dobór i montaż wyposażenia elektrycznego – Inne wyposażenie – Sekcja 559: Oprawy oświetleniowe i instalacje oświetleniowe.
15. PN-HD 60364-7-740:2009 Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych – Część 7-740: Wymagania dotyczące specjalnych instalacji lub lokalizacji – Tymczasowe instalacje elektryczne obiektów, urządzeń rozrywkowych i straganów na terenie targów, wesołych miasteczek i cyrków.



16. Czapp S.: Konstrukcja i działanie współczesnych wyłączników różnicowoprądowych. Koszalińskie Studia i Materiały, Politechnika Koszalińska, Koszalińskie Towarzystwo Naukowe, 2008, nr 10, s. 101–112.
17. Danielski L., Osiński S.: Budowa, stosowanie i badania wyłączników różnicowoprądowych. Wydawnictwo SEP COSIW, 2017.
18. Koprivšek M.: Development trend of residual current circuit breakers. 2018. Pobrano: http://www.etigroup.eu///images/userfiles/en-GB/documents/media/Development_Trend_of_Residual_Current_Circuit_Breakers.pdf.
19. Duffing P.: Der Sperrmagnet. ETZ-A, 1953, T. 11, s. 343–346.
20. Musiał E., Czapp S.: Wyłączniki ochronne różnicowoprądowe (1). Powstanie, rozwój, przyszłość. INPE: Informacje o Normach i Przepisach Elektrycznych, 2008, nr 108, s. 3–46.
21. Czapp S.: Analiza obwodu wyzwacza spolaryzowanego wyłączników różnicowoprądowych przy podwyższonej częstotliwości prądu różnicowego. W: XIII Międzynarodowa Konferencja Naukowa Aktualne Problemy w Elektroenergetyce APE`07. Gdańsk – Jurata, 13-15 czerwca 2007. T. 4, Elektrownie i sieci, zagadnienia wybrane, s. 283–290.
22. PN-EN 61008-1:2013-05 Wyłączniki różnicowoprądowe bez wbudowanego zabezpieczenia nadprądowego do użytku domowego i podobnego (RCCB) – Część 1: Postanowienia ogólne.
23. Musiał E., Czapp S.: Wyłączniki ochronne różnicowoprądowe (3). Niezawodność. INPE: Informacje o Normach i Przepisach Elektrycznych, 2008, nr 110–111, s. 3–40.
24. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 6 lutego 2003 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy podczas wykonywania robót budowlanych (Dz.U. 2003 nr 47 poz. 401).
25. Musiał E., Czapp S.: Wyłączniki ochronne różnicowoprądowe (2). Przegląd i charakterystyka współczesnych konstrukcji. INPE: Informacje o Normach i Przepisach Elektrycznych, 2008, nr 109, s. 3–44.
26. Freschi F.: High frequency behavior of residual current devices. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, vol. 27, s. 1629–1635.
27. Czapp S.: Działanie wyłączników różnicowoprądowych przy podwyższonej częstotliwości prądu różnicowego. Elektro.info, 2008, vol. 68, nr 10, s. 80–83.
28. Czapp S.: Czułość wyłączników różnicowoprądowych o wyzwaniu typu AC i A przy znamionowej i podwyższonej częstotliwości prądu różnicowego. Archiwum Energetyki, 2007, nr 37, s. 155–170.
29. Czapp S., Kałka Ł.: Badanie działania wyłączników różnicowoprądowych przy częstotliwościach prądu różnicowego mniejszych niż 50 Hz. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, 2016, nr 50, s. 15–18.
30. IEC/TR 60755:2008 General requirements for residual current operated protective devices. 2nd edition.
31. IEC 62423:2009 Type F and type B residual current operated circuit-breakers with and without integral overcurrent protection for household and similar uses.
32. PN-EN 62423:2013-06 Wyłączniki różnicowoprądowe typu F i typu B z wbudowanym zabezpieczeniem nadprądowym i bez wbudowanego zabezpieczenia nadprądowego do użytku domowego i podobnego.



33. DIN VDE 0664-400:2012-05 Fehlerstrom-Schutzschalter Typ B ohne eingebauten Überstromschutz zur Erfassung von Wechsel- und Gleichfehlerströmen für den gehobenen vorbeugenden Brandschutz – Teil 400: RCCB Typ B+.
34. PN-EN 61009-1:2013-06 Wyłączniki różnicowoprądowe z wbudowanym zabezpieczeniem nadprądowym do użytku domowego i podobnego (RCBO) – Część 1: Postanowienia ogólne.
35. PN-EN 61009-2-1:2008 Wyłączniki różnicowoprądowe z wbudowanym zabezpieczeniem nadprądowym do użytku domowego i podobnego (RCBO) – Część 2-1: Stosowanie postanowień ogólnych do wyłączników RCBO o działaniu niezależnym od napięcia sieci.
