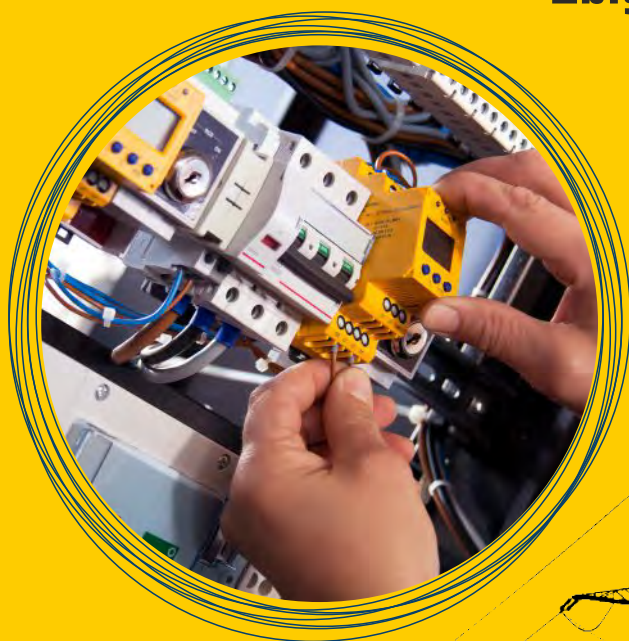


# BUDOWA ORAZ EKSPLOATACJA INSTALACJI I URZĄDZEŃ ELEKTRYCZNYCH

Zbigniew Skibko



Zbigniew Skibko

# **BUDOWA ORAZ EKSPLOATACJA INSTALACJI I URZĄDZEŃ ELEKTRYCZNYCH**



**Politechnika  
Białostocka**

OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI BIAŁOSTOCKIEJ  
BIAŁYSTOK 2026

Recenzent:  
dr hab. inż. Marek Suproniuk, prof. WAT

Redaktor naukowy dyscypliny  
automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne:  
prof. dr hab. inż. Jan Dorosz

Korekta językowa:  
Katarzyna Duniewska

Skład, grafika:  
Oficina Wydawnicza Politechniki Białostockiej

Okładka:  
Marcin Dominów

Zdjęcie na okładce:  
image4you, <https://pixabay.com/photos/electric-wiring-electrics-electro-4198293/>

Rysunki, zdjęcia i tabele umieszczone w publikacji, przy których nie podano źródła,  
zostały wykonane lub opracowane przez jej autora.

© Copyright by Politechnika Białostocka, Białystok 2019, 2026

Wydanie II zmienione i uzupełnione  
ISBN 978-83-68673-48-7 (e-Book)  
DOI: 10.65731/978-83-68673-48-7

(Wydanie I: ISBN 978-83-65596-86-4, eISBN 978-83-65596-87-1)



Publikacja jest udostępniona na licencji  
Creative Commons Uznanie autorstwa-Użycie niekomercyjne-Bez utworów zależnych 4.0  
(CC BY-NC-ND 4.0).

Pełną treść licencji udostępniono na stronie  
[creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.pl](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.pl).  
Publikacja jest dostępna w Internecie na stronie Oficyny Wydawniczej PB.

---

Oficina Wydawnicza Politechniki Białostockiej  
ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok  
e-mail: [oficina.wydawnicza@pb.edu.pl](mailto:oficina.wydawnicza@pb.edu.pl)  
[www.pb.edu.pl](http://www.pb.edu.pl)

# Spis treści

|                                                                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Wstęp .....                                                                                                                | 5   |
| Ćwiczenie nr 1<br>BADANIA EKSPLOATACYJNE<br>INSTALACJI ELEKTRYCZNYCH.....                                                  | 7   |
| Ćwiczenie nr 2<br>INSTALACJE ELEKTRYCZNE –<br>UKŁADY STEROWANIA OŚWIECENIEM .....                                          | 20  |
| Ćwiczenie nr 3<br>INSTALACJE ELEKTRYCZNE –<br>ROZDZIELNICE NISKIEGO NAPIĘCIA .....                                         | 32  |
| Ćwiczenie nr 4<br>BADANIE STANÓW PRACY ELEKTROWNI WIATROWEJ .....                                                          | 41  |
| Ćwiczenie nr 5<br>STEROWANIE SILNIKAMI INDUKCYJNYMI<br>ZA POMOCĄ STYCZNIKÓW .....                                          | 50  |
| Ćwiczenie nr 6<br>BADANIE NAGRZEWANIA SIĘ PRZEWODÓW ELEKTRYCZNYCH<br>POD WPLYWEM PŁYNĄCEGO PRZESIECZNI PRĄDU .....         | 61  |
| Ćwiczenie nr 7<br>BADANIE SPADKÓW NAPIĘĆ W INSTALACJACH ELEKTRYCZNYCH .....                                                | 69  |
| Ćwiczenie nr 8<br>BADANIA WYŁĄCZNIKÓW PRZECIWPORAŻENIOWYCH<br>RÓŻNICOWOPRĄDOWYCH .....                                     | 76  |
| Ćwiczenie nr 9<br>BADANIA SKUTECZNOŚCI OCHRONY PRZECIWPORAŻENIOWEJ<br>W INSTALACJACH ELEKTRYCZNYCH NISKIEGO NAPIĘCIA ..... | 83  |
| Ćwiczenie nr 10<br>BADANIE WYŁĄCZNIKÓW SAMOCZYNNYCH NISKIEGO NAPIĘCIA .....                                                | 92  |
| Ćwiczenie nr 11<br>BADANIE ROZPŁYWU PRĄDÓW I MOCY W UKŁADACH<br>ELEKTROENERGETYCZNYCH .....                                | 104 |
| Ćwiczenie nr 12<br>BADANIE WYBRANYCH PARAMETRÓW PRZEKŁADNIKÓW<br>PRĄDOWYCH I NAPIĘCIOWYCH .....                            | 118 |

|                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Ćwiczenie nr 13                                                                      |     |
| BADANIE WYŁĄCZNIKÓW INSTALACYJNYCH NADPRĄDOWYCH .....                                | 127 |
| Ćwiczenie nr 14                                                                      |     |
| BADANIE ZJAWISK CIEPLNYCH I DYNAMICZNYCH<br>PRZY PRZEPŁYWIE PRĄDÓW ZWARCIOWYCH ..... | 136 |

# Wstęp

Niniejszy skrypt przeznaczony jest przede wszystkim dla studentów studiów inżynierskich, studiujących na kierunkach elektrotechnika i ekoenergetyka na Wydziale Elektrycznym Politechniki Białostockiej, realizujących ćwiczenia laboratoryjne w ramach przedmiotów: eksploatacja instalacji elektrycznych, podstawy elektroenergetyki 2, urządzenia i instalacje elektryczne – na kierunku elektrotechnika – oraz instalacje elektroenergetyczne w obiektach budowlanych – na kierunku ekoenergetyka.

Zakres tematyczny skryptu obejmuje budowę, działanie i eksploatację instalacji oraz urządzeń elektroenergetycznych służących do wytwarzania, przesyłania, rozdziału energii elektrycznej, a także do sterowania i zabezpieczeń. Omówiono również problematykę badań odbiorczych i eksploatacyjnych instalacji i urządzeń niskiego napięcia, a także przedstawiono ćwiczenia związane z badaniem skutków przepływu prądu przez urządzenia elektroenergetyczne.

Każde z ćwiczeń zawiera część teoretyczną, w której przedstawione zostały wiadomości niezbędne do zrozumienia i samodzielnego rozwiązania problematyki danego ćwiczenia, opis stanowiska badawczego, program badań oraz wymagany zakres informacji, które powinny znaleźć się w sprawozdaniu studenckim.

Do powstania skryptu przyczyniło się wiele osób, które pracują lub pracowały na Wydziale Elektrycznym Politechniki Białostockiej. Efektem tej wspólnej pracy jest niniejszy skrypt. Dlatego chciałbym serdecznie podziękować wszystkim osobom – pracownikom oraz studentom – którzy przyczynili się do powstania niniejszego opracowania, za ich trud włożony w utworzenie i ciągły rozwój naszych laboratoriów.

*Autor*



# Ćwiczenie nr 1

## BADANIA EKSPLOATACYJNE INSTALACJI ELEKTRYCZNYCH

### 1. Wiadomości wstępne

#### 1.1. Wymagania stawiane instalacjom elektrycznym

Instalacje i urządzenia elektryczne, przy zachowaniu przepisów rozporządzenia Ministra Infrastruktury z 2002 roku, przepisów dotyczących dostarczania energii, przepisów ochrony przeciwpożarowej, ochrony środowiska oraz bezpieczeństwa i higieny pracy, a także wymagań zawartych w polskich normach odnoszących się do instalacji i urządzeń, powinny zapewniać [1]:

- a) dostarczanie do odbiorników (stosownie do ich potrzeb użytkowych) energii elektrycznej o odpowiednich parametrach technicznych;
- b) ochronę przed:
  - porażeniem prądem elektrycznym,
  - przepięciami łączeniowymi i atmosferycznymi,
  - powstaniem pożaru,
  - wybuchem,
  - emisją drgań i hałasu powyżej dopuszczalnego poziomu,
  - szkodliwym oddziaływaniem pola elektromagnetycznego,
  - innymi szkodami.

W instalacjach elektrycznych należy stosować [1, 3, 4]:

1. Złącze instalacji elektrycznej budynku usytuowane w miejscu dostępnym dla obsługi i dozoru oraz zabezpieczone przed wpływami atmosferycznymi, uszkodzeniami, a także ingerencją osób niepowołanych, umożliwiające odłączenie budynku od sieci zasilającej.
2. W obwodach rozdzielczych i odbiorczych oddzielne przewody ochronny i neutralny.

3. Urządzenia ochronne różnicowoprądowe uzupełniające podstawową ochronę przeciwporażeniową i ochronę przed powstaniem pożaru, które w warunkach uszkodzenia spowodują samoczynne wyłączenie zasilania.
4. W obwodach odbiorczych wyłączniki nadprądowe.
5. Zasadę selektywności (wybiórczości) zabezpieczeń.
6. Przeciwpowozarowe wyłączniki prądu.
7. Główne i miejscowe połączenia wyrównawcze, łączące przewody ochronne z częściami przewodzącymi innych instalacji i konstrukcji budynku. Należy nimi objąć:
  - instalację wodociągową wykonaną z rur metalowych,
  - metalowe elementy instalacji kanalizacyjnej,
  - instalację ogrzewczą wodną wykonaną z rur metalowych,
  - metalowe elementy instalacji gazowej,
  - metalowe elementy szybów i maszynowni dźwigów,
  - metalowe elementy przewodów i wkładów kominowych,
  - metalowe elementy przewodów i urządzeń wentylacyjnych i klimatyzacyjnych,
  - metalowe elementy obudów urządzeń instalacji telekomunikacyjnej.
8. Zasadę prowadzenia tras przewodów elektrycznych w liniach prostych, równoległych (prostopadłych) do krawędzi ścian i stropów.
9. Przewody elektryczne z żyłami wykonanymi z miedzi, jeżeli ich przekrój nie przekracza  $10 \text{ mm}^2$ .
10. Urządzenia ochrony przeciwprzeięciowej.

Przeciwpowozarowy wyłącznik prądu należy stosować w obiektach zawierających strefy zagrożone wybuchem lub w strefach powozarowych o kubaturze przekraczającej  $1000 \text{ m}^3$ . Jego zadaniem jest odcięcie dopływu prądu do wszystkich obwodów, z wyjątkiem obwodów zasilających instalacje i urządzenia, których funkcjonowanie jest niezbędne podczas powozaru. Przycisk wyzwalający przeciwpowozarowy wyłącznik prądu powinien być umieszczony w pobliżu głównego wejścia do obiektu i odpowiednio oznakowany. Odcięcie dopływu prądu przeciwpowozarowym wyłącznikiem prądu nie może powodować samoczynnego załączenia innego źródła energii elektrycznej, z wyjątkiem źródła zasilającego oświetlenie awaryjne (jeżeli występuje ono w budynku) [1].

Instalacja odbiorcza w budynku oraz w samodzielnym lokalu powinna być wyposażona w urządzenie do pomiaru zużycia energii elektrycznej. Powinny być one usytuowane w miejscu łatwo dostępnym i zabezpieczone przed uszkodzeniami i ingerencją osób niepowołanych. W budynku wielorodzinnym liczniki pomiaru zużycia energii elektrycznej należy umieszczać w zamkniętych szafkach poza lokalami mieszkalnymi.

Prowadzenie instalacji elektrycznej oraz rozmieszczenie poszczególnych urządzeń w budynku powinno zapewniać bezkolizyjność z innymi instalacjami i urządzeniami zarówno w zakresie odległości, jak i ich wzajemnego usytuowania. Główne ciągi instalacji elektrycznej w budynku mieszkalnym wielorodzinnym, budynku zamieszkania zbiorowego oraz użyteczności publicznej należy prowadzić poza mieszkaniem i pomieszczeniami przeznaczonymi na pobyt ludzi, w wydzielonych kanałach

lub szybach instalacyjnych (tzw. szachtach). Przewody i kable elektryczne należy prowadzić w sposób umożliwiający ich wymianę bez potrzeby naruszania konstrukcji budynku. Przewody i kable elektryczne wykorzystywane w obwodach oświetlenia awaryjnego, urządzeń alarmu pożaru i łączności powinny mieć klasę odporności ogniowej PH [6], odpowiednią do czasu wymaganego do działania tych urządzeń. Obwody odbiorcze instalacji elektrycznej w budynku wielorodzinnym należy prowadzić w obrębie każdego mieszkania lub lokalu użytkowego [1].

W instalacji elektrycznej w mieszkaniu należy wyodrębnić obwody [1]:

- oświetlenia,
- gniazd wtyczkowych ogólnego przeznaczenia,
- gniazd wtyczkowych w łazience,
- gniazd wtyczkowych do urządzeń odbiorczych w kuchni,
- do odbiorników wymagających indywidualnego zabezpieczenia.

Pomieszczenia w mieszkaniu należy wyposażać w wypusty oświetleniowe oraz w niezbędną liczbę odpowiednio rozmieszczonych gniazd wtyczkowych. Instalacja oświetleniowa w pokojach powinna umożliwiać załączanie źródeł światła przy pomocy łączników wieloobwodowych.

Oświetlenie i odbiorniki w pomieszczeniach technicznych, gospodarczych oraz komunikacji ogólnej w budynkach wielorodzinnych powinny być zasilane z tablic administracyjnych.

Mieszkania w budynku wielorodzinnym i odrębne mieszkania w budynku zamieszkania zbiorowego należy wyposażać w instalację wejściowej sygnalizacji dzwonekowej, a w razie przeznaczenia ich dla osób niepełnosprawnych – również w sygnalizację alarmowo-przyzywową.

## 1.2. Oględziny instalacji

Oględziny polegają na sprawdzeniu stanu instalacji i urządzeń elektrycznych przy pomocy wszystkich zmysłów. Należy je wykonać w celu potwierdzenia, czy dana instalacja lub urządzenie [2]:

- spełnia wymagania bezpieczeństwa odpowiednich norm wyrobu (jest kompletne),
- nie ma widocznych uszkodzeń wpływających na pogorszenie bezpieczeństwa (jest nieuszkodzone).

Oględziny powinny obejmować co najmniej sprawdzenie (jeśli dany element ma zastosowanie) [2]:

- sposobu ochrony przed porażeniem prądem elektrycznym;
- obecności przegród ogniowych i innych środków ochrony przed skutkami działania ciepła oraz zapobiegających rozprzestrzenianiu się ognia;
- doboru przekroju żył przewodów z uwagi na ich obciążalność prądową i spadek napięcia;

- doboru i nastaw urządzeń zabezpieczających i sygnalizacyjnych;
- prawidłowego umieszczenia urządzeń do odłączania izolacyjnego i łączenia;
- doboru urządzeń i środków ochrony przed oddziaływaniem środowiska zewnętrznego;
- prawidłowego oznaczenia przewodów (kolorystycznego, numerycznego);
- obecności schematów, napisów ostrzegawczych lub innych niezbędnych informacji;
- poprawności połączeń przewodów;
- obecności i ciągłości przewodów, w tym przewodów do ochrony, połączeń wyrównawczych głównych i połączeń wyrównawczych dodatkowych;
- dostępności urządzeń umożliwiającej ich wygodną obsługę i konserwację.