36. Czapp S., Musiał E.: Wyłączniki ochronne różnicowoprądowe – Część 2, Zeszyt 59. Stowarzyszenie Elektryków Polskich – Centralny Ośrodek Szkolenia i Wydawnictw, Zakład Wydawniczy INPE w Bełchatowie, 2017, ISBN 978-83-945411-4-9.
37. Czapp S.: Protection against electric shock using residual current devices in circuits with electronic equipment. Elektronika ir Elektrotechnika, 2007, T. 4, nr 4, s. 51-54.
38. Materiały firmowe: Vacuumschmelze. Pobrano: <http://www.vacuumschmelze.com>.
39. Materiały firmowe: Magnetec. Pobrano: <http://www.magnetec.de>.
40. Roskosz R., Ziółko M.: Measurement Accuracy of Short-Circuit Loop Impedance in Power Systems. W: XVII IMEKO World Congress Metrology in the 3rd Millennium, June 22 – 27. Dubrovnik, Croatia, 2003. s. 903–907.
41. Czapp S.: Kontrola stanu instalacji elektrycznych niskiego napięcia – Przegląd aktualnych Wymagań w zakresie prób i pomiarów. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, 2010, nr 27.
42. Kacejko P., Machowski J.: Zwarcia w systemach elektroenergetycznych. WNT, Warszawa 2002, ISBN 83-204-2750-9.
43. Baran K.: Calculating short circuit currents in electrical power systems. Scientific Journals of Rzeszów University of Technology, Series: Electrotechnics, 2015, T. 34, s. 29–45.
44. Wiatr J., Orzechowski M.: Poradnik projektanta elektryka. Edycja V, Grupa Medium, Warszawa, 2012. ISBN 978-83-919132-3-9.
45. Nowak T.: Wybrane zagadnienia dotyczące sieci IT oraz TT w świetle użytkowania w okrętowych systemach elektroenergetycznych. Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, 2018, nr 103, s. 43–56.
46. Kanicki A.: Obliczenia wielkości zwarciovych za pomocą normy PN-EN 60909-0:2002. Zasady obliczeń. Biuletyn Techniczno-Informacyjny Oddziału Łódzkiego Stowarzyszenia Elektryków Polskich, 2007, T. 1, s. 13–19.
47. PN-EN 60909-0:2002 Prądy zwarciovie w sieciach trójfazowych prądu przemiennego – Część 0: Obliczanie prądów.
48. PN-EN 60909-3:2002 Prądy zwarciovie w sieciach trójfazowych prądu przemiennego. Prądy podwójnych, jednoczesnych i niezależnych zwarc doziemnych i częściowe prądy zwarciovie płynące w ziemi.
49. PN-EN 60865-1:2002. Obliczanie skutków prądów zwarciovych.
50. Katalog transformatorów olejowych firmy ABB, 2017.



51. Katalog transformatorów olejowych firmy Siemens, 2017.
52. PN-HD 60364-4-41:2017-09 Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 4-41: Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa – Ochrona przed porażeniem elektrycznym.
53. Aigner M., Schmutzer E., Sigl Ch., Wieland T., Fickert L.: Fehlerschleifenimpedanz-messung in niederspannungsnetzen mit wechselrichtern. 8. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien, IEWT 2013, Wien, 13-15 Feb., 2013.
54. Johnsen O., Peguiron N., Schnegg P.: A new system of measurement of the network impedance. Proc. 3d IMEKO TC-4 Symposium, Zurich, September, 1989.
55. Faifer M., Foglia G.M., Perini R., Rocca L.: The calibration of loop impedance meters: A proposal. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, vol. 56, no. 4, pp. 1285-1291.
56. Markiewicz H.: Bezpieczeństwo w elektroenergetyce. PWN, Warszawa, 2017.
57. Meliopoulos A., Cokkinides H., Abdallah H., Duong S., Patel S.: A PC based ground impedance measurement instrument. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, vol. 8, nr 3.
58. Nino E. E., Nassif A. B., Xu W.: Network impedance measurement methods based on on-site data. Proceedings of the 37th Annual North American Power Symposium, 2005, DOI: 10.1109/NAPS.2005.1560590.
59. Pedersen K.O.H., Nielsen A.H., Paulsen N.K.: Short-circuit impedance measurement. IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., 2003, vol. 150, no. 2, ps 169-174, DOI: 10.1049/ip-gtd:20030193.
60. Rhode J. P., Kelley A. W., Baran M. E.: Complete characterization of utilization-voltage power system impedance using wideband measurement. IEEE Transactions on Industry Applications, 1997, vol. 33, nr 6, s. 1472–1479.
61. Czapp S., Borowski K.: Ocena przydatności klasycznych metod pomiaru impedancji pętli zwarciowej do obwodów z wyłącznikami różnicowoprądowymi. W: XVII Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Aktualne Problemy w Elektroenergetyce APE`15”. Jastrzębia Góra: 2015. s. 260–267.
62. Karta katalogowa: wielofunkcyjny miernik parametrów instalacji elektrycznych Sonel MPI520.
63. Karta katalogowa: miernik impedancji pętli zwarcia Kyoritsu KEW 4140.
64. Instrukcja obsługi miernika impedancji pętli zwarcia Kyoritsu 4120.
65. Funkcja D-LOK do pomiaru pętli zwarcia bez wyzwalania wyłączników różnicowoprądowych (RCD) w mierniku KEW4120A. Ocena wyników pomiarów impedancji pętli. Materiały katalogowe firmy Kyoritsu.
66. Harris D. R., Litherland M. B., Flowerday A. L.: Circuit testing, European patent nr 295800, 1988.
67. Czapp S.: Pomiary impedancji pętli zwarciowej w obwodach chronionych wyłącznikami różnicowoprądowymi. Biuletyn Techniczno-Informacyjny Oddziału Łódzkiego Stowarzyszenia Elektryków Polskich, 2014, nr 2 (65), s. 2–11.



68. Czapp S.: Metoda wektorowa pomiaru impedancji pętli zwarciowej w obecności zakłóceń. *Archiwum Energetyki*, 2003, T. 32, nr 1–2, s. 43–62.
69. Danzer P.: Impedance measurement in low voltage systems. *Proc. of 5th International Symposium on Short Circuit*, vol. 1, Warsaw, 1992.
70. Czapp S.: Fault Loop Impedance measurement in low voltage network with residual current devices. *Elektronika ir Elektrotechnika*, 2012, T. 122, nr 6.
71. Czapp S., Borowski K.: Immunity of residual current devices to the impulse leakage current in circuits with variable speed drives. *Elektronika ir Elektrotechnika*, 2013, T. 19, nr 8.
72. Roskosz R.: The method of earth fault loop impedance measurement using short duration testing current. W: *Universities Power Engineering Conf. Nottingham*. 1988, s. 20-22.
73. Roskosz R.: Nowe rozwiązania pomiaru impedancji pętli zwarciowej przy odkształceniu krzywej napięcia w miejscu pomiaru. *Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej*, 1995.
74. Nawrocki Z.: Urządzenie do pomiaru impedancji obwodu zwarciowego, patent nr 174078, 1998.
75. Nawrocki Z.: Urządzenie do pomiaru impedancji pętli zwarciowej, patent nr 128417, 1985.
76. Masny J.: Pomiary impedancji pętli zwarciowej. *Gospodarka Paliwami i Energią*, 1987, T. 10, s. 16-21.
77. Masny J.: Krytyczna ocena metod pomiaru impedancji pętli zwarciowych. *Prace Naukowe Instytutu Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej*, 1975, s. 59–75.
78. Musiał E.: Badania stanu ochrony przeciwporażeniowej w instalacjach z wyłącznikami różnicowoprądowymi. *Ogólnopolskie Szkolenie Techniczne „Pomiary ochronne w instalacjach elektrycznych niskiego i wysokiego napięcia prądu przemiennego oraz prądu stałego” ENERGO-EKO-TECH*, 2003, s. 1–23.
79. Wenta K.: Pomiar impedancji pętli zwarciowej w sieciach z wyłącznikami różnicowoprądowymi. *Praca dyplomowa pod kierunkiem prof. R. Roskosza, PWSZ Elbląg*, 2011.
80. Nawrocki Z.: Analiza błędów metody przy pomiarach skuteczności zerowania układem różnicowym o łączniku sterowanym cyklicznie. *Przegląd Elektrotechniczny*, 1983, nr 5.
81. Nawrocki Z.: Analiza porównawcza metod pomiaru impedancji pętli zwarciowej przy zastosowaniu przetworników analogowych. *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej*, 2003, nr 54.
82. Borowski K.: Przegląd metod pomiaru impedancji pętli zwarciowej i ocena ich przydatności do obwodów z wyłącznikami różnicowoprądowymi. *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, 2015, nr 45, s. 19–22.
83. Golijanek-Jędrzejczyk A.: Badanie metod pomiaru impedancji pętli zwarciowej wykorzystującej składowe fazora napięcia. *Rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, Gdańsk* 2006.
84. Katalog produktowy: *HIRSCHMANN TEST AND MEASUREMENT*, 2017.



85. Roskosz R.: Nowe metody pomiaru impedancji pętli zwarciowej dużym pełnofalowym prądem pomiarowym bez wyzwalania wyłączników różnicowoprądowych. INPE: Informacje o Normach i Przepisach Elektrycznych, 2014, nr 172 173, s. 38–50.