### 1.3. Pomiary instalacji elektrycznej

Pomiary w instalacjach i urządzeniach elektrycznych obejmują ustalanie odpowiednich wartości za pomocą właściwych przyrządów pomiarowych (wartości niewykrywalnych za pomocą oględzin).

W zależności od budowy instalacji elektrycznej należy przeprowadzić następujące próby (najlepiej wykonać je w przytoczonej poniżej kolejności) [2]:

1. Ciągłość przewodów – należy wykonać próbę ciągłości elektrycznej przewodów ochronnych oraz przewodów czynnych.
2. Rezystancja izolacji instalacji elektrycznej – szerzej zagadnienie to zostanie omówione w podrozdziale 1.4.
3. Ochrona za pomocą SELV, PELV lub separacji elektrycznej.
4. Rezystancja/impedancja podłóg i ścian – w razie konieczności sprawdzenia wymagań dotyczących rezystancji izolacji podłóg i ścian należy wykonać co najmniej trzy pomiary w tym samym pomieszczeniu, z czego jeden pomiar wykonuje się w odległości około 1 m od dostępnej w tym pomieszczeniu części przewodzącej obcej, a pozostałe przy większych odległościach. Pomiar rezystancji/impedancji podłóg izolacyjnych i ścian wykonuje się przy napięciu układu w stosunku do ziemi i przy częstotliwości nominalnej.
5. Samoczynne wyłączanie zasilania.
6. Ochrona dodatkowa.
7. Sprawdzenie biegunowości i kolejności faz – ponieważ przepisy zabraniają instalowania łączników jednobiegunowych w przewodzie neutralnym, należy przeprowadzić próbę w celu sprawdzenia, czy wszystkie takie łączniki są włączone jedynie w przewody fazowe. W przypadku obwodów wielofazowych należy sprawdzić, czy kolejność faz jest zachowana.
8. Próby funkcjonalne i operacyjne – zespoły, takie jak rozdzielnice i sterownice, napędy, urządzenia sterownicze i blokady, powinny być poddane próbie działania w celu sprawdzenia, czy są zmontowane, nastawione i zainstalowane zgodnie z odpowiednimi wymaganiami właściwej normy.

9. Spadek napięcia – może być oszacowany na podstawie pomiaru impedancji obwodu lub na podstawie diagramu, którego przykład podano w PN-HD 60364-6 [2].

## 1.4. Pomiar rezystancji izolacji

Pomiary rezystancji izolacji służą do określenia stanu izolacji instalacji oraz odbiorników energii elektrycznej. Stan izolacji ma decydujący wpływ na bezpieczeństwo obsługi i prawidłowe funkcjonowanie instalacji i urządzeń elektrycznych. Systematyczne wykonywanie badań jest niezbędne w celu wykrycia pogarszającego się stanu izolacji. Na degradację izolacji mają wpływ przede wszystkim:

- natężenie prądu elektrycznego płynącego przez urządzenie (oddziaływanie elektromagnetyczne, dynamiczne i termiczne),
- narażenia mechaniczne,
- agresja chemiczna wynikająca między innymi z zanieczyszczenia środowiska.

Do czynników wpływających na zmierzoną wartość rezystancji izolacji należą:

- wilgotność,
- temperatura,
- napięcie pomiarowe,
- czas pomiaru,
- czystość powierzchni materiału izolacyjnego.

Pomiar rezystancji izolacji miernikami elektronicznymi polega na podaniu na zaciski mierzonego obiektu stałego napięcia pomiarowego (o wartości wyższej od znamionowego napięcia pracy badanego urządzenia) i określeniu płynącego w obwodzie pomiarowym prądu oraz obliczeniu przez mikroprocesor wartości rezystancji.

Przed wykonaniem pomiarów należy upewnić się, czy mierzony obiekt jest odłączony od sieci zasilającej. Podczas pomiaru rezystancji izolacji jej wartość początkowo szybko wzrasta, po czym stopniowo ustala się. Zjawisko to jest spowodowane zmianami zachodzącymi w materiale izolacyjnym pod wpływem pola elektrycznego oraz prądu przepływającego przez ten materiał. Izolowane części metalowe (np. pancierz kabla) stanowią kondensator, co powoduje, że początkowo płynie prąd pojemnościowy o znacznej wartości. Prąd ten po pewnym czasie maleje do zera, a szybkość jego zanikania zależy od pojemności badanego obiektu. Zgromadzony w ten sposób ładunek stanowi źródło potencjalnego zagrożenia, dlatego po pomiarze badany element powinien być bezwzględnie rozładowany (niektóre mierniki elektroniczne dokonują po zakończeniu pomiarów samoczynnego rozładowania mierzonego obiektu).

Wartość rezystancji izolacji należy mierzyć między przewodami czynnymi a przewodem ochronnym przyłączonym do układu uziemiającego. Do celów tego pomiaru przewody czynne można połączyć razem, a przewód neutralny odłączyć od przewodu ochronnego [2]. W sieciach typu TN-C pomiar wykonuje się między przewodami czynnymi a przewodem ochronno-neutralnym PEN.

W pomieszczeniach, w których występuje zagrożenie pożarowe, pomiar rezystancji izolacji powinien być wykonany również pomiędzy przewodami czynnymi. W praktyce pomiar rezystancji izolacji należy wykonywać jeszcze podczas montażu instalacji, przed przyłączeniem wyposażenia. Wymagane przez aktualnie obowiązujące normy minimalne wartości rezystancji izolacji przedstawiono w tab. 1.

TAB. 1. Minimalne wartości rezystancji izolacji [2]

| Lp. | Napięcie nominalne obwodu (V) | Napięcie probiercze DC | Rezystancja izolacji [MΩ] |
|-----|-------------------------------|------------------------|---------------------------|
| 1.  | SELV i PELV                   | 250                    | >0,5                      |
| 2.  | Do 500 V włącznie, w tym FELV | 500                    | >1,0                      |
| 3   | Powyżej 500 V                 | 1 000                  | >1,0                      |

Wartości rezystancji izolacji są zwykle dużo większe niż wartości podane w tab. 1. Jeżeli wartości wykazują znaczące różnice, konieczne są dalsze badania w celu zidentyfikowania przyczyn.

Jeżeli istnieje prawdopodobieństwo, że ograniczniki przepięć lub inne urządzenia mogą mieć wpływ na próbę sprawdzającą lub mogą się podczas niej uszkodzić, takie urządzenia należy przed wykonaniem próby odłączyć. Jeżeli odłączenie urządzeń jest w sposób uzasadniony niewskazane, napięcie probiercze dotyczące szczególnego obwodu może być obniżone do 250 V DC, ale rezystancja izolacji powinna mieć wartość co najmniej 1 MΩ.

## 1.5. Instrukcje obsługi przykładowych przyrządów pomiarowych wykorzystywanych w badaniach eksploatacyjnych instalacji elektrycznych

### Cyfrowy miernik mocy C.A. 8210

Przyrząd C.A. 8210 jest cyfrowym miernikiem mocy, który umożliwia pomiary wielkości w jednofazowych i symetrycznych trójfazowych sieciach prądu zmiennego.

Podczas pomiarów z wykorzystaniem tego przyrządu należy przestrzegać następujących środków bezpieczeństwa:

1. Maksymalne dopuszczalne napięcie na wejściu napięciowym wynosi 600 V. Do pomiarów należy używać jedynie przewodów dostarczonych wraz z przyrządem.

2. Na wejściu zacisku (cęgów) prądowego należy używać jedynie zacisku Y13 dostarczonego wraz z przyrządem lub zacisku C34A dostępnego jako wyposażenie dodatkowe.
3. Nigdy nie należy używać przyrządu bez obudowy przeciwudarowej.



RYS. 1. Wygląd miernika mocy C.A. 8210

Miernik umożliwia pomiar wartości siedmiu wielkości [6]:

- wartości skutecznej napięcia V,
- wartości skutecznej prądu A,
- mocy czynnej W,
- współczynnika mocy  $\cos \varphi$ ,
- mocy pozornej VA,
- mocy biernej var,
- częstotliwości Hz.

Zmiana zakresu pomiarowego odbywa się w sposób automatyczny.

Miernik C.A. 8210 ma ponadto trzy dodatkowe funkcje:

- zapamiętywanie (MEM);
- zapamiętywanie wartości szczytowej (PEAK) prądu, mocy czynnej lub napięcia;
- pomiar różnicy napięć, prądu i mocy czynnej (MEM + PAGE).

Podstawowe dane techniczne miernika C.A. 8210:

- zakres pomiarowy prądu od 1 A do 500 A – prąd przemienny,
- napięcie pomiarowe do 825 V,

- zakres mocy czynnej od 30 W do 300 kW,
- zakres mocy biernej od -300 kvar do +300 kvar,
- zakres częstotliwości 5 Hz do 999 Hz,
- temperatura pracy od -10°C do +50°C,
- temperatura przechowywania od -20°C do +60°C,
- średni czas ciągłej pracy 50 h,
- stopień ochrony obudowy IP 40.

Miernik C.A. 8210 wyposażony jest w przyciski:

1. ON/OFF – załączanie (ON) i wyłączanie (OFF) przyrządu.
2. Przełącznik Ph1/Ph3 – przełącznik należy ustawić zgodnie z typem badanej sieci: Ph1 oznacza wybór sieci jednofazowej, Ph3 wybór sieci symetrycznej trójfazowej.
3. PAGE (wybór strony) – pierwsza strona z wynikami pomiarów wyświetlana jest automatycznie po włączeniu miernika. Wyświetlane są na niej następujące wielkości:
  - wartość skuteczna napięcia (V),
  - wartość skuteczna prądu (A),
  - wartość mocy czynnej (W),
  - wartość współczynnika mocy ( $\cos\varphi$ ).

Aby wyświetlić drugą stronę, należy trzymać wciśnięty przycisk PAGE. Wyświetlane są na niej następujące wielkości:

  - wartość mocy biernej (var),
  - wartość mocy pozornej (VA),
  - wartość częstotliwości (Hz).

Gdy przycisk PAGE zostanie zwolniony, wyświetlacz powróci do wyświetlania strony pierwszej.
4. PEAK – po jednorazowym naciśnięciu tego przycisku przyrząd przestawi się na pomiar wartości szczytowej i na wyświetlaczu pojawi się wartość szczytowa prądu. Aby wybrać, dla jakiej wielkości ma być wyznaczana wartość szczytowa (prąd, moc, napięcie), należy użyć przycisku SEL. Po wybraniu tego trybu zapamiętywane są wartości wszystkich wykonywanych pomiarów. Pierwsze cztery zapamiętane wartości pomiarowe można odczytać na pierwszej stronie, a następne trzy na drugiej (aby uzyskać wyświetlanie drugiej strony, należy trzymać wciśnięty przycisk PAGE). Każda nowa występująca wartość szczytowa jest brana pod uwagę tak długo, jak długo uaktywniony jest przycisk PEAK. Aby wyjść z trybu pomiaru wartości szczytowej, należy ponownie nacisnąć przycisk PEAK.
5. SEL – za pomocą tego przycisku wybiera się pomiar wielkości prądu (A), mocy (W) lub napięcia (V), której wartość szczytowa ma być mierzona. Przycisk ten może być użyty tylko po uprzednim naciśnięciu przycisku PEAK. Początkowo wyświetlana jest wartość szczytowa prądu. Jednorazowe naciśnięcie przycisku SEL powoduje wyświetlenie wartości szczytowej mocy, a kolejne – wartości szczytowej napięcia.

6. MEM – przycisk ten umożliwia dostęp do dwóch funkcji:
- Zapamiętywanie – po naciśnięciu przycisku MEM (wyświetlone zostaną litery „MEM”) zostanie zapamiętana pierwsza strona wyświetlacza, czyli wartości napięcia, prądu, mocy czynnej oraz współczynnika mocy.
  - Pomiary różnicowe – po zapamiętaniu wartości z pierwszej strony (wyświetlany jest napis „MEM”) należy nacisnąć przycisk PAGE. Na drugiej stronie zostaną wyświetlone różnice napięcia, prądu i mocy czynnej pomiędzy wartościami zapamiętanymi z pierwszej strony a wartościami na bieżąco zmierzonymi przez przyrząd.

### Cyfrowy miernik izolacji MIC-1

Uniwersalny miernik izolacji MIC-1 jest przenośnym cyfrowym przyrządem pomiarowym przeznaczonym do bezpośredniego wykonywania pomiarów rezystancji izolacji linii kablowych, transformatorów, silników i innych urządzeń elektroenergetycznych. Ponadto miernik umożliwia pomiar wartości napięć, prądów i rezystancji tak jak klasyczny multimetr.

Miernik MIC-1 wyróżnia się następującymi cechami:

- trzy wybieralne wartości napięć pomiarowych stałych: 500 V, 1000 V i 2500 V;
- automatyczne dobieranie zakresów pomiarowych;
- po zakończeniu pomiaru rezystancji izolacji samoczynne rozładowywanie pojemności mierzonego obiektu;
- tryb HOLD zatrzymujący na wyświetlaczu wynik ostatniego pomiaru;
- pomiar współczynników absorpcji dla dwóch dowolnych odcinków czasu (z przedziału 10–600 sekund);
- akustyczna informacja o upływającym czasie (sygnał podawany jest co 5 sekund) oraz o alarmach pomiarowych;
- wskaźnik stanu naładowania akumulatorów;
- samoczynne wyłączanie;
- wbudowany układ automatycznego ładowania wewnętrznych akumulatorów z zasilacza zewnętrznego.



RYS. 2. Wygląd miernika izolacji MIC-1 [5]

Przed wykonaniem pomiaru wartości rezystancji izolacji należy włożyć dwie sondy pomiarowe w gniazda +ISO oraz –ISO i wybrać właściwą wartość napięcia probierczego. Przy pomiarze rezystancji izolacji kabla między jedną z żył kabla a jego

płaszczyzną wpływ rezystancji powierzchniowych (istotny w trudnych warunkach atmosferycznych) eliminuje się, łącząc nawiniętą na izolację mierzonej żyły folię metalową z wejściem COM/E miernika. Podczas pomiarów rezystancji izolacji między dwiema żyłami kabla należy dołączyć do zacisku COM/E pozostałe żyły, niebiorące udziału w pomiarze.

## 1.6. Protokołowanie sprawdzenia odbiorczego

Po zakończeniu sprawdzania nowej, rozbudowanej lub zmienionej instalacji elektrycznej albo urządzenia elektrycznego, należy sporządzić protokół odbiorczy. Taka dokumentacja powinna zawierać opis instalacji objętej badaniem oraz zapis z oględzin i wyników prób. Wady i braki wykazane podczas sprawdzania instalacji lub urządzenia elektrycznego należy usunąć, zanim wykonawca zadeklaruje, że instalacja spełnia wymagania przepisów i norm w tym zakresie [2]. Protokół może zawierać również zalecenia napraw lub ulepszeń (w przypadku sprawdzania odbiorczego zmienionej lub rozbudowanej istniejącej instalacji elektrycznej).

Zapisy szczegółów dotyczących obwodu i wyników prób powinny jednoznacznie identyfikować każdy z badanych elementów (np. obwodów).

W protokole należy podać imię i nazwisko osoby lub osób odpowiedzialnych za bezpieczeństwo, budowę i sprawdzenie instalacji, uwzględniając indywidualną odpowiedzialność tych osób w stosunku do osoby zlecającej pracę.

Protokół odbiorczy instalacji elektrycznej powinien zawierać zalecenie dotyczące okresu między sprawdzeniem odbiorczym i pierwszym sprawdzeniem okresowym (najczęściej podaje się w nim datę następnego badania). Protokół powinien być opracowany i podpisany przez osobę lub osoby kompetentne w zakresie przeprowadzania sprawdzenia.

## 1.7. Protokołowanie sprawdzenia okresowego

Sprawdzanie okresowe, obejmujące szczegółowe badanie urządzenia lub instalacji elektrycznej, należy przeprowadzić bez jej demontażu lub – jeżeli jest wymagany – z częściowym demontażem i uzupełnić właściwymi próbami i pomiarami, tak aby zapewnić w szczególności [2]:

- bezpieczeństwo osób i zwierząt przed porażeniem prądem elektrycznym;
- ochronę mienia przed uszkodzeniami powstałymi w wyniku pożaru lub ciepłem powstałym na skutek uszkodzenia urządzenia lub instalacji;
- pewność, że badana instalacja nie jest uszkodzona lub jest uszkodzona w stopniu nieobniżającym bezpieczeństwa jej użytkowania;
- identyfikację wad instalacji i odchyłeń od wymagań obowiązujących przepisów i norm, które mogą spowodować niebezpieczeństwo.