86. Karta katalogowa: Miernik impedancji pętli zwarcia Sonel MZC-304.
87. Karta katalogowa: Miernik impedancji pętli zwarcia Sonel MZC-305.
88. Karta katalogowa: Miernik impedancji pętli zwarcia Sonel MZC-306.
89. Olesz M.: Pomiary prądu upływowego w instalacjach i urządzeniach elektroenergetycznych. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, 2012, nr 31.
90. Musiał E.: Pomiary prądu upływowego i wielkości pochodnych. Ogólnopolskie Szkolenie Techniczne „Pomiary ochronne w urządzeniach elektrycznych niskiego i wysokiego napięcia”, ENERGO-EKO-TECH, 2004, s. 1–19.
91. Roskosz R., Jakubiuk K., Swędrowski L., Świsulski D., Wołoszyk M., Ziółko M.: Sposób i układ do pomiaru impedancji pętli zwarciowej w sieciach niskiego napięcia z wyłącznikami różnicowoprądowymi, patent nr 221693, 2015.
92. Czapp S., Borowski K.: Stanowisko do weryfikacji nowej metody pomiaru rezystancji pętli zwarciowej. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, 2016, nr 51, s. 23–26.
93. Karta katalogowa: Złączki gwintowane ZUG-4. 2007.
94. Katalog styczników S –ID , S–IDX.
95. Karta katalogowa: Przekaznik SRD-5VDC-SL-C.
96. Strona internetowa Botland. www.botland.com.pl.
97. Strona internetowa Arduino. www.arduino.cc.
98. Czapp S., Borowski K., Dobrzynski K., Klucznik J., Lubosny Z.: A new method of fault loop resistance measurement in low voltage systems with residual current devices. W: 2015 IEEE Eindhoven PowerTech. The Netherlands: IEEE, 2015. s. 1–5.
99. Czapp S., Borowski K.: Experimental verification of a new method of loop resistance testing in low voltage systems with residual current devices. W: 21st IMEKO TC-4 International Symposium on Understanding the World through Electrical and Electronic Measurement, and 19th International Workshop on ADC Modelling and Testing, 2016.
100. Karta katalogowa: Triak BTA41.
101. Karta katalogowa: Ultra fast, soft recovery diode HFA25TB60PBF.
102. Karta katalogowa: Optotriak MOC3042M.



9. SPIS RYSUNKÓW

Rys. 1.1 Schemat pomiaru impedancji pętli zwarciowej w obwodzie z wyłącznikiem różnicowoprądowym; RCD – wyłącznik różnicowoprądowy, I_M – prąd pomiarowy.....	10
Rys. 2.1 Schemat budowy wyłącznika różnicowoprądowego A – człon kontrolny, B – człon wyłączający, C – człon wyzwalający (wyzwalacz różnicowy), D – człon pomiarowy, 1 – przycisk testujący, 2 – rezystor obwodu kontrolnego, 3 – zamek, 4 – uzwojenie wtórne, 5 – rdzeń przekładnika sumującego.....	14
Rys. 2.2 Wyzwalacz różnicowy spolaryzowany [7, 20] 1 – magnes trwały, 2 – bocznik magnetyczny, 3 – uzwojenie wyzwalacza, 4 – jarzmo (kolumna), 5 – zwora, 6 – sprężyna zwrotna	16
Rys. 2.3 Wyzwalacz różnicowy niespolaryzowany: a) w stanie trzymania; b) w chwili odpadania zwory przy przepływie prądu różnicowego przez cewkę [7, 20] 1 – jarzmo rdzenia, 2 – magnes trwały, 3 – uzwojenie wyzwalacza, 4 – zwora, 5 – sprężyna zwrotna, 6 – strumień wytwarzany przez uzwojenie nasycający przewężenia jarzma, 7 – strumień magnesu trwałego zamykający się przez bocznik magnetyczny.....	17
Rys. 2.4 Porównanie wartości różnicowego prądu wyzwalania w funkcji częstotliwości prądu dla różnych wyłączników RCD (opracowanie własne na podstawie [26])	19
Rys. 2.5 Zestawienie pasmowych charakterystyk czasowo-prądowych dwóch wyłączników różnicowoprądowych: bezzwłocznego $I\Delta n = 30 \text{ mA}$ i zwłocznego $I\Delta n = 300 \text{ mA}$ [25].....	22
Rys. 2.6 Przenikalność magnetyczna względna stopu ferromagnetycznego żelazo-niklowego Ultraperm 250 w zależności od poziomu wzbudzenia [7, 8, 38].....	24
Rys. 2.7 Umowne kształty pętli histerezy: a) pętla prostokątna; b) pętla zaokrąglona; c) pętla płaska; B_s – indukcja nasyceniowa, B_r – indukcja szczątkowa.....	26
Rys. 2.8 Płaskie pętle histerezy materiału Nanoperm F80 przy 50 Hz [7, 8, 39].....	27
Rys. 2.9 Pętle histerezy przy magnesowaniu prądem przemiennym i prądem pulsującym stałym: a) ferromagnetyk o pętli prostokątnej; b) ferromagnetyk o pętli płaskiej	28
Rys. 3.1 Schemat różnych typów sieci z zaznaczoną drogą prądu zwarcia doziemnego będącego jednocześnie prądem różnicowym dla wyłącznika różnicowoprądowego: a) sieć TN-S, b) sieć TT, c) sieć IT	30
Rys. 3.2 Przykładowy schemat sieci: a) schemat ideowy, b) schemat zastępczy SEE – system elektroenergetyczny, R15 – rozdzielnica 15 kV, R04 – rozdzielnica 0,4 kV, ZK – złącze kablowe/napowietrzne, RO – rozdzielnica instalacji odbiorczych	31
Rys. 3.3 Charakterystyka parametru R/X transformatorów elektroenergetycznych w funkcji ich mocy znamionowej	35
Rys. 3.4 Charakterystyka parametru R/X przewodów i linii kablowych o żyłach aluminiowych i miedzianych w funkcji przekroju poprzecznego żyły roboczej	37
Rys. 3.5 Charakterystyka parametru R/X linii napowietrznych izolowanych (AsXs) i nieizolowanych (Al) o żyłach aluminiowych w funkcji przekroju poprzecznego przewodnika.....	37
Rys. 3.6 Schemat symulowanej sieci: a) schemat ideowy, b) schemat zastępczy SEE – system elektroenergetyczny, R15 – rozdzielnica 15 kV, R04 – rozdzielnica 0,4 kV, ZK lub SłUP – złącze kablowe lub słup rozgałęźny, RO – rozdzielnica instalacji odbiorczych.....	39
Rys. 3.7 Wykres wartości stosunku R/X dla różnych typów symulowanych sieci.....	40
Rys. 3.8 Wykres wartości rezystancji i reaktancji poszczególnych elementów sieci dla różnych typów symulowanych sieci	41
Rys. 3.9 Charakterystyka procentowego błędę względnego $\delta\%$ w funkcji stosunku R/X.....	43



Rys. 3.10 Charakterystyka procentowego błędu względnego $\delta\%$ w symulowanych typach sieci.....	43
Rys. 3.11 Schemat układu do pomiaru impedancji pętli zwarciowej metodą techniczną, zgodnie z normą [1]	45
Rys. 4.1 Przebiegi prądów w przewodach L, N i PE podczas pomiaru bez aktywnej funkcji ATT/RCD, a) Sonel MPI-520 (skala 20A/dz.), b) Kyoritsu KEW 4140 (skala 5A/dz.), c) Kyoritsu 4120A (skala 2A/dz.)	48
Rys. 4.2 Przebiegi prądów w przewodach L, N i PE podczas pomiaru z aktywną funkcją ATT/RCD, a) Sonel MPI-520 (skala: $I_L, I_N - 20A/dz., I_{PE} - 25mA/dz.$), b) Kyoritsu KEW 4140 (skala $I_L, I_N - 5A/dz.,$ $I_{PE} - 10mA/dz.$), c) Kyoritsu 4120A (skala 2A/dz.).....	48
Rys. 4.3 Przebieg prądu w przewodzie PE podczas pomiaru miernikiem Sonel MPI-520 z aktywną funkcją RCD – (powiększenie oscylogramu z rys. 4.2 a; skala 10 mA/dz.)	49
Rys. 4.4 Przebieg prądu w przewodach L, N i PE podczas pomiaru miernikiem Kyoritsu KEW 4140 z aktywną funkcją ATT/RCD (powiększenie fragmentu przebiegu z rys. 4.2 b); skala $I_{PE} -$ 10 mA/dz.	49
Rys. 5.1 Schemat bocznikowania wyłączników różnicowoprądowych: a) 4-biegunowych, b) 2-biegunowych	53
Rys. 5.2 Przebieg prądu pomiarowego w przewodzie PE przy wykorzystaniu miernika z opcją pomiaru małym prądem (skala: 10mA/dz.; podstawa czasu 20ms/dz.)	55
Rys. 5.3 Schemat układu pomiaru impedancji pętli bez wyzwalania RCD z przetwornikiem prądu dopełniającego PPD połączonym szeregowo z impedancją obciążenia pomiarowego Z_0 [85].....	57
Rys. 5.4 Schemat układu pomiaru impedancji pętli bez wyzwalania RCD z przetwornikiem prądu dopełniającego PPD połączony równolegle do zacisków badanego odbiornika [85].....	57
Rys. 5.5 Metoda pomiaru impedancji pętli zwarciowej z nasycaniem rdzenia przekładnika sumującego; I_M – prąd pomiarowy, I_{DC} – prąd stały nasycający	59