Po zakończeniu sprawdzenia okresowego działającej instalacji elektrycznej należy sporządzić protokół okresowy, który powinien zawierać szczegóły dotyczące sprawdzanych urządzeń lub instalacji, opis oględzin (łącznie z wykrytymi wadami i usterkami) oraz wyniki prób. W protokole okresowym mogą znaleźć się również zapisy dotyczące zalecanych napraw lub ulepszeń, takich jak modernizacja instalacji w celu doprowadzenia do zgodności z aktualnymi przepisami i normami. Przykłady formularzy oględzin z zakresu wyposażenia instalacji oraz identyfikacji urządzeń przedstawiono odpowiednio w tab. 2 i 3 [2].

TAB. 2. Wygląd przykładowego formularza oględzin z zakresu wyposażenia instalacji [2]

| Wyposażenie                                                                                                                                                                                                                                                                             | Dobór <sup>1)</sup> | Montaż <sup>2)</sup> | Uwagi |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------|-------|
| Przewody                                                                                                                                                                                                                                                                                |                     |                      |       |
| Osprzęt do przewodów                                                                                                                                                                                                                                                                    |                     |                      |       |
| Rury instalacyjne                                                                                                                                                                                                                                                                       |                     |                      |       |
| Listwy                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                     |                      |       |
| Urządzenia rozdzielcze                                                                                                                                                                                                                                                                  |                     |                      |       |
| Oprawy oświetleniowe                                                                                                                                                                                                                                                                    |                     |                      |       |
| Urządzenia ochronne                                                                                                                                                                                                                                                                     |                     |                      |       |
| Inne                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                     |                      |       |
| <sup>1)</sup> Widoczna zgodność z odpowiednią normą wyrobu. W przypadku wątpliwości deklarację zgodności z normą należy uzyskać od producenta (np. z katalogu).<br><sup>2)</sup> Wpisać „TAK”, jeżeli jest zgodne z przepisami i normami instalacyjnymi, „NIE” – jeżeli jest niezgodne. |                     |                      |       |

TAB. 3. Wygląd przykładowego formularza oględzin z zakresu identyfikacji urządzeń [2]

| Wyszczególnienie                                     | Obecność | Prawidłowe umiejscowienie | Prawidłowe sformułowanie | Uwagi |
|------------------------------------------------------|----------|---------------------------|--------------------------|-------|
| Oznaczenie urządzeń ochronnych, łączników i zacisków |          |                           |                          |       |
| Napisy ostrzegawcze                                  |          |                           |                          |       |
| Napisy wskazujące na niebezpieczeństwo               |          |                           |                          |       |
| Identyfikacja przewodów                              |          |                           |                          |       |
| Urządzenia do odłączania                             |          |                           |                          |       |
| Łączniki                                             |          |                           |                          |       |
| Schematy i plany                                     |          |                           |                          |       |

Osoba odpowiedzialna za sprawdzenie lub osoba upoważniona do działania w jej imieniu powinna po podpisaniu protokołu przekazać go osobie zlecającej sprawdzenie.

## 1.8. Przykład protokołu z badań okresowych rezystancji izolacji w sieci TN-S

PROTOKÓŁ nr .....

### BADANIA REZYSTANCJI IZOLACJI W OBWODACH INSTALACJI ELEKTRYCZNEJ O UKŁADZIE TN-S, O NAPIĘCIU ZNAMIONOWYM $U_n = 230/400$ V

1. *Zlecaniodawca:*
2. *Obiekt badań:*
3. *Data badania:*
4. *Rodzaj zasilania:*
5. *Przyrządy pomiarowe:*
6. *Temperatura podczas pomiaru: .....°C*
7. *Wyniki badań:*  
Napięcie próby .....V

TAB. 1. Wyniki pomiarów rezystancji izolacji

| Lp.                                                                                            | Nazwa linii lub nr obwodu | Wynik pomiarów w MΩ | Rwym | Rzm > Rwym |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------|------|------------|
|                                                                                                |                           | L, N – PE           | MΩ   | TAK – NIE  |
| 1.                                                                                             |                           |                     |      |            |
| 2.                                                                                             |                           |                     |      |            |
| ...                                                                                            |                           |                     |      |            |
| Rwym – wymagana wartość rezystancji izolacji;<br>Rzm – zmierzona wartość rezystancji izolacji. |                           |                     |      |            |

8. *Uwagi i wnioski:*
  - a) Wynik oględzin instalacji i urządzeń jest: **pozytywny/negatywny**.
  - b) Zalecenia z poprzedniego protokołu: **spełnione/niespełnione**.
  - c) Zauważone usterki:
9. *Ocena wyników badań:*
10. *Termin następnych badań:*

Badania wykonał:

Protokół sprawdził:

## 2. Cel i zakres ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z wymaganiami stawianymi instalacjom elektrycznym, metodami kontroli stanu instalacji oraz z zasadą działania i zakresem stosowania podstawowych mierników wykorzystywanych do badań.

W trakcie ćwiczenia należy:

- wykonać oględziny instalacji i urządzeń elektrycznych wskazanych przez prowadzącego;
- zapoznać się z budową i instrukcją obsługi mierników wykorzystywanych do pomiarów;
- wykonać wskazane przez prowadzącego próby pomiarowe;
- sporządzić odpowiednie protokoły z badań, ze szczególnym zwróceniem uwagi na poprawność uzyskanych rezultatów.

## 3. Sprawozdanie studenckie

Sprawozdanie z ćwiczenia powinno zawierać:

1. Opis badanych urządzeń, układów, instalacji.
2. Zestawienie zmierzonych oraz obliczonych wielkości.
3. Protokoły z badań.
4. Wnioski.

## Literatura

1. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, z późniejszymi zmianami (Dz.U.02.75.690).
2. PN-HD 60364-6: 2008 *Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 6: Sprawdzenie.*
3. Lejdy B., Sulkowski M., *Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych*, WNT, Warszawa 2019.
4. Markiewicz H., *Instalacje elektryczne*, WNT, Warszawa 2018.
5. Instrukcje do mierników firmy Sonel.
6. PN-EN 50200:2016-01 *Metoda badania odporności na ogień cienkich przewodów i kabli bez ochrony specjalnej, stosowanych w obwodach zabezpieczających.*

# Ćwiczenie nr 2

## INSTALACJE ELEKTRYCZNE – UKŁADY STEROWANIA OŚWIETLENIEM

### 1. Wiadomości wstępne

#### 1.1. Wiadomości ogólne

Instalacją elektryczną nazywa się zbiór urządzeń o skoordynowanych parametrach technicznych, o napięciu znamionowym do 1 kV prądu przemiennego i 1,5 kV prądu stałego, służących do doprowadzenia energii elektrycznej z sieci rozdzielczej do odbiorników.

W skład instalacji wchodzi przewody i kable elektryczne, osprzęt instalacyjny, przyrządy zabezpieczające, urządzenia ochronne, urządzenia automatyki i sterowania, osprzęt pomiarowy oraz obudowy z konstrukcjami wsporczymi wraz z rezerwowymi źródłami zasilania [3].

Z uwagi na sposób zasilania odbiorników z instalacji elektrycznej można wydzielić [1, 2]:

- instalację oświetleniową zasilającą elektryczne źródła światła oraz przenośne urządzenia elektryczne o niewielkiej mocy;
- instalację gniazd wtyczkowych;
- instalację siłową zasilającą urządzenia o znacznym poborze mocy (najczęściej powyżej 2 kW).

Projekt instalacji elektrycznej oraz jej wykonanie powinno zagwarantować stałą dostawę energii elektrycznej o odpowiednich parametrach technicznych oraz ochronę przed porażeniem prądem elektrycznym, pożarem, przepięciami łączeniowymi oraz innymi niebezpieczeństwami wynikającymi z pracy urządzeń elektrycznych.

## 1.2. Przewody i kable elektroenergetyczne

Przewodami i kablami elektroenergetycznymi nazywa się elementy systemu elektroenergetycznego, które służą do przesyłania energii elektrycznej w liniach elektroenergetycznych i instalacjach elektrycznych po określonej drodze.

Kabel to wyrób przemysłowy składający się z jednej lub większej liczby żył izolowanych, w powłoce, ewentualnie osłonie ochronnej i pancerzu, odporny na szkodliwe oddziaływanie środowiska, takie jak promieniowanie ultrafioletowe czy oddziaływanie gruntu.

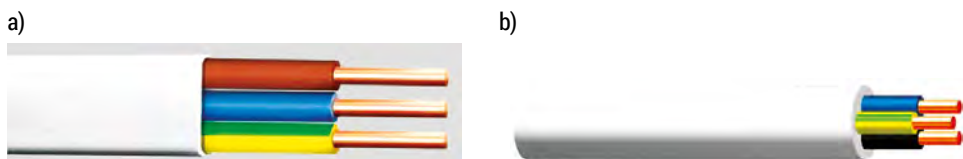
Przewód to wyrób przemysłowy składający się z jednego lub kilku skręconych drutów w izolacji/powłoce lub bez. Przewody mogą być jedno- lub wielożyłowe.

Główną częścią przewodu/kabla jest żyła. Wykonuje się ją najczęściej z miedzi lub aluminium. Ze względu na budowę żyły rozróżnia się przewody/kable:

- jednodrutowe – żyła wykonana jest z pojedynczego drutu;
- wielodrutowe (tzw. linka) – żyła wykonana jest z określonej liczby skręconych drutów.

Aby określić parametry kabla lub przewodu zostały wprowadzone literowe symbole informujące o składzie materiałowym i konstrukcji. Powszechnie spotykane przewody jednożyłowe mają oznaczenia DY oraz LY. Przewody typu DY wykonane są z jednej miedzianej żyły w izolacji z polichlorku winylu (PVC). W przewodach typu LY żyła wykonana jest jako wielodrutowa (tzw. linka) i osłonięta izolacją z polwinitu. Znamionowe przekroje żył zostały znormalizowane i produkowane są w przekrojach od 0,5 do 10 mm<sup>2</sup> dla żył jednodrutowych oraz od 0,5 do 240 mm<sup>2</sup> dla żył wielodrutowych.

Do najczęściej spotykanych przewodów wielożyłowych zalicza się przewody typu YDY. Żyły przewodów osłonięte są izolacją z polwinitu, a dodatkowo otacza je także wspólna powłoka polwinitowa. W zależności od rodzaju przewodu wielożyłowego (YDY(t,p)żo) przewody te przyjmują różne kształty (rys. 1). W zależności od sposobu wykonania żyły rozróżnia się przewody z żyłami w postaci linki miedzianej (YLY) oraz z żyłami w postaci pojedynczych drutów (YDY). Oznaczenie „żo” w symbolu przewodu informuje o występowaniu w nim żyły ochronnej (w kolorze żółto-zielonym).



RYS. 1. Przewód trójżyłowy: a) płaski typu YDYpżo; b) okrągły typu YDYżo

Zaleca się, aby oznaczenia barwne stosować na całej długości przewodu (żyły) za pomocą barwnej izolacji lub barwnych oznaczników. Taką symbolikę stosuje się w celu identyfikacji oraz zwiększenia stopnia bezpieczeństwa [4, 5].

Oznaczenia jednobarwne używane są do oznaczania przewodów, które nie spełniają funkcji przewodu ochronnego. Do scharakteryzowania przewodów fazowych powinno się używać barw brązowej, czarnej lub szarej, a przewód neutralny należy oznaczać kolorem niebieskim. Ze względów bezpieczeństwa (wyliminowanie ryzyka pomyłki przewodów) pojedyncze barwy żółta i zielona nie powinny być stosowane razem z barwą zielono-żółtą. Przewód izolowany PEN powinien być oznaczony na całej długości kolorem żółto-zielonym, a na końcu dodatkowo kolorem niebieskim (lub odwrotnie).

### 1.3. Wykonanie instalacji elektrycznej

Wykonawca instalacji elektrycznej odpowiedzialny jest za jakość wykonanej pracy, zgodność wykonania z poleceniami inspektora oraz z obowiązującymi przepisami, normami i odpowiednimi wytycznymi. Wszystkie urządzenia wraz z oprzewodowaniem powinny zostać tak zainstalowane, aby zapewnione były niezawodność działania, możliwość przeglądów oraz łatwy dostęp do połączeń. Instalację należy montować tak, aby nie kolidowała ona z innymi instalacjami. Parametry techniczne elementów użytych podczas montażu powinny odpowiadać warunkom, w których mają być one zainstalowane (w szczególności należy zadbać o odpowiedni stopień IP). Każdy element powinien być oznakowany tak, aby była możliwość jego identyfikacji przy sprawdzaniu, badaniu, naprawach lub modernizacjach instalacji. Materiały użyte do budowy instalacji elektrycznej powinny posiadać wymagane przepisami świadectwa jakości, atesty, certyfikaty, świadectwa gwarancyjne lub aprobaty techniczne. Przewody z żyłami o przekroju do 10 mm<sup>2</sup> włącznie muszą posiadać żyły wykonane z miedzi [3].

Wykonanie instalacji elektrycznych powinno spełniać następujące warunki [6]:

1. Żyły aluminiowe można stosować w przewodach/kablach o przekroju żył powyżej 10 mm<sup>2</sup>.
2. Przewody elektroenergetyczne powinny być układane w sposób umożliwiający ich wymianę bez konieczności naruszania konstrukcji budynku.
3. Trasy ułożenia kabli powinny przebiegać w liniach prostych, równoległych/prostopadłych do krawędzi ścian i stropów.
4. Główne, pionowe ciągi instalacji elektrycznych w budynkach wielorodzinnych lub użyteczności publicznej należy prowadzić w wydzielonych kanałach lub szynach instalacyjnych poza lokalami mieszkalnymi.
5. W instalacjach rozdzielczych i odbiorczych należy stosować osobne przewody neutralne (N) i ochronne (PE).
6. Instalacje odbiorcze powinny być wyposażone w urządzenia do pomiaru zużycia energii elektrycznej zlokalizowane w miejscach łatwo dostępnych, chronione przed uszkodzeniami i dostępem osób nieupoważnionych.

## 1.4. Łączniki instalacyjne

Łączniki instalacyjne niskiego napięcia to najprostsze łączniki elektryczne, przeznaczone do załączania i wyłączania prądów roboczych. Proces zmiany stanu łącznika odbywa się (dzięki zainstalowanej w nim sprężynce napędowej) z dużą prędkością, migowo, niezależnie od szybkości manipulowania przyciskiem (klawiszem). Dzięki temu zapewnia się szybkie gaszenie powstającego między stykami łuku elektrycznego, co ogranicza zużywanie się styków [3].

Ze względu na sposób budowy i montażu łączniki dzieli się na wtynkowe i natynkowe.

Z uwagi na funkcje łączeniowe w obwodach elektrycznych łączniki instalacyjne można podzielić na:

- łączniki jednobiegunowe, służące do załączania i wyłączania jednego obwodu;
- łączniki chwilowe (dzwonkowe), służące do załączenia jednego obwodu poprzez podanie impulsu na układ sterujący;
- łączniki szeregowo (świecznikowe), służące do niezależnego załączania i wyłączania dwóch lub więcej obwodów;
- łączniki zmienne (schodowe), służące do załączania i wyłączania jednego obwodu z dwóch różnych miejsc;
- łączniki krzyżowe, służące do załączania i wyłączania obwodu z trzech i więcej miejsc – stosowane jako zwielokrotnienie łączników schodowych.

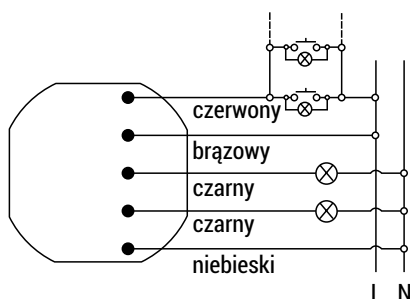
## 1.5. Gniazda elektryczne

Gniazda wtyczkowe w połączeniu z wtyczkami służą do podłączenia do instalacji stałej odbiorników ruchomych i przenośnych. Produkowane są one w wersjach jedno- i trójfazowej. Gniazda wtyczkowe jednofazowe wykonywane są jako wtynkowe i natynkowe, na napięcie 250 V i prąd znamionowy 10 i 16 A. Gniazda powinny posiadać styk ochronny (najczęściej w postaci bolca). Po włożeniu wtyczki do gniazda styki czynne wtyczki (w formie bolców) stykają się ze stykami gniazda (w formie blaszek wyprofilowanych w kształt tulejki), umożliwiając przepływ prądu. Taki rodzaj połączenia powinien charakteryzować się małą rezystancją oraz brakiem iskrzenia podczas pracy.