Rys. 6.1 Charakterystyki napięcia indukowanego po stronie wtórnej przekładnika sumującego wyłącznika różnicowoprądowego typu A: $eA(t)$ oraz typu AC: $eAC(t)$ przy przepływie prądu różnicowego $i\Delta(t)$ o charakterystyce sinusoidalnej.....	62
Rys. 6.2 Charakterystyki napięcia indukowanego po stronie wtórnej przekładnika sumującego wyłącznika różnicowoprądowego typu A: $eA(t)$ oraz typu AC: $eAC(t)$ przy przepływie prądu różnicowego $i\Delta(t)$ o charakterystyce półfalowej.....	62
Rys. 6.3 Charakterystyki napięcia indukowanego po stronie wtórnej przekładnika sumującego wyłącznika różnicowoprądowego typu A: $eA(t)$ oraz typu AC: $eAC(t)$ przy przepływie prądu różnicowego $i\Delta(t)$ o charakterystyce wyprostowanej dwupołówkowej.....	63
Rys. 6.4 Charakterystyki napięcia indukowanego po stronie wtórnej przekładnika sumującego wyłącznika różnicowoprądowego typu A: $eA(t)$ oraz typu AC: $eAC(t)$ przy przepływie prądu różnicowego $i\Delta(t)$ o charakterystyce półfalowej wygładzonej.....	63
Rys. 6.5 Teoretyczny przebieg w stanie quasi-ustalonym spadku napięcia na rezystorze pomiarowym R_0	64
Rys. 6.6 Schemat układu do pomiaru rezystancji pętli zwarciowej nową metodą.....	66
Rys. 6.7 Charakterystyka prądu pomiarowego I_{PE} płynącego w przewodzie ochronnym w czasie pomiaru rezystancji pętli zwarcia z podziałem na etapy pomiaru.....	67
Rys. 6.8 Przepływ prądu w układzie pomiarowym w 2 etapie pomiaru (kolorem czerwonym oznaczono drogę przepływu prądu)	68



Rys. 6.9 Przepływ prądu w układzie pomiarowym w 3 etapie pomiaru (kolorem czerwonym oznaczono drogę przepływu prądu)	69
Rys. 6.10 Przepływ prądu w układzie pomiarowym w 4 etapie pomiaru (kolorem czerwonym oznaczono drogę przepływu prądu)	69
Rys. 6.11 Przepływ prądu w układzie pomiarowym w 5 etapie pomiaru (kolorem czerwonym oznaczono drogę przepływu prądu)	70
Rys. 6.12 Schemat symulowanego układu z programu LTspice. Podane wartości są przykładowe.....	71
Rys. 6.13 Charakterystyka prądu pomiarowego w przewodzie PE dla różnych pojemności kondensatora C_0 . $R_0 = 100 \Omega$	72
Rys. 6.14 Charakterystyka prądu pomiarowego w przewodzie PE dla różnych rezystancji rezystora R_0 . $C_0 = 700\mu F$	73
Rys. 6.15 Schemat układu przetwornika kierunku zasilania wyłączników różnicowoprądowych.....	75
Rys. 6.16 Widok projektu przetwornika kierunku zasilania wyłączników różnicowoprądowych: a) panel przedni, b) panel tylny, c) widok z góry	75
Rys. 6.17 Zdjęcie przetwornika kierunku zasilania wyłączników różnicowoprądowych: a) widok z przodu, b) widok z tyłu.....	76
Rys. 6.18 Schemat stanowiska laboratoryjnego (wersja 1).....	77
Rys. 6.19 Schemat i widok modułu przekaźników z optoizolacją [96].....	78
Rys. 6.20 Schemat złącza kondensatorów.....	79
Rys. 6.21 Układ ścieżek i opisów płytki drukowanej złącza kondensatorów.....	79
Rys. 6.22 Charakterystyka prądu pomiarowego I_{PE} płynącego w przewodzie ochronnym z zaznaczonymi czasami opóźnienia załączenia i wyłączenia styczników.....	81
Rys. 6.23 Widok kompletnego stanowiska laboratoryjnego miernika rezystancji pętli zwarciowej: a - rezystor R_0 , b - rezystor R_1 , c - rezystor R_2 , d - rezystor R_3 , e - oscyloskop cyfrowy, f - wyłącznik różnicowoprądowy, g - złącze kondensatorów (C_0), h - komputer sterujący, i - przystawka do pomiaru wyłączników RCD, j - cęgi prądowe, k - styczniki (od lewej S_g , S_1 , S_2 , S_3), l - przekaźniki pomocnicze, m - jednostka sterująca (mikrokontroler).....	82
Rys. 6.24 Charakterystyka prądu pomiarowego I_{PE} płynącego w przewodzie ochronnym przy $C_0 = 300 \mu F$ i $R_0 =$: a) 50Ω , b) 100Ω , c) 200Ω	83
Rys. 6.25 Charakterystyka prądu pomiarowego I_{PE} płynącego w przewodzie ochronnym przy $C_0 = 700 \mu F$ i $R_0 =$: a) 50Ω , b) 100Ω , c) 200Ω	84
Rys. 6.26 Charakterystyka prądu pomiarowego I_{PE} płynącego w przewodzie ochronnym przy $C_0 = 1200 \mu F$ i $R_0 =$: a) 50Ω , b) 100Ω , c) 200Ω	84
Rys. 6.27 Charakterystyka prądu w przewodzie fazowym L przy $C_0 = 1200 \mu F$ i $R_0 =$: a) 100Ω , b) 50Ω ..	85
Rys. 7.1 Schemat ideowy nowej wersji miernika rezystancji pętli zwarciowej.....	90
Rys. 7.2 Schemat płytki drukowanej nowej wersji miernika rezystancji pętli zwarciowej	90
Rys. 7.3 Widok nowej wersji miernika rezystancji pętli zwarciowej.....	91



10. SPIS TABEL

Tab. 2.1 Rodzaje wyłączników różnicowoprądowych ze względu na zdolność wykrywania określonego kształtu przebiegu prądu różnicowego – opracowanie własne na podstawie [7].....	20
Tab. 2.2 Przykładowe oznaczenia odporności burzowej wyłączników różnicowoprądowych – opracowanie własne na podstawie [7, 25].....	23
Tab. 2.3 Własności materiałów magnetycznych stosowanych w wyłącznikach różnicowoprądowych o wyzwaniu typu AC (tylko przy prądzie różnicowym przemiennym) [8, 38]	25
Tab. 2.4 Własności materiałów magnetycznych stosowanych w wyłącznikach różnicowoprądowych o wyzwaniu typu A (przy prądzie różnicowym przemiennym i pulsującym stałym) [7, 8, 38].....	25
Tab. 2.5 Podział kształtu pętli histerezy ferromagnetyka na podstawie stosunku indukcji szczątkowej do indukcji nasyceniowej [7, 8].....	26
Tab. 3.1 Wartości rezystancji R i reaktancji X oraz stosunku R/X dla przewodów instalacyjnych, przewodów napowietrznych i kabli elektroenergetycznych przy różnych przekrojach poprzecznych żyły roboczej (temperatura żył $20\text{ }^{\circ}\text{C}$).....	36
Tab. 3.2 Parametry charakterystyczne symulowanych typów sieci (kabl. – linia kablowa, napo. – linia napowietrzna izolowana)	39
Tab. 3.3 Wyniki obliczeń rezystancji R i reaktancji X dla poszczególnych elementów symulowanych sieci	40
Tab. 3.4 Największy dopuszczalny czas wyłączenia zasilania [52].....	44
Tab. 4.1 Wyniki badań reakcji wyłączników różnicowoprądowych o $I\Delta n = 30\text{ mA}$ na prąd pomiarowy dla wybranych mierników impedancji pętli zwarciowej (funkcja ATT/RCD nie była aktywna). Zwłoczność: B – bezzwłoczny, G – krótkozwłoczny.....	51
Tab. 6.1 Zmienne programu sterującego	80
Tab. 6.2 Zestawienie numeracji rysunków charakterystyk prądu I_{PE} wraz z jego wartością szczytową dla różnych wartości C_0 i R_0	83
Tab. 6.3 Parametry charakterystyczne miernika rezystancji pętli zwarciowej.....	86
Tab. 6.4 Wyniki badań reakcji wyłączników różnicowoprądowych o $I\Delta n = 30\text{ mA}$ na różny prąd pomiarowy. Zwłoczność: B – bezzwłoczny, G – krótkozwłoczny	87



11. ZAŁĄCZNIK 1 – KOD PROGRAMU MIKROKONTROLERA STERUJĄCEGO

```
// DEFINICJE
#define Sg 10 // Przełącznik główny na pinie 4
#define S1 9 // Stycznik 1 na pinie 5
#define S2 7 // Stycznik 2 na pinie 6
#define S3 6 // Stycznik3 na pinie 7
#define SW1 0 // Przycisk na pinie 0

//ZMIENNE
String recived_UART = ""; //Pusty ciąg odebranych danych
String zmienna = "c";
int opcja_menu=0;
int Sg_on=0;
int S1_on=100;
int S2_on=100;
int S3_on=100;
int S3_off=100;
int S2_off=60;
int S1_off=60;
int Sg_off=60;

void setup()
{
  Serial.begin(57600); //Ustawienie prędkości transmisji
  Serial.println("Sterowanie stycznikami"); //Jednorazowe wysłanie tekstu
  pinMode(Sg, OUTPUT); // pin jako wyjście
  pinMode(S1, OUTPUT); // pin jako wyjście
  pinMode(S2, OUTPUT); // pin jako wyjście
  pinMode(S3, OUTPUT); // pin jako wyjście
  pinMode(SW1, INPUT_PULLUP); // pin jako wyjście (podciągnięcie do VCC)

  digitalWrite(Sg, HIGH); // domyślnie stan wysoki (przełącznik wyłączony)