Konstrukcja gniazd wtyczkowych powinna zapewniać ochronę przed bezpośrednim dotknięciem części czynnych będących podczas pracy pod napięciem.

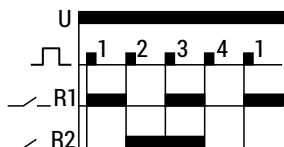
## 1.6. Przekaznik bistabilny sekwencyjny (świecznikowy)

Przekaznik bistabilny sekwencyjny służy do sterowania oświetleniem bądź innym urządzeniem elektrycznym z kilku różnych punktów za pomocą równolegle połączonych przycisków sterujących. Schemat połączeń oraz przebieg stanów pracy pokazano odpowiednio na rys. 2 i 3.



RYS. 2. Schemat połączeń przekąznika bistabilnego

| Impuls | Stan działania            |
|--------|---------------------------|
| 1      | Załączona tylko sekcja R1 |
| 2      | Załączona tylko sekcja R2 |
| 3      | Załączone sekcje R1 i R2  |
| 4      | Wyłączone sekcje R1 i R2  |

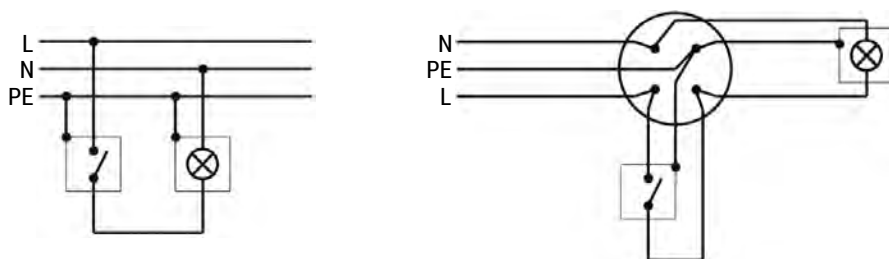


RYS. 3. Przebieg stanów pracy przekąznika bistabilnego sekwencyjnego [3]

Włączenie pierwszego odbiornika następuje po podaniu pierwszego impulsu prądowego za pomocą chwilowego łącznika instalacyjnego. W chwili podania drugiego impulsu odbiornik pierwszy wyłącza się, a załącza się drugi odbiornik. Podanie trzeciego impulsu powoduje załączenie obu odbiorników. Ostatni, czwarty impuls w sekwencji powoduje wyłączenie wszystkich odbiorników.

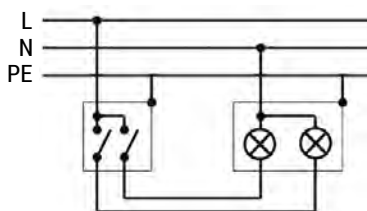
## 1.7. Układy połączeń łączników

1. Łącznik jednobiegunowy – włączanie i wyłączanie obwodu elektrycznego w jednym punkcie (rys. 4).



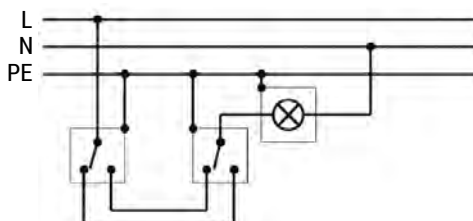
RYS. 4. Układy połączeń (montażowy uproszczony i montażowy) łącznika jednobiegunowego [3]

2. Łącznik szeregowy – włączanie i wyłączanie dwóch obwodów w jednym punkcie (rys. 5).



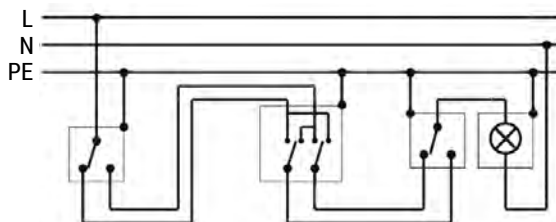
RYS. 5. Układy połączeń (montażowy uproszczony) łącznika szeregowego [3]

3. Łącznik zmienny (schodowy) – włączanie i wyłączanie obwodu z dwóch punktów (rys. 6).



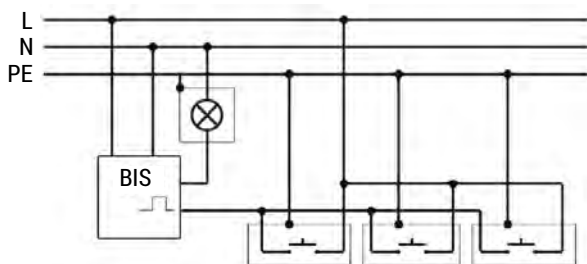
RYS. 6. Montażowy uproszczony układ połączeń łączników zmiennych (schodowych) [3]

4. Łącznik krzyżowy – włączanie i wyłączanie obwodu w trzech lub więcej punktach (rys. 7).



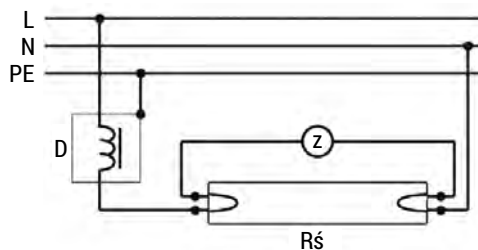
RYS. 7. Montażowy uproszczony układ połączeń łączników schodowych z jednym łącznikiem krzyżowym

5. Łącznik chwilowy – włączanie i wyłączanie obwodu z dowolnej liczby punktów przy pomocy przekaźnika bistabilnego (rys. 8).



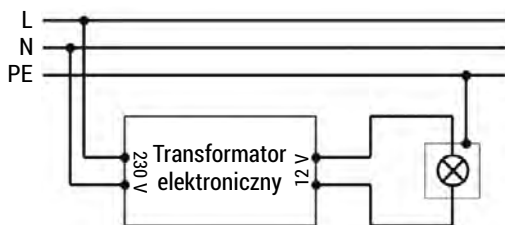
RYS. 8. Montażowy uproszczony układ połączeń łącznika chwilowego

6. Świetlówka – w skład układu łączeniowego świetlówki wchodzi: rura świetlówki ( $R_s$ ), zapłonnik (Z) oraz statecznik magnetyczny (D) (rys. 9).



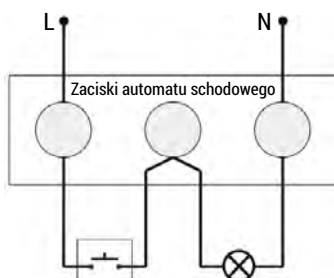
RYS. 9. Schemat połączeń świetlówki [3]

7. Żarówka halogenowa – schemat przyłączenia żarówki halogenowej przedstawiono na rys. 10.



RYS. 10. Schemat połączeń żarówki halogenowej [3]

8. Automat schodowy – urządzenie służące do wyłączania zasilania po określonym (nastawionym) czasie (rys. 11).



RYS. 11. Schemat połączenia automatu schodowego [3]

## 2. Cel i zakres ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z różnymi rodzajami instalacji elektrycznych, ich strukturą oraz z podstawowymi zasadami dotyczącymi wykonania instalacji oświetleniowych.

Zakres ćwiczenia obejmuje montaż wybranych układów sterowania oświetleniem wraz z obserwacją zasad działania poszczególnych obwodów.

## 3. Program badań

### 3.1. Opis stanowiska

Na rys. 12 i 13 przedstawiono widok płyty czołowej i montażowej stanowiska.





W ćwiczeniu należy opracować (narysować schemat montażowy) oraz połączyć (przy wykorzystaniu puszek łączeniowych) wskazane przez prowadzącego układy:

- układ złożony z gniazd wtyczkowych (w liczbie wskazanej przez prowadzącego) oraz łącznika umożliwiającego załączenie pojedynczego źródła światła;
- układ złożony z gniazd wtyczkowych (w liczbie wskazanej przez prowadzącego) oraz łącznika umożliwiającego załączenie dwóch grup żarówek oddalonych od siebie;
- układ złożony z gniazd wtyczkowych (w liczbie wskazanej przez prowadzącego) oraz łącznika umożliwiającego załączenie dwóch grup żarówek znajdujących się w jednym punkcie (np. w żyrandolu);
- układ umożliwiający załączenie oświetlenia z dwóch miejsc (uwaga: źródło światła powinno znajdować się pomiędzy łącznikami – tak jak ma to miejsce w rzeczywistości, np. w korytarzu);
- układ (przy wykorzystaniu łącznika krzyżowego) umożliwiający załączenie oświetlenia z trzech punktów;
- układ (przy wykorzystaniu przełącznika bistabilnego) umożliwiający załączenie oświetlenia z trzech punktów;
- układ umożliwiający załączenie świetlóвки;
- układ (przy wykorzystaniu automatu schodowego) umożliwiający załączenie pojedynczego źródła światła z jednego miejsca;
- układ (przy wykorzystaniu automatu schodowego) umożliwiający załączenie źródeł światła z różnych miejsc (w liczbie wskazanej przez prowadzącego);
- układ umożliwiający załączenie obwodu z żarówką halogenową.

#### **UWAGA!**

Zaciski łączników instalacyjnych oraz gniazd wtyczkowych zostały wyprowadzone pod zaciski laboratoryjne, które opisano zgodnie z oznaczeniami producenta. Łążeń układów dokonuje się na wyprowadzonych zaciskach laboratoryjnych. Wszystkie układy należy wykonać z użyciem puszek łączeniowych, przy czym zastosowane przewody (odpowiadające przewodom w rzeczywistej instalacji elektrycznej) powinny być jak najkrótsze i nie powinny się dublować.

## **4. Sprawozdanie studenckie**

Sprawozdanie z ćwiczenia laboratoryjnego powinno zawierać:

1. Schematy (montażowy i montażowy uproszczony) połączeń układów wykonywanych w trakcie ćwiczenia.
2. Opis przeznaczenia montowanych układów z zaznaczeniem, gdzie powszechnie są one stosowane.
3. Opis zasady działania zapłonika wchodzącego w skład układu świetlóвки.
4. Opis funkcji poszczególnych elementów wchodzących w skład świetlóвки oraz zasady działania tego układu.

5. Opis zasady działania automatu schodowego.
6. Analizę porównawczą układów wykonanych w ćwiczeniu.

## Literatura

1. Lejdy B., Sulkowski M., *Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych*, WNT, Warszawa 2019.
2. Markiewicz H., *Instalacje elektryczne*, WNT, Warszawa 2018.
3. *Poradnik Inżyniera Elektryka*, praca zbiorowa, WNT, Warszawa 2022 i wydania wcześniejsze.
4. PN-IEC 60364 *Norma wieloarkuszowa „Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych”*.
5. PN-HD 60364 *Norma wieloarkuszowa „Instalacje elektryczne niskiego napięcia”*.
6. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, z późniejszymi zmianami (Dz.U.02.75.690).

# Ćwiczenie nr 3

## INSTALACJE ELEKTRYCZNE – ROZDZIELNICE NISKIEGO NAPIĘCIA

### 1. Wiadomości wstępne

#### 1.1. Rozdzielnice niskiego napięcia

Rozdzielnicą elektryczną nazywa się zespół zgrupowanych urządzeń elektrycznych obejmujący m.in.: aparaty służące do zabezpieczania i rozdziału obwodów elektrycznych, aparaturę pomiarową, szyny zbiorcze, połączenia elektryczne, przewody łączeniowe, elementy izolacyjne czy osłony. Rozdzielnice są urządzeniami bardzo zróżnicowanymi technologicznie, co jest wynikiem głównie różnorodności ich parametrów znamionowych oraz właściwości technicznych wynikających z przyjętego przy ich budowie rozwiązania konstrukcyjnego. Typowe rozdzielnice niskonapięciowe są elementami złożonymi najczęściej z kilku lub kilkunastu łączników niskiego napięcia (głównie wyłączników nadprądowych i różnicowoprądowych) współpracujących z urządzeniami sterowniczymi, sygnalizacyjnymi oraz pomiarowymi [3].

Zadaniem rozdzielnic niskonapięciowych, jako jednego z urządzeń wchodzących w skład instalacji elektrycznej, jest dostarczenie odbiorcom energii elektrycznej o znormalizowanych parametrach, przy jednoczesnym zapewnieniu poprawnej i bezpiecznej pracy przyłączonych do niej odbiorników oraz bezpieczeństwa osób ją obsługujących. Każdą rozdzielnicę można scharakteryzować za pomocą schematu jednokreskowego, ukazującego układ połączeń wewnątrz rozdzielnicy oraz sposób powiązania z systemem elektroenergetycznym (np. rozdzielnice niskiego napięcia usytuowane w stacjach elektroenergetycznych lub rozdzielnice tablicowe w domach jednorodzinnych). Zróżnicowanie tych elementów wynika przede wszystkim z ich przeznaczenia, parametrów znamionowych oraz właściwości technicznych [1].

## 1.2. Podział i przeznaczenie rozdzielnic niskiego napięcia

Różnorodność rozwiązań technicznych dostępnych obecnie na rynku rozdzielnic niskonapięciowych wymusza ich podział na poszczególne kategorie według przyjętych powszechnie kryteriów. O wymiarach konstrukcyjnych oraz rodzaju zastosowanej obudowy decyduje przede wszystkim jej wyposażenie (liczba oraz parametry znamionowe zainstalowanych w niej urządzeń elektrycznych oraz odporność na warunki środowiskowe).

Przy wyborze rozdzielnicy należy zwrócić szczególną uwagę na:

- warunki środowiskowe występujące w miejscu docelowym pracy urządzenia,
- sposób zasilania i wyprowadzenia odejść z rozdzielnicy,
- sposób montażu i rozmieszczenia aparatów,
- sposób wykonywania połączeń pomiędzy aparatami,
- rezerwę miejsca na ewentualną rozbudowę zestawu.

Ze względu na możliwość dostępu do aparatów rozróżnia się rozdzielnice z obsługą:

- jednostronną (dostęp jest tylko od czoła rozdzielnicy),
- dwustronną.

Ze względu na sposób zainstalowania rozdzielnice dzieli się na:

- wolnostojące,
- przyścienne,
- naścienne.

Ze względu na miejsce zainstalowania rozdzielnice niskiego napięcia dzieli się na:

- wewnętrzne,
- napowietrzne.

Pod względem sposobu wykonania konstrukcji zewnętrznych wyróżnia się rozdzielnice:

- otwarte,
- częściowo osłonięte,
- osłonięte.

Ze względu na funkcję rozdzielnicy w instalacji elektrycznej wyróżnia się rozdzielnice [2]:

- główne – rozdzielnice podstawowe, najczęściej zlokalizowane na najniższej kondygnacji budynku lub w jego podpiwniczeniu;
- oddziałowe – stosowane w budownictwie przemysłowym, zasilające poszczególne oddziały danego zakładu;

- piętrowe – pełniące najczęściej funkcje pomiarowe, rozdzielcze, zabezpieczeniowe oraz integracyjne, umieszczone w pionach kablowych na poszczególnych piętrach budynku mieszkalnego i stanowiące granicę stron pomiędzy obwodem instalacji zasilającej budynek (wewnętrzną linią zasilającą) a obwodem odbiorczym;
- mieszkaniowe – montowane w mieszkaniach;
- specjalizowane – stosowane np. do zasilania: oświetlenia, komputerów, zasilaczy UPS itp.

W zależności od przeznaczenia i zastosowania można wyróżnić m.in. rozdzielnice [3]:

- mieszkaniowe,
- budowlane,
- przemysłowe,
- słupowe,
- energetyczno-dystrybucyjne.

W zależności od sposobu wykonania części mocujących i wsporczych oraz osłon części czynnych, będących w normalnych warunkach pracy pod napięciem, rozdzielnice niskiego napięcia dzieli się na:

- tablicowe,
- modułowe,
- skrzynkowe,
- szafowe.

## 1.3. Przegląd rozwiązań konstrukcyjnych układów rozdzielczych niskiego napięcia

### 1.3.1. Szyny nośne

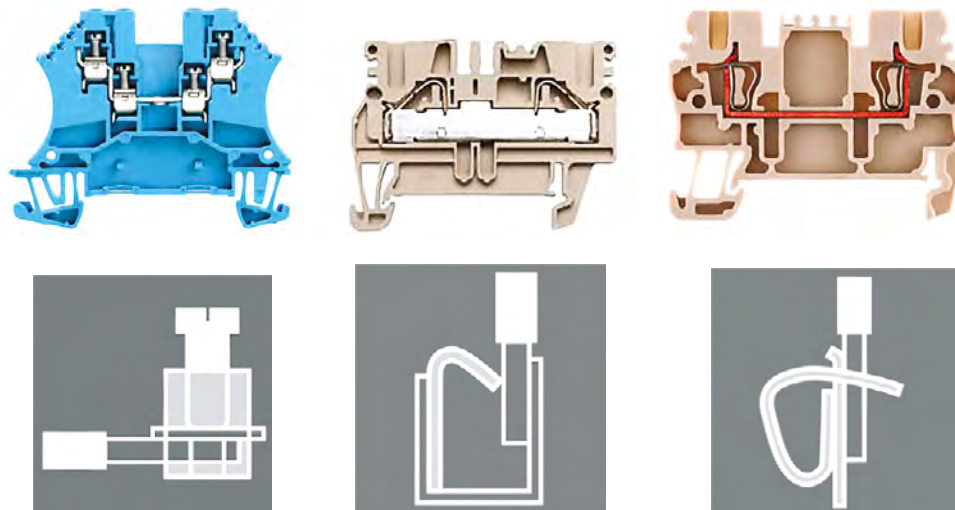
Większość aparatów w rozdzielnicach montowana jest na szynach nośnych. Są one, w zależności od różnych zakresów zastosowania, produkowane ze stali nierdzewnej, stali zwykłej, aluminium, miedzi lub tworzywa sztucznego i dostępne w różnych kształtach. W Polsce najczęściej spotykanym standardem szyn są TH 35 i TS 32 (rys. 1).



RYŚ. 1. Przykładowy wygląd szyn nośnych TH 35, TS 32 [5]

### 1.3.2. Złącza zaciskowe

Złącza pozwalają na uporządkowanie i czytelne przyłączenie obwodów odbiorczych do rozdzielnic. Produkowane są w technologii śrubowej, zaciskowej i sprężynowej, na średnice przewodów o przekroju znamionowym od  $1,5 \text{ mm}^2$  do nawet  $240 \text{ mm}^2$ . Przykładowy wygląd złącz zaciskowych wraz z zasadą ich działania przedstawiono na rys. 2.



RYŚ. 2. Przykładowy wygląd złącz zaciskowych wraz z zasadą działania [5]

### 1.3.3. Szyny zbiorcze

W rozdzielnicach i sterownikach bardzo często przewody neutralne i ochronne wyprowadza się z szyn zbiorczych, w których można połączyć ze sobą znaczną ich liczbę przy niewielkim zapotrzebowaniu na miejsce (do 70 przewodów na 1 m szyny). Szyny mogą mieć gotowe połączenia śrubowe lub być bez otworów – wówczas do mocowania służy uchwyt do szyn SH (rys. 3).



RYS. 3. Przykładowy widok szyn zbiorczych [5]

### 1.3.4. Oznaczniki

Polskie Normy [4] nakładają na wykonawcę obowiązek czytelnego oznaczenia urządzeń zastosowanych w rozdzielnicach oraz obwodach przychodzących i odchodzących. Producenci oferują oznaczniki w technice zatrzaskowej lub klejonej. Przewody oznacza się za pomocą koszulek termokurczliwych lub zawieszanych/nakładanych opisów (rys. 4). Użytkownicy mogą sami opisywać oznaczniki urządzeń, używając odpowiedniego programu komputerowego oraz kompatybilnych z systemem drukarek lub ploterów.



RYS. 4. Przykładowy widok oznaczników kablowych [5]

### 1.3.5. Opaski kablowe

Opaski kablowe umożliwiają uporządkowanie wielu części instalacji. Opaski kablowe cechują się znaczną trwałością oraz dużą siłą zaciskania. Stalowe opaski kablowe umożliwiają ponadto trwałe mocowanie w ekstremalnych warunkach, takich jak wysokie temperatury czy silne narażenie na działanie chemikaliów. Przykładowy widok opasek kablowych przedstawiono na rys. 5.



RYS. 5. Przykładowy widok opasek kablowych [5]

### 1.3.6. Końcówki tulejkowe

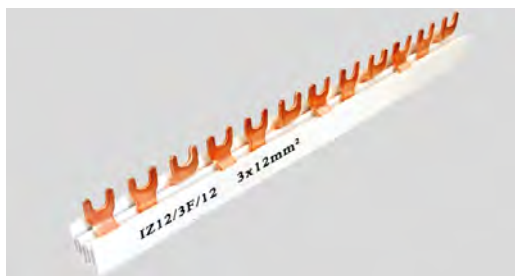
Stosowanie tulejek kablowych (rys. 6) umożliwia użytkownikom konstruowanie trwałych połączeń elektrycznych wykonanych przewodami wielodrutowymi (tzw. linkami). Do zaciskania tulejek należy stosować specjalne praski z głowicami dostosowanymi do średnicy tulei oraz żyły przewodu.



RYS. 6. Przykładowy wygląd tulejek kablowych [5]

### 1.3.7. Szyny łączeniowe grzebieniowe

Szyny łączeniowe grzebieniowe (rys. 7) wykorzystywane są do wykonywania połączeń pomiędzy sąsiednimi zabezpieczeniami (głównie nadprądowymi i różnicowoprądowymi). Występują w wersjach jednofazowej lub trójfazowej. Poprawiają czytelność i estetykę rozdzielnic oraz przyspieszają jej montaż.



RYS. 7. Przykładowy widok trójfazowej szyny łączeniowej grzebieniowej [5]

## 2. Cel i zakres ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z budową, zasadami doboru i łączenia aparatów w rozdzielnicach niskiego napięcia. Zakres ćwiczenia obejmuje montaż rozdzielnic oraz doświadczalne sprawdzenie poprawności wykonania układów rozdzielczych.

## 3. Program badań

### 3.1. Opis stanowiska laboratoryjnego

Stanowisko laboratoryjne składa się z powierzchni roboczej, na której została zainstalowana metalowa tablicowa rozdzielnica firmy ETI POLAM serii MU 4/24UNI o wymiarach 710 × 500 mm, oraz otwieranej szuflady służącej do przechowywania aparatury modułowej wchodzącej w skład stanowiska. Rozdzielnica została wyposażona w szyny TH35, które pozwalają na instalację czterech rzędów aparatów, po 24 pola w każdym. Rozdzielnicę zaopatrzono w urządzenia wymienione w tab. 1. Widok stanowiska laboratoryjnego przedstawia rys. 8.

TAB. 1. Wyposażenie stanowiska laboratoryjnego

| Lp. | Urządzenie                 | Nazwa producenta | Liczba pól | Prąd znamionowy | Prąd różnicowy | Charakterystyka | Liczba |
|-----|----------------------------|------------------|------------|-----------------|----------------|-----------------|--------|
|     |                            |                  | [szt.]     | [A]             | [A]            | [-]             | [szt.] |
| 1.  | wyłącznik nadprądowy       | ETIMAT10         | 1          | 16              | –              | B               | 5      |
| 2.  | wyłącznik nadprądowy       | ETIMAT10         | 1          | 10              | –              | B               | 5      |
| 3.  | wyłącznik nadprądowy       | ETIMAT10         | 1          | 6               | –              | B               | 5      |
| 4.  | wyłącznik nadprądowy       | ETIMAT10         | 3          | 25              | –              | C               | 1      |
| 5.  | rozłącznik                 | SV 340           | 3          | 40              | –              | –               | 1      |
| 6.  | wyłącznik topikowy         | VLC 10x38        | 1          | 32              | –              | –               | 1      |
| 7.  | wyłącznik różnicowoprądowy | EFI6-2           | 2          | 25              | 0,03           | –               | 3      |
| 8.  | wyłącznik różnicowoprądowy | EFI6-4           | 4          | 40              | 0,03           | –               | 1      |

| Lp. | Urządzenie                         | Nazwa producenta | Liczba pól | Prąd znamionowy | Prąd różnicowy | Charakterystyka | Liczba |
|-----|------------------------------------|------------------|------------|-----------------|----------------|-----------------|--------|
|     |                                    |                  | [szt.]     | [A]             | [A]            | [–]             | [szt.] |
| 9.  | wyłącznik nadprądowy z członem RCD | KZS-2M           | 2          | 16              | 0,03           | C               | 1      |
| 10. | wyłącznik bistabilny               | WB-1U            | 1          | 16              | –              | –               | 1      |
| 11. | ogranicznik przepięć               | ETITEC B         | 1          | 3600            | –              | B               | 1      |
| 12. | RAZEM                              |                  |            |                 |                |                 | 25     |



RYS. 8. Widok stanowiska laboratoryjnego

## 3.2. Przebieg ćwiczenia

1. Po upewnieniu się, że stanowisko jest odłączone od napięcia, sprawdzić kompletność wyposażenia według zestawienia (tab. 1), odczytując wartości znamionowe urządzeń znajdujących się w szufladzie stanowiska oraz określając ich typ i przeznaczenie.
2. Zmontować rozdzielnicę wraz z układem połączeń wewnętrznych według schematu zaproponowanego przez prowadzącego.
3. Po sprawdzeniu przez prowadzącego poprawności montażu zadanego układu rozdzielczego wykonać sprawdzenie odbiorcze rozdzielnicy.
4. Dokonać oględzin rozdzielnic wskazanych przez prowadzącego. Wykonać pomiary rezystancji izolacji oraz ciągłości przewodów wskazanych obwodów elektrycznych.

## 4. Sprawozdanie studenckie

Sprawozdanie z ćwiczenia powinno zawierać:

1. Schematy jednokreskowe układów wykonywanych w trakcie ćwiczenia.
2. Sprawdzenie poprawności doboru parametrów aparatów w poszczególnych obwodach.
3. Opis przeznaczenia montowanych układów z zaznaczeniem, gdzie one mogą być lub są stosowane.
4. Interpretację wyników otrzymanych podczas sprawdzenia wskazanych układów.
5. Wnioski.

## Literatura

1. Lejdy B., Sulkowski M., *Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych*, WNT, Warszawa 2019.
2. *Poradnik inżyniera elektryka*, praca zbiorowa, WNT, Warszawa 2022 i wydania wcześniejsze.
3. Wiatr J. Orzechowski M., *Poradnik projektanta elektryka*, Grupa Medium, Warszawa 2021.
4. PN-EN IEC 61439-1:2021-10: *Rozdzielnice i sterownice niskonapięciowe – Część 1: Postanowienia ogólne*.
5. Katalogi produktów producentów.

# Ćwiczenie nr 4

## BADANIE STANÓW PRACY

## ELEKTROWNI WIATROWEJ

### 1. Wiadomości wstępne

Początki wykorzystania siły wiatru do produkcji energii elektrycznej datowane są na koniec XIX wieku. Od tamtego czasu technologia elektrowni wiatrowych wielokrotnie się zmieniała, zwiększając efektywność użytych podzespołów, a tym samym całych elektrowni. W związku z tym rozwój energetyki wiatrowej skupił się przede wszystkim na uzyskiwaniu coraz mocniejszych generatorów i większej średnicy skrzydeł [1].

Rynek energetyki wiatrowej zdominowały aktualnie dwa typy turbin wiatrowych:

- turbiny o osi poziomej (HAWT – *Horizontal Axis Wind Turbines*),
- turbiny o osi pionowej (VAWT – *Vertical Axis Wind Turbines*).

#### 1.1. Zasada działania elektrowni wiatrowej

Kształt łopat elektrowni wiatrowej powoduje, że powietrze opływające górną powierzchnię łopaty porusza się szybciej niż powietrze przepływające wzdłuż powierzchni dolnej. W konsekwencji tego zjawiska ciśnienie na górnej powierzchni jest niższe niż na powierzchni dolnej – powstaje różnica ciśnień. Tworzy się wówczas siła nośna, która powoduje, że wirnik elektrowni wiatrowej się obraca.

Wartość siły nośnej  $F_n$  zależy od powierzchni skrzydła, gęstości powietrza i jego prędkości oraz od kształtu skrzydła i wyrażana jest zależnością:

$$F_n = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot C_s \cdot v^2 \quad (1)$$

gdzie:

$A$  – pole powierzchni skrzydła wirnika [ $m^2$ ];

$\rho$  – gęstość powietrza [ $kg/m^3$ ];

$\vartheta$  – prędkość wiatru [m/s];

$C_s$  – współczynnik kształtu skrzydła opisany zależnością:

$$C_s = m(\alpha - \alpha_0) \quad (2)$$

w której:

$m$  – współczynnik zależny od kształtu profilu skrzydła (wynosi najczęściej ok. 3,0);

$\alpha$  – kąt natarcia [°];

$\alpha_0$  – kąt natarcia [°], dla którego siła nośna jest równa 0.

Kąt natarcia, dla którego wartość siły nośnej spada do 0, występuje przy tzw. przeciągnięciu. Podczas przeciągnięcia występuje oderwanie się strug powietrza od skrzydła, co prowadzi w konsekwencji do zaniku siły nośnej.

## 1.2. Turbiny wiatrowe o poziomej osi obrotu

Turbina wiatrowa o poziomej osi obrotu składa się z jednego lub kilku płatów nośnych rozmieszczonych promieniowo wokół środkowego punktu. Płaty te przesuwają się pod wpływem działania wiatru prostopadle do jego kierunku.

Wyróżnia się przy tym turbiny poziome: jednopłatowe, dwupłatowe, trzypłatowe, wielopłatowe oraz elektrownie z dyfuzorem (rys. 1).

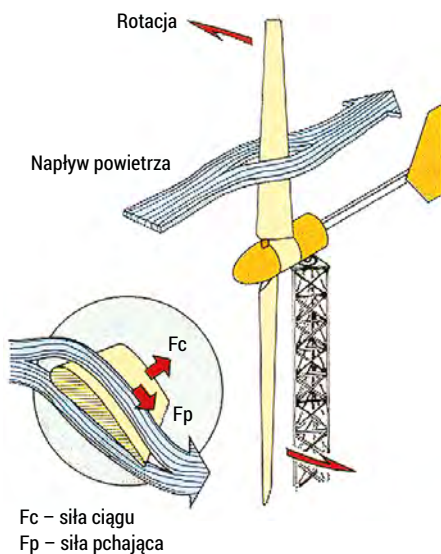
Zasadę działania turbiny wiatrowej o poziomej osi obrotu przedstawiono na rys. 2. Specjalny kształt łopat powoduje, że wiatr przepływający nad górną częścią łopaty (ze względu na jej kształt) ma dłuższą drogę do przebycia niż strumień opływający jej dolną część. W wyniku tego wytwarza się różnica ciśnień między górną a dolną powierzchnią łopaty. Różnica ta powoduje powstanie siły ciągu skierowanej ku niższemu ciśnieniu [3].

Ze wszystkich konstrukcji turbin o poziomej osi obrotu najczęściej stosuje się elektrownie trójpłatowe, w których łopaty rozłożone są równomiernie co 120°, co zapewnia stały moment bezwładności wirnika. Turbiny te, ze względu na stosunkowo niską prędkość obrotową, przy dość dobrym współczynniku wykorzystania energii wiatru nie emitują zbyt dużego hałasu. Budowę trójłopatowej elektrowni wiatrowej przedstawiono na rys. 3.