  digitalWrite(S1, HIGH); // domyślnie stan wysoki (przełącznik wyłączony)
  digitalWrite(S2, HIGH); // domyślnie stan wysoki (przełącznik wyłączony)
  digitalWrite(S3, HIGH); // domyślnie stan wysoki (przełącznik wyłączony)
}
void loop()
{
  if (digitalRead(SW1) == LOW){
    opcja_menu=200;
  }
  if(Serial.available() > 0){ //Czy odebrano dane
    recived_UART = Serial.readStringUntil('\n'); //Jeśli tak, to odczytaj je do znaku końca
    linii i zapisz w zmiennej recived_UART

    if(recived_UART == "set")
      opcja_menu=100;
    else if(recived_UART == "czas")
      opcja_menu=110;
    else if(recived_UART == "t_on")
      opcja_menu=111;
    else if(recived_UART == "t_off")
      opcja_menu=112;
    else if(recived_UART == "s")
      opcja_menu=200;
    else if(recived_UART == "help")
      opcja_menu=300;
    else if(recived_UART == "esc"){
      Serial.println("Wyjście z menu...");
      opcja_menu=0;
    }
  }
}
```



```
    }
    else
        Serial.println("NIEZNANA KOMENDA - uzyj komendy help");
}
switch(opcja_menu){
case 100:{
                // ustawienia
    Serial.println("USTAWIENIA:");
    Serial.println("[czas] - zmiana nastawy czasow zalaczenia przekaznikow");
    opcja_menu=0;
    break;
}
case 110:{
                // czas
    Serial.println("Zmiana czasow zalaczenia i wylaczenia przekaznikow:");
    Serial.println("[t_on] - zmiana czasu zalaczenia przekaznikow");
    Serial.println("[t_off] - zmiana czasu wylaczenia przekaznikow");
    Serial.println("[esc] - wyjście z menu");
    opcja_menu=0;
    break;
}
case 111:{
                // t_on
    Serial.println("Zmiana czasow zalaczenia przekaznikow:");

    Serial.print("Przekaznik P_g T_on = ");
    Serial.print(Sg_on);
    Serial.println(" ms");

    Serial.print("Przekaznik P_1 T_on = ");
    Serial.print(S1_on);
    Serial.println(" ms");

    Serial.print("Przekaznik P_2 T_on = ");
    Serial.print(S2_on);
    Serial.println(" ms");

    Serial.print("Przekaznik P_3 T_on = ");
    Serial.print(S3_on);
    Serial.println(" ms");

    opcja_menu=0;
    break;
}
case 112:{
                // t_off
    Serial.println("Zmiana czasow wylaczenia przekaznikow:");

    Serial.print("Przekaznik P_g T_off = ");
    Serial.print(Sg_on);
    Serial.println(" ms");

    Serial.print("Przekaznik P_1 T_off = ");
    Serial.print(S1_off);
    Serial.println(" ms");

    Serial.print("Przekaznik P_2 T_off = ");
    Serial.print(S2_off);
    Serial.println(" ms");

    Serial.print("Przekaznik P_3 T_off = ");
    Serial.print(S3_off);
    Serial.println(" ms");

    opcja_menu=0;
    break;
}
case 200:{
                //start pomiaru
```



```
Serial.println("START POMIARU");
delay(Sg_on);
digitalWrite(Sg, LOW);
Serial.println("Stycznik glowny zalaczony");
delay(S1_on);
digitalWrite(S1, LOW);
Serial.println("Stycznik P_1 zalaczony");
delay(S2_on);
digitalWrite(S2, LOW);
Serial.println("Stycznik P_2 zalaczony");
delay(S3_on);
digitalWrite(S3, LOW);
Serial.println("Stycznik P_3 zalaczony");
delay(S3_off);
digitalWrite(S3, HIGH);
delay(S2_off);
digitalWrite(S2, HIGH);
delay(S1_off);
digitalWrite(S1, HIGH);
delay(Sg_off);
digitalWrite(Sg, HIGH);
Serial.println("KONIEC POMIARU \n");
opcja_menu=0;
break;
}
case 300:{ // help
Serial.println("{set} - ustawienia");
Serial.println(" [czas] - zmiana czasow zalaczenia i wylaczenia przekaznikow");
Serial.println(" [t_on] - zmiana czasow zalaczenia przekaznikow");
Serial.println(" [t_off] - zmiana czasow wylaczenia przekaznikow");
Serial.println("[s] - wlacza pomiar");
Serial.println("[esc] - wyjscie z kazdego menu i podmenu");
opcja_menu=0;
break;
}
}
}
```