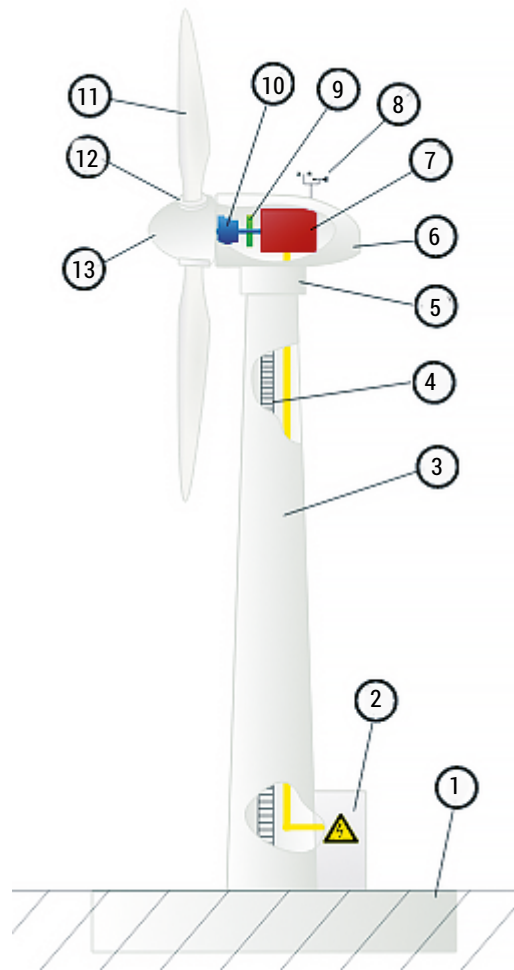
Konstrukcja dwupłatowa elektrowni wiatrowych powoduje zmniejszenie kosztów produkcji turbiny, jednak aby uzyskać moc wyjściową porównywalną z rozwiązaniem trójłopatowym wymaga uzyskiwania większej prędkości obrotowej. Ponadto piasta turbiny dwupłatowej musi pozwalać na odchylanie się w celu przeniesienia przeciążenia związanego z przechodzeniem łopaty przed wieżą (tzw. cień wieży). Turbiny wiatrowe jednopłatowe wymagają jeszcze wyższych prędkości obrotowych, przez co powodują większy (w porównaniu do turbin dwupłatowych) hałas podczas pracy. Wykorzystanie tylko jednej łopaty wymaga zastosowania dla niej przeciwwagi. Jedyną zaletą turbiny jednopłatowej są niższe koszty inwestycyjne [3].



RYS. 1. Przykłady turbin wiatrowych o poziomej osi obrotu: jednoplątowej, dwupłatowej, trzypłatowej, wielopłatowej oraz turbiny z dyfuzorem [3]



RYS. 2. Zasada działania turbiny wiatrowej o poziomej osi obrotu [3]



RYS. 3. Podstawowe elementy składowe turbiny wiatrowej [2]: 1 – fundament; 2 – wejście do turbiny; 3 – wieża; 4 – drabinka wejściowa; 5 – serwomechanizm kierunkowania elektrowni; 6 – gondola; 7 – generator; 8 – wiatromierz; 9 – hamulec postojowy; 10 – skrzynia przekładniowa; 11 – łopata wirnika; 12 – siłownik mechanizmu przestawiania łopat; 13 – piasta

Turbiny wielołopatowe charakteryzują się większą liczbą łopat (powyżej 3), dzięki czemu możliwy jest ich rozruch przy bardzo słabym wietrze (ok. 2 m/s). Znalazły one głównie zastosowanie jako małe elektrownie do pracy w trudnych warunkach (np. w USA).

W turbinach z dyfuzorem wykorzystuje się zjawisko związane ze zmianą prędkości przepływu powietrza w rurze w miejscu, gdzie następuje zmiana jej średnicy (prawo Bernoulliego). W przewężeniu rury (tunelu) wiatr przepływa szybciej niż poza nim,

przez co umieszczony tam wirnik wytwarza więcej energii niż wirnik bez dyfuzora przy tych samych warunkach atmosferycznych. Elektrownie tego typu nie znalazły jednak szerokiego zastosowania, głównie z uwagi na znaczne koszty ich wykonania.

Największymi zaletami turbin wiatrowych o poziomej osi obrotu są ich duża sprawność wykorzystania energii wiatru oraz estetyczny i harmonijny wygląd umożliwiający wkomponowanie ich w lokalny krajobraz. Do wad tych turbin należy zaliczyć przede wszystkim możliwość osiągnięcia bardzo dużych prędkości obrotowych, które mogą spowodować uszkodzenie danego urządzenia. Wymagają one również instalacji urządzeń służących do ustawiania „na wiatr”, co dodatkowo komplikuje budowę takiej elektrowni i zwiększa możliwość wystąpienia awarii [2].

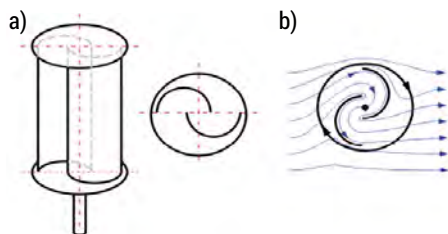
### 1.3. Turbiny wiatrowe o pionowej osi obrotu

Rozróżnia się dwa podstawowe typy turbin wiatrowych o pionowej osi obrotu: Savoniusa – działające w oparciu o siłę oporu, oraz Darrieusa – wykorzystujące siłę nośną. Pozostałe typy turbin o pionowej osi obrotu są najczęściej kombinacją tych dwóch podstawowych typów [3].

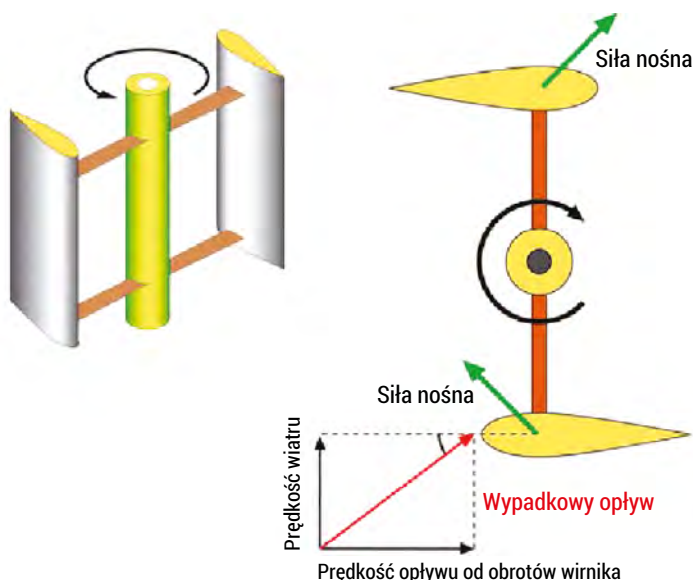
Kształt turbiny Savoniusa w przekroju poprzecznym przypomina literę „S” (rys. 4). Turbina ta składa się najczęściej z dwóch lub trzech ramion, a obrót wirnika wywołuje różnica sił oddziaływania energii wiatru na dwie strony łopat – wklęsłą i wypukłą. Ma ona mniejszą wydajność w porównaniu do innych rodzajów turbin o tych samych wymiarach. Cechują ją jednak prosta konstrukcja, wysoki moment rozruchowy umożliwiający pracę przy bardzo słabych wiatrach, duża wytrzymałość na silne wiatry i praktycznie bezgłośna praca samego wirnika. Jednak ze względu na niską sprawność musi ona osiągać bardzo duże rozmiary, aby można było uzyskać znaczne wartości mocy [2].

Turbiny Darrieusa mają zazwyczaj dwie lub trzy łopaty połączone na dole i na górze. Istnieje również odmiana o łopatach niepołączonych ze sobą i równoległych do osi obrotu, tzw. turbina typu H. Siłownie wykorzystujące turbinę Darrieusa mają prawie zerowy moment rozruchowy, przez co potrzebują do rozruchu napędu zewnętrznego (najczęściej jest to silnik elektryczny). Spotyka się również rozwiązania, w których wirnik Darrieusa łączy się z turbiną Savoniusa, pełniącą funkcję pomocniczą przy rozruchu całej konstrukcji.

Do największych zalet turbin o pionowej osi obrotu należy zaliczyć jednakową, niezależną od kierunku wiatru pracę, co w znacznym stopniu upraszcza ich budowę oraz sterowanie. Ponadto charakteryzują się one cichszą pracą, nawet przy maksymalnej prędkości obrotowej. Turbiny o pionowej osi obrotu wyróżnia również odporność na silny wiatr – nawet o prędkościach dochodzących do 40 m/s – co niweluje problem związany z koniecznością zatrzymywania urządzenia.



RYS. 4. Turbina wiatrowa Savoniusa [2]: a) schemat przedstawiający budowę; b) zasada działania



RYS. 5. Zasada działania turbiny wiatrowej Darrieusa (prędkość wiatru i prędkość przesuwania się łopaty względem powietrza dają wypadkową prędkość opływu łopaty, która przy jej odpowiednim profilu powoduje powstanie siły nośnej) [2]

Do największych wad tych turbin wiatrowych należy zaliczyć niską sprawność. Dodatkowo w turbinach Darrieusa konieczne jest wstępne rozpędzenie turbiny.

## 1.4. Metody regulacji mocy elektrowni wiatrowych

Każda elektrownia wiatrowa ma za zadanie wytwarzać jak największą moc możliwą do uzyskania w danych warunkach wietrznych. Ponadto muszą one bezpiecznie pracować przy wiatrach, których prędkość przekracza wartość znamionową danej elektrowni – konieczna jest wówczas jej ochrona przed uszkodzeniem poprzez wytrącenie nadmiaru energii wiatru. W związku z tym każda turbina wiatrowa musi posiadać jakiś rodzaj kontroli mocy.

Do podstawowych sposobów regulacji wartości mocy wytwarzanej w elektrowni należą:

1. Regulacja przez zmianę ustawienia kąta łopat (ang. *pitch control*) – elektroniczny kontroler turbiny kilka razy na sekundę sprawdza wartość mocy generowanej przez elektrownię i kiedy przekracza ona wartość znamionową, wysyła sygnał do mechanizmu ustawienia kąta łopat, który koryguje ich kąt natarcia tak, aby zmniejszyć moment napędowy wirnika. Gdy prędkość wiatru się zmniejszy, kontroler realizuje działania odwrotne. W tym systemie regulacji zmiana kąta ustawienia łopat występuje za każdym razem, gdy zmieni się prędkość wiatru, tak aby utrzymać stałą moc wyjściową.
2. Regulacja lotkami łopat wirnika (ang. *aileron control*) – polega na zmianie charakterystyki aerodynamicznej łopat poprzez korekcję ustawienia tzw. lotek (końcówek łopat).
3. Regulacja przez przeciągnięcie (ang. *stall control*) – łopaty są na stałe przymocowane do piasty. Dzięki właściwej geometrii profilu skrzydła, gdy wiatr staje się zbyt silny, na części łopaty powstają turbulencje ograniczające moment napędowy wirnika. Charakterystyczne skrócenie łopaty powoduje, że wirnik ulega przeciągnięciu stopniowo i nie reaguje gwałtownie na silne podmuchy wiatru. Podstawową zaletą tej regulacji jest brak skomplikowanego mechanizmu regulacji kąta ustawienia łopat, a wadą – wykonanie niezwykle złożonego aerodynamicznie płata oraz elektrowni, która musi znosić drgania związane z turbulencją.
4. Regulacja przez zmianę kierunku (ang. *yaw control*) – polega na obrocie gondoli względem osi obrotu wirnika elektrowni do kierunku wiatru w sposób pasywny lub aktywny. Kierunkowanie pasywne realizowane jest poprzez umieszczenie chorągiewki kierunkowej na gondoli, co zawsze powoduje ustawienie wirnika na wprost do kierunku wiatru (stosowane najczęściej w elektrowniach o mocach rzędu kilku kW). Aktywna regulacja kierunku ustawienia gondoli polega na synchronizacji wskazów wiatromierza umieszczonego na szczycie gondoli z jej rzeczywistym ustawieniem. Ustawienie elektrowni niezgodne z kierunkiem wiatru powoduje zmniejszenie użytecznej powierzchni zarysu koła wiatrowego oraz ograniczenie oddawanej mocy.
5. Regulacja przez zmianę obciążenia (ang. *load control*) – polega na zmianie rezytacji stanowiącej obciążenie generatora, czyli na przeniesieniu punktu pracy elektrowni z jednej charakterystyki mechanicznej na inną, bardziej korzystną dla aktualnie panujących warunków wietrznych.

## 2. Opis programu „ELW11”

Wprowadzanie poszczególnych parametrów wejściowych w programie odbywa się przy pomocy odpowiednich okien dialogowych. Pracę z programem najlepiej rozpocząć, wykorzystując parametry zapisane jako domyślne. W przypadku

wprowadzenia własnych parametrów układu należy je na koniec zatwierdzić, klikając ikonę „Potwierdź”. Klikając ikonę „Anuluj”, uzyskuje się przywrócenie wartości ostatnio zapisanych parametrów. Program umożliwia także ręczne ustalanie każdej z wielkości składowych wiatru, kąta ustawienia łopat, kąta ustawienia siłowni i rezystancji obciążenia. Możliwość ręcznego wprowadzania danego parametru sygnalizowana jest poprzez pojawienie się uchwyty na określonym suwaku. Dodatkowo istnieje możliwość precyzyjnego określenia wartości danej wielkości poprzez wpisanie jej w pole edycyjne współpracujące z danym suwakiem. W przypadku wybrania opcji „Auto” suwaki i pola edycyjne będą pełniły jedynie funkcję wskaźników i wyświetlaczy [4].

Program pozwala na rejestrowanie wykresów przy wykorzystaniu okna dialogowego „Wykresy”. Istnieje również możliwość powiększenia ich na cały ekran poprzez ich dwukrotne kliknięcie (następne kliknięcie powoduje powrót do stanu poprzedniego). Dla każdego z wykresów można określić zakresy wartości na osi X, a dla charakterystyk mechanicznych możliwe jest także ustalenie zakresu wyświetlanych wartości dla osi Y.

### 3. Cel i zakres ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z zasadą działania oraz możliwościami regulacyjnymi elektrowni wiatrowych.

Ćwiczenie obejmuje swoim zakresem wyznaczanie optymalnych parametrów mechanicznych dla zadanych warunków wietrznych oraz rejestrację wybranych charakterystyk opisujących procesy zachodzące w elektrowniach wiatrowych.

### 4. Program badań

Podczas ćwiczenia należy:

1. Zapoznać się z dostępnymi funkcjami programu.
2. Zaprojektować optymalną elektrownię wiatrową (regulując liczbą łopat oraz ich rozmiarem) dla zadanych przez prowadzącego warunków wietrznych.
3. Wyznaczyć charakterystyki mocy czynnej oddawanej do sieci w funkcji kąta natarcia  $\alpha$  przy stałym azymucie wiatru ( $\varphi = \text{const.}$ ).
4. Wyznaczyć charakterystyki mocy czynnej oddawanej do sieci w funkcji kąta azymutu wiatru  $\varphi$  dla kilku wartości siły wiatru przy stałym kącie natarcia ( $\alpha = \text{const.}$ ).

## 5. Sprawozdanie studenckie

Sprawozdanie z ćwiczenia powinno zawierać:

1. Opis przeprowadzonych symulacji.
2. Opis optymalnych parametrów elektrowni dla danej prędkości wiatru wraz z ich uzasadnieniem.
3. Zestawienie wyznaczonych charakterystyk wraz z komentarzem do nich.
4. Wnioski.

## Literatura

1. Maroński R., *Siłownie wiatrowe*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2022.
2. Malecha Z.M., *Aerodynamika turbin wiatrowych. Wybrane aspekty*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2023.
3. Lubośny Z., *Farmy wiatrowe w systemie elektroenergetycznym*, WNT, Warszawa 2016.
4. Ingielewicz G. Pikuła G., *ELW 11 – program komputerowy*, praca magisterska wykonana pod kierownictwem dr. B. Broela-Platera, Politechnika Szczecińska 2001.

# Ćwiczenie nr 5

## STEROWANIE SILNIKAMI INDUKCYJNYMI ZA POMOCĄ STYCZNIKÓW

### 1. Wiadomości wstępne

#### 1.1. Budowa i zasada działania łączników stycznikowych

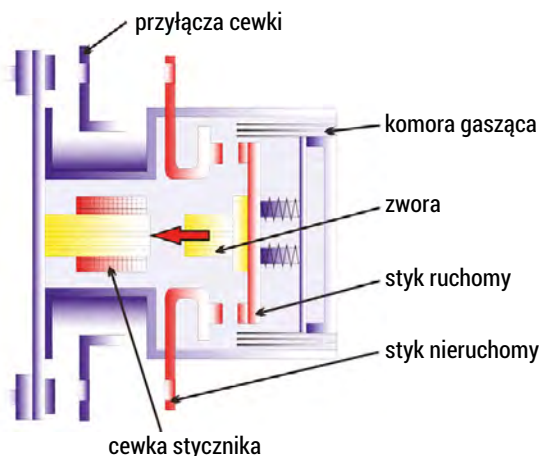
Do podstawowych parametrów technicznych, według których dobiera się styczniki elektryczne należą [2]:

- znamionowy prąd obciążenia – wartość maksymalna prądu, który może długo-trwale przepływać przez tory prądowe stycznika;
- charakter obciążenia – typ łącznika stycznikowego zależny od charakteru załączanych prądów, przy czym najczęściej spotykanymi typami są AC-1 (obciążenie o małej indukcyjności), AC-2 (silniki pierścieniowe) i AC-3/4 (silniki klatkowe);
- napięcie znamionowe stycznika – wartość napięcia, na które zostały zbudowane do pracy długotrwałej styki główne stycznika;
- napięcie układu sterowania – znamionowa wartość napięcia cewki stycznika (DC lub AC), przy czym najczęściej cewki budowane są na napięcia: 24 V, 230 V i 400 V;
- dopuszczalna częstość łączeń – liczba cykli łączeniowych przewidzianych na jedną godzinę pracy stycznika.

Łącznik stycznikowy składa się z kilku podstawowych elementów (rys. 1 [1]):

- elektromagnesu z ruchomą zworą,
- zestyków obwodu głównego złożonych ze styku ruchomego i nieruchomego,
- zestyków obwodu sterowania – zwiernych i rozwiernych,
- komory gaszeniowej,
- podstawy izolacyjnej,
- zacisków przyłączeniowych.

Łączniki stycznikowe służą do załączania i wyłączania prądów jałowych i roboczych. W momencie podania na cewkę stycznika napięcia na czas zasilania cewki ulega zmianie pozycja styków ruchomych obwodu głównego (zamknięcie styków głównych stycznika). W przypadku wystąpienia przerwy w zasilaniu elektromagnesu następuje – przy wykorzystaniu sprężyn zwrotnych – powrót styków ruchomych w położenie początkowe. Ze względu na brak możliwości wyłączania prądów zwarciovych (głównie ze względu na budowę komory gaszeniowej) stycznik powinien być chroniony przez odpowiednio dobrane zabezpieczenia nadprądowe [3].



RYS. 1. Budowa stycznika elektromagnetycznego [3]

Styczniki wykorzystują dwa podstawowe typy styków pomocniczych: styki zwierne (NO) oraz styki rozwiernie (NC), których działanie opiera się na zmianie stanu położenia w odpowiedzi na działanie elektromagnesu. W stanie spoczynku, gdy cewka stycznika nie jest zasilana, styki zwierne pozostają rozwarte, natomiast styki rozwiernie są zwarte. Po doprowadzeniu napięcia do cewki powstaje pole elektromagnetyczne przyciągające zworę, co powoduje jednoczesne zamknięcie styków zwiernych i otwarcie styków rozwiernych. Mechanizm ten zapewnia powtarzalną zmianę stanu, niezależną od siły nacisku operatora czy warunków środowiskowych, co stanowi kluczową przewagę styczników nad łącznikami mechanicznymi. Styki zwierne pełnią funkcję sygnałową lub wykonawczą, umożliwiając przewodzenie prądu dopiero po zadziałaniu stycznika. W praktyce stosuje się je do realizacji funkcji załączających, takich jak podtrzymanie (zboznikowanie) przycisku załączającego, podawanie sygnału potwierdzającego pracę urządzenia, sterowanie kolejnymi stopniami automatyki lub inicjowanie sekwencji technologicznych. Styki rozwiernie realizują funkcję przeciwną, czyli przerywają obwód po zasileniu cewki. W obwodach sterowania wykorzystuje się je do blokad, sygnalizacji stanów awaryjnych, a także do zapewnienia bezpieczeństwa pracy układów, np. poprzez uniemożliwienie jednoczesnego załączenia dwóch przeciwnych napędów.

Komory gaszeniowe w styczniku służą do przerywania łuku, który powstaje podczas rozłączania się obciążonych prądem styków głównych. Budowa komór gaszeniowych zależy przede wszystkim od natężenia prądu przepływającego przez styki główne. W stycznikach o niewielkich wartościach prądów obciążenia komora gaszeniowa spełnia funkcję osłony izolacyjnej, chroniąc układ przed powstawaniem zwarć doziemnych i międzyfazowych. Przy dużych wartościach prądów łączeniowych komory gaszeniowe wyposaża się w poprzeczne przegrody (stalowe lub miedziane).

Główną zaletą łączników stycznikowych jest możliwość zdalnego sterowania nimi z wielu niezależnych miejsc, które mogą znajdować się zarówno przy maszynie, jak i w pewnej odległości od niej. Ponadto styczniki chronią przed ponownym, samoczynnym załączeniem obwodu (np. po powrocie napięcia zasilającego), co może być niebezpieczne zarówno ze względów ludzkich (dla osób obsługujących maszynę sterowaną stycznikiem), jak i technologicznych.

Rozróżnia się dwa podstawowe sposoby sterowania stycznikami: dyspozycyjne (ręczne) i samoczynne (automatyczne). Sterowanie ręczne to bezpośrednie lub pośrednie (zdalne) oddziaływanie człowieka na pracę stycznika. Sterowanie samoczynne polega na uzależnieniu działania stycznika od zmian wartości określonych wielkości fizycznych (np. czasu, temperatury, napięcia).

Układy sterowania silnikami elektrycznymi przy pomocy styczników można przedstawiać w postaci różnych schematów, wśród których najpowszechniejsze są schematy ideowe występujące w postaci skupionej lub rozwiniętej. Schematy elektryczne w postaci skupionej stosuje się najczęściej do przedstawiania prostych obwodów sterujących. Schematy w postaci rozwiniętej wykorzystuje się do wizualizacji układów bardziej złożonych. Pomaga to przede wszystkim w prawidłowym odczycie połączeń stosowanych w układzie oraz w zrozumieniu jego działania. W obu typach schematów wszystkie połączenia rysowane są pojedynczymi liniami, a poszczególne elementy składowe układów stycznikowych zastępuje się symbolami elektrycznymi. Przykładowe symbole graficzne wykorzystywane w układach sterowniczych zostały zestawione w tab. 1.

TAB. 1. Przykładowe symbole graficzne stosowane w schematach elektrycznych [3, 4]

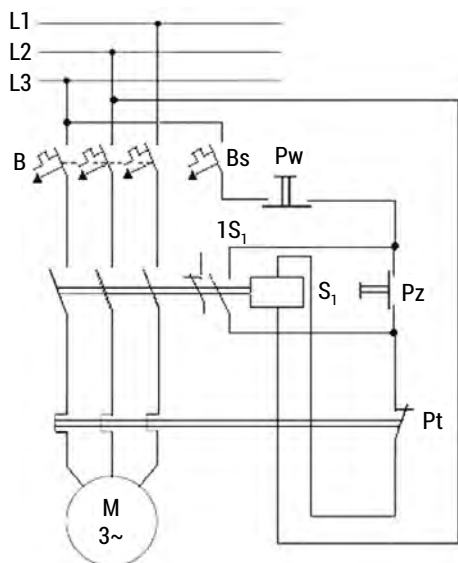
| Lp. | Nazwa                                                           | Symbol |
|-----|-----------------------------------------------------------------|--------|
| 1.  | Zestyk łącznika:                                                |        |
|     | a) zwierny (normalnie otwarty)                                  |        |
|     | b) rozwierny (normalnie zamknięty)                              |        |
|     | c) przełączany (zwierno-rozwierny)                              |        |
|     | d) zwierny o napędzie ręcznym (przycisk załączający)            |        |
|     | e) rozwierny o napędzie ręcznym (przycisk wyłączający)          |        |
|     | f) przycisk zwierny o napędzie ręcznym z samoczynnym powrotem   |        |
|     | g) przycisk rozwierny o napędzie ręcznym z samoczynnym powrotem |        |

| Lp. | Nazwa                                                 | Symbol |
|-----|-------------------------------------------------------|--------|
| 2.  | Zestyk rozwierny przekaźnika ciepłego                 |        |
| 3.  | Łącznik trójbiegunowy                                 |        |
| 4.  | Cewka stycznika:                                      |        |
|     | a) symbol ogólny                                      |        |
|     | b) cewka prądu przemiennego                           |        |
|     | c) cewka prądowa                                      |        |
|     | d) cewka napięciowa                                   |        |
|     | e) cewka czasowa                                      |        |
| 5.  | Element napędowy przekaźnika ciepłego                 |        |
| 6.  | Bezpiecznik topikowy                                  |        |
| 7.  | Lampka sygnalizacyjna (symbol ogólny)                 |        |
| 8.  | Silnik:                                               |        |
|     | a) symbol ogólny                                      |        |
|     | b) asynchroniczny trójfazowy o wirniku zwartym        |        |
|     | c) asynchroniczny trójfazowy o wirniku pierścieniowym |        |

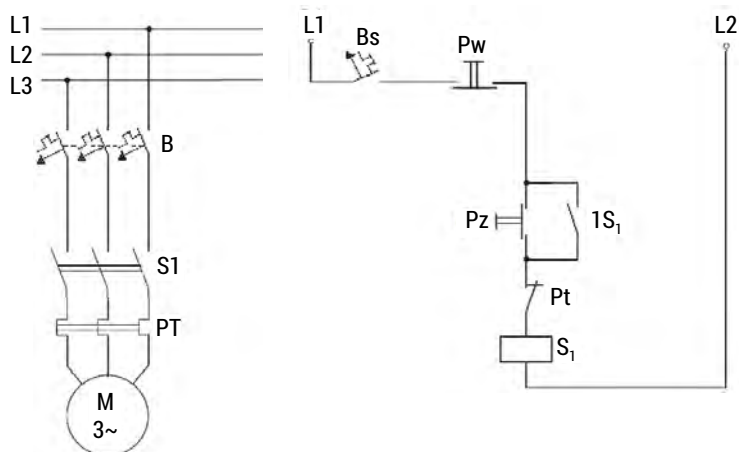
## 2. Wybrane układy sterowania silnikami elektrycznymi za pomocą styczników

### 2.1. Sterowanie pojedynczym silnikiem indukcyjnym

Uruchomienie lub zatrzymanie silnika w układzie przedstawionym na rys. 2a i 2b realizowane jest poprzez naciśnięcie przycisku Pz (załączenie) lub Pw (wyłączenie). Po zwolnieniu przycisków wracają one do położenia wyjściowych.



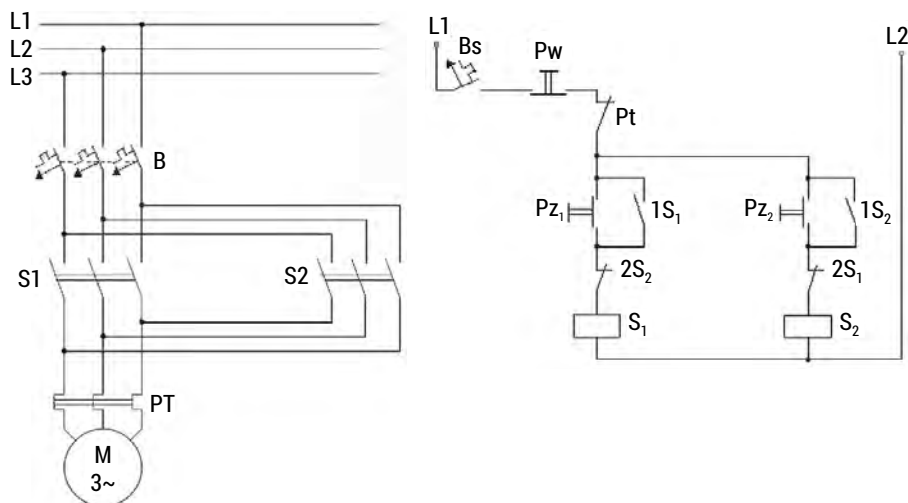
RYS. 2A. Schemat sterowania silnikiem indukcyjnym za pomocą łącznika stycznikowego przedstawiony w postaci skupionej, przy czym: Bs – wyłącznik nadprądowy; Pw – przycisk wyłączający; Pz – przycisk załączający; 1S<sub>1</sub> – zestyk pomocniczy zwierny; Pt – zestyk pomocniczy przekaźnika termicznego; S<sub>1</sub> – cewka stycznika



RYS. 2B. Schemat sterowania silnikiem indukcyjnym za pomocą łącznika stycznikowego przedstawiony w postaci rozwiniętej, przy czym: Bs – wyłącznik nadprądowy; Pw – przycisk wyłączający; Pz – przycisk załączający;  $1S_1$  – zestyk pomocniczy zwierny; Pt – zestyk pomocniczy przekaźnika termicznego;  $S_1$  – cewka stycznika

## 2.2. Sterowanie silnikiem indukcyjnym za pomocą stycznikowego przełącznika kierunku wirowania

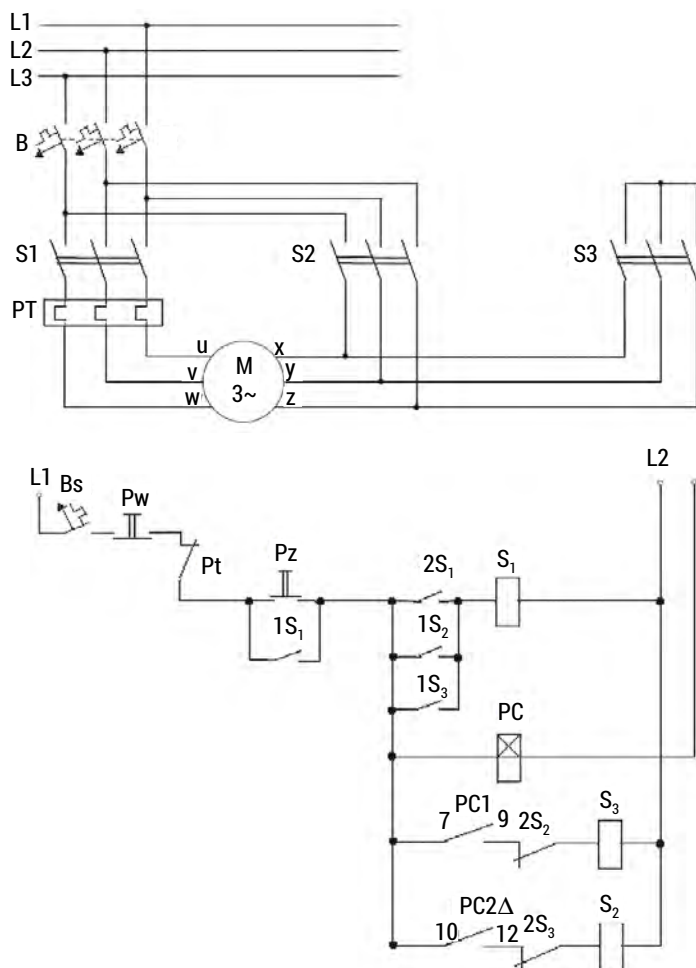
Po naciśnięciu przycisku  $Pz_1$  (rys. 3) zostaje załączony stycznik  $S1$ , co powoduje, że wirnik silnika indukcyjnego, jeżeli kolejność faz zasilających maszynę jest zgodna, wiruje zgodnie z kierunkiem ruchu wskazówek zegara. Uruchomienie silnika w przeciwnym kierunku wirowania jest możliwe jedynie po wcześniejszym wyłączeniu stycznika  $S1$  poprzez naciśnięcie przycisku Pw i załączeniu przycisku  $Pz_2$ . Wówczas wirnik silnika powinien obracać się w stronę przeciwną niż poprzednio.



RYS. 3. Schemat sterowania silnikiem za pomocą stycznikowego przełącznika kierunku wirowania, przy czym: Bs – wyłącznik nadprądowy; Pw – przycisk wyłączający; Pt – zestyk pomocniczy przekaźnika termicznego;  $Pz_1$  – przycisk załączający stycznik nr 1;  $Pz_2$  – przycisk załączający stycznik nr 2;  $1S_1, 2S_1$  – zestyki pomocnicze (zwierne i rozwierne) stycznika nr 1;  $1S_2, 2S_2$  – zestyki pomocnicze (zwierne i rozwierne) stycznika nr 2;  $S_1, S_2$  – cewki styczników nr 1 i 2

## 2.3. Sterowanie silnikiem indukcyjnym za pomocą stycznikowego przełącznika gwiazda–trójkąt

Naciśnięcie przycisku załączającego Pz (rys. 4) powoduje włączenie stycznika S3. Jednocześnie zwiera się zestyk pomocniczy  $1S_3$  i rozwiera zestyk  $2S_3$  (uzwojenie stojana silnika jest połączone w gwiazdę). Następstwem jest zadziałanie przekaźnika czasowego PC, który zaczyna odmierzać uprzednio nastawiony czas opóźnienia. W tej samej chwili włączony zostaje stycznik S1, który załącza zestyki w obwodzie głównym i uruchamia silnik elektryczny. Przed zwarciem w układzie chroni rozwarto zestyk  $2S_3$ , który uniemożliwia włączenie w tym samym czasie stycznika S2. Po upływie nastawionego czasu w przekaźniku czasowym PC rozwiera się zestyk  $1Pc$ , który przerywa obwód stycznika S3. Następstwem jest powrót zestyku  $2S_3$  do pozycji zwartej, a ponieważ zasilony jest także zestyk  $1S_3$ , zostaje włączony stycznik S2. Uzwojenie stojana silnika elektrycznego zostaje przełączone z gwiazdy na trójkąt. Silnik pracuje ze znamionową mocą. Aby wyłączyć silnik, należy nacisnąć przycisk Pw.

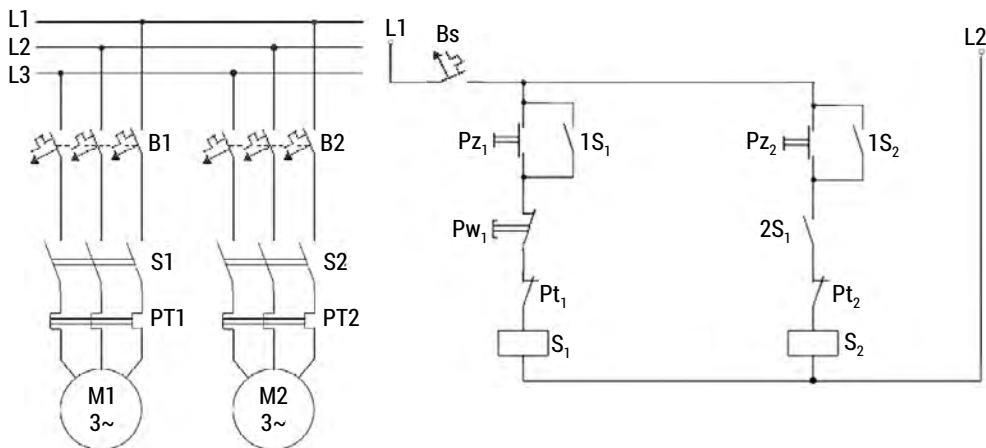


RYS. 4. Schemat sterowania silnikiem za pomocą stycznikowego przełącznika gwiazda-trójkąt, przy czym: Bs – wyłącznik nadprądowy; Pw – przycisk wyłączający; Pt – zestyk pomocniczy przełącznika termicznego; Pz – przycisk załączający układ;  $1S_1$ ,  $2S_1$  – zestyki pomocnicze zwiernie stycznika nr 1;  $1S_2$ ,  $2S_2$  – zestyki pomocnicze (zwierny i rozwierny) stycznika nr 2;  $1S_3$ ,  $2S_3$  – zestyki pomocnicze (zwierny i rozwierny) stycznika nr 3; PC1 – zestyk przełącznika czasowego załączającego połączenie w gwiazdę; PC2 – zestyk przełącznika czasowego załączającego połączenie w trójkąt; PC – cewka przełącznika czasowego;  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  – cewki styczników nr 1, 2 i 3

## 2.4. Sterowanie silnikiem indukcyjnym w układzie kaskadowym

Naciśnięcie przycisku załączającego  $Pz_1$  (rys. 5) uruchamia pierwszy silnik, co powoduje zamknięcie obwodu elektrycznego oraz zwarcie zestyków głównych i zestyku pomocniczego  $1S_1$  (gwarantującego podtrzymanie przepływu natężenia elektrycznego przez obwód elektryczny pomimo rozwarcia zestyku przycisku załączającego

$Pz_1$ ). Drugi silnik uruchamia się analogicznie, przy czym może to nastąpić jedynie wtedy, kiedy pracuje silnik pierwszy. Aby wyłączyć silniki elektryczne, należy przerwać obwód przyciskiem rozłączającym  $Pw_1$ , co spowoduje otwarcie styków głównych styczników  $S1$  i  $S2$ .



RYS. 5. Schemat sterowania silników elektrycznych w układzie kaskadowym, przy czym: Bs – wyłącznik nadprądowy;  $Pw_1$  – przycisk wyłączający;  $Pz_1$  – przycisk załączający stycznik nr 1;  $Pz_2$  – przycisk załączający stycznik nr 2;  $1S_1$ ,  $2S_1$  – zestyki pomocnicze zwierne stycznika nr 1;  $1S_2$  – zestyk pomocniczy zwierne stycznika nr 2;  $Pt_1$ ,  $Pt_2$  – zestyki pomocnicze przekaźnika termicznego nr 1 oraz nr 2;  $S_1$ ,  $S_2$  – cewki styczników nr 1 i 2

### 3. Cel i zakres ćwiczenia

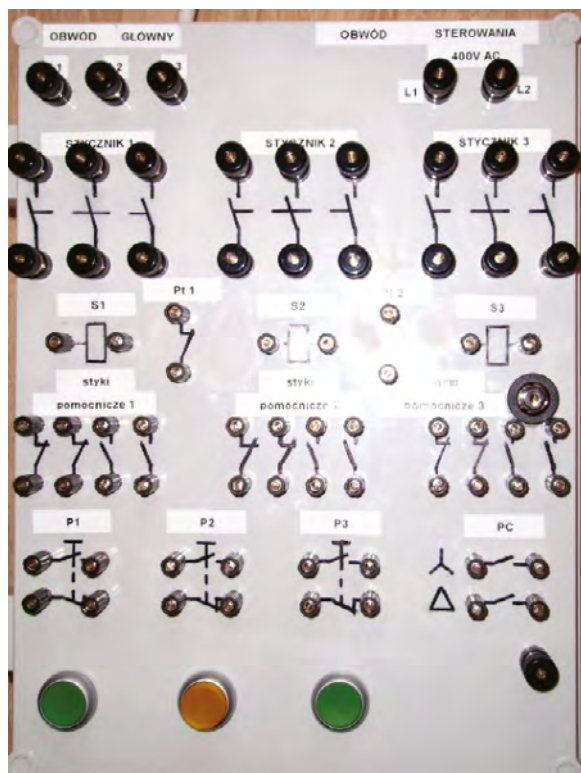
Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z budową i zasadą działania styczników oraz z prostymi układami sterowania silników indukcyjnych przy wykorzystaniu łączników stycznikowych. Ćwiczenie obejmuje zaprojektowanie oraz wykonanie zadanych przez prowadzącego układów sterowniczych.

## 4. Program badań

### 4.1. Budowa stanowiska laboratoryjnego

Stanowisko laboratoryjne służy do wykonywania układów sterujących silnikami indukcyjnymi klatkowymi o mocach i prądach nie większych niż 4 kW i 10 A.

Widok płyty czołowej stanowiska laboratoryjnego przedstawiono na rys. 6.



RYS. 6. Widok płyty czołowej stanowiska laboratoryjnego

Wykaz użytych do budowy stanowiska aparatów i urządzeń:

- obudowa Unibox Uni-1,
- łącznik krzywkowy Łuk E12-12,
- wyłączniki nadprądowe C25 i B6,
- przekaźnik czasowy do układu gwiazda–trójkąt PCG-417 DUO,
- trzy styczniki DIL EM-10 XTMC9A10,
- trzy styki pomocnicze 2xNO i 2xNC,
- dwa przekaźniki termiczne o wartości maksymalnej prądu 10 A,
- trzy elementy stykowe rozwierne M22-K01,
- trzy elementy stykowe zwierne M22-K10,
- trzy podstawy łącznikowe do styków,
- gniazda laboratoryjne o wartościach znamionowych 30 A i 24 A.

## 4.2. Przebieg ćwiczenia

Podczas ćwiczenia należy zaprojektować, połączyć i uruchomić wskazane przez prowadzącego układy sterownicze.

## 5. Sprawozdanie studenckie

Sprawozdanie z ćwiczenia powinno zawierać:

1. Cel i zakres ćwiczenia.
2. Opis stanowiska badawczego oraz użytych silników elektrycznych.
3. Schematy zaprojektowanych i utworzonych układów elektrycznych wykonane w postaci skupionej lub rozwiniętej. Dodatkowo należy wykonać schemat pozwalający określić liczbę żył przewodów łączących poszczególne elementy wchodzące w skład danego układu.
4. Analizę zasad działania poszczególnych układów.
5. Analizę zalet i wad poszczególnych układów, ze wskazaniem możliwych sposobów eliminacji tych wad.
6. Uwagi i wnioski z przeprowadzonych badań.

## Literatura

1. Krieser W., *Stykowe elektryczne układy sterowania*, wyd. II uzupełnione, Gliwice 2023.
2. Markiewicz H., *Instalacje elektryczne*, WNT, Warszawa 2018.
3. Grzesiak L., Ufnalski B., Kaszewski A., *Sterowanie napędów elektrycznych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2016.
4. Niestępski S., Parol M., Pasternakiewicz J., Wiśniewski T., *Instalacje elektryczne. Budowa, projektowanie i eksploatacja*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2019.

# Ćwiczenie nr 6

## BADANIE NAGRZEWANIA SIĘ PRZEWODÓW ELEKTRYCZNYCH POD WPŁYWEM PŁYNĄCEGO PRZESYŁANEGO PRĄDU

### 1. Wiadomości wstępne

Przewód elektryczny służy do przesyłania energii elektrycznej po określonej drodze. Jest to wyrób składający się z jednej lub większej liczby żył izolowanych, bez powłoki lub w powłoce niemetalowej, przy czym pojedyncza żyła może być wykonana z jednego lub kilku skręconych ze sobą drutów (wszystkie druty danej żyły powinny posiadać taką samą średnicę znamionową) [5].

W zależności od liczby żył wyróżnia się przewody jedno- i wielożyłowe (rys. 1). Przewody jednożyłowe zbudowane są z pojedynczej żyły osłoniętej izolacją. Przewody wielożyłowe składają się z co najmniej dwóch izolowanych żył umieszczonych we wspólnej osłonie izolacyjnej.



RYS. 1. Widok przewodu jednożyłowego i wielożyłowego (trzyżyłowego)

Żyły przewodów wykonane są z drutów miedzianych lub aluminiowych (aluminium może być wykorzystywane jedynie do budowy żył o przekrojach znamionowych powyżej 10 mm<sup>2</sup>). Charakterystyczną cechą każdego przewodu elektrycznego jest wartość pola przekroju poprzecznego żyły wyrażona w mm<sup>2</sup>. Znamionowe wartości przekrojów poprzecznych żył są znormalizowane i należą do typoszeregu: 0,15; 0,2; 0,35; 0,5; 0,75; 1; 1,5; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 35; 50; 70; 95; 120; 150; 185; 240; 300; 400; 500; 625; 800; 1000 mm<sup>2</sup>.

Izolacja żyły przewodu jest elementem służącym do odizolowania poszczególnych elementów przewodu od siebie oraz od części przewodzących dostępnych i obcych. Izolacja żyły powinna ściśle do niej przylegać, lecz nie może być z nią sklejoną. Nie powinna ponadto wykazywać pęknięć, porów czy pęcherzy widocznych nieuzbrojonym okiem. Izolacja żyły ochronnej posiada barwę zielono-żółtą, natomiast pozostałe żyły przewodu wielożyłowego są w kolorach: niebieskim (żyła neutralna), czarnym, brązowym i szarym (żyły fazowe). Powłoka zewnętrzna przewodu może przylegać do izolowanych żył, lecz nie może być z nimi sklejoną (musi umożliwiać ich swobodne przesuwanie się względem siebie podczas zginania przewodu). Barwa osłony odpornej na działanie promieni UV powinna być czarna, natomiast kolor pozostałych powłok zewnętrznych może być dowolny (najczęściej jest to biały) [1].

W wyniku przepływu prądu przez żyłę przewodu (charakteryzującą się pewną wartością rezystancji) następuje jej nagrzanie. Tak powstałe ciepło powoduje wzrost temperatury żyły, a następnie izolacji (ewentualnie osłony) i częściowo zostaje oddane do otoczenia.

Bilans energetyczny dla przewodu jednorodnego, nieizolowanego, o jednakowych warunkach chłodzenia na całej swej powierzchni, przez który przepływa prąd o stałej wartości skutecznej ( $I$ ), ma postać [2–4]:

$$k_d \cdot I^2 \cdot \frac{\rho \cdot l}{s} dt = s \cdot l \cdot c d\vartheta + \alpha \cdot S \cdot l \cdot (\vartheta - \vartheta_0) dt \quad (1)$$

gdzie:

- $\rho$  – rezystywność materiału przewodowego [ $\Omega \cdot m$ ];
- $l$  – długość rozpatrywanego odcinka przewodnika [m];
- $t$  – czas [s];
- $s$  – przekrój przewodnika [m<sup>2</sup>];
- $S$  – powierzchnia zewnętrzna jednostkowej długości [m<sup>2</sup>/m];
- $c$  – ciepło właściwe materiału przewodowego [J/m<sup>3</sup>·°C];
- $\vartheta, \vartheta_0$  – temperatura przewodu i temperatura otoczenia [°C];
- $\alpha$  – współczynnik oddawania ciepła do otoczenia [W/m<sup>2</sup>];
- $k_d$  – współczynnik strat dodatkowych ( $1 < k_d < 1,15$ ).

Lewa strona równania (1) pozwala obliczyć ilość ciepła wytworzonego w wyniku przepływu prądu przez żyłę przewodu/kabla. Pierwszy człon prawej strony równania określa ilość ciepła potrzebną do podgrzania przewodu o  $d\vartheta$ , natomiast drugi wyraz opisuje ilość ciepła oddanego do otoczenia.

Ponieważ w zakresie nieprzekraczającym temperatury 120°C zmiany parametrów  $k_p$ ,  $\rho$ ,  $c$ ,  $\alpha$  są pomijalnie małe, można założyć, że są one wartościami stałymi. Po wprowadzeniu oznaczenia cieplnej stałej czasowej  $T$  o postaci:

$$\frac{c \cdot s}{\alpha \cdot S} = T \quad (2)$$

można obliczyć wzrost wartości temperatury przewodu ponad temperaturę otoczenia:

$$\vartheta - \vartheta_o = \frac{k_d \cdot \rho}{\alpha \cdot S \cdot c} \cdot I^2 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + (\vartheta_o - \vartheta_o) \cdot e^{-\frac{t}{T}} \quad (3)$$

Jako że  $T > 0$ , wyrażenie  $e^{-\frac{t}{T}}$  wraz z upływem czasu dąży do zera. Z kolei temperatura przewodu dąży do wartości ustalonej  $\vartheta_u$ , wyrażonej zależnością:

$$\vartheta_u - \vartheta_o = \lim_{t \rightarrow \infty} (\vartheta - \vartheta_o) = \frac{k_d \cdot \rho}{\alpha \cdot S \cdot c} \cdot I^2 \quad (4)$$

Po podstawieniu wyrażenia (4) do wzoru (3) otrzymuje się równanie krzywej nagrzewania:

$$\vartheta = \vartheta_u - (\vartheta_u - \vartheta_o) e^{-\frac{t}{T}} \quad (5)$$

Ponieważ temperatura ustalona  $\vartheta_u$  zależy od temperatury otoczenia  $\vartheta_o$ , to dla każdej  $\vartheta_o$  otrzymuje się inną krzywą  $\vartheta = f(t)$ , o odpowiednio przesuniętych (w górę lub w dół) rzędnych. W celu usunięcia temperatury otoczenia z zależności (5) wprowadza się następujące przyrosty temperatur:  $\tau = (\vartheta - \vartheta_o)$ ,  $\tau_u = (\vartheta_u - \vartheta_o)$ ,  $\tau_p = (\vartheta_p - \vartheta_o)$ .

Dla dowolnej temperatury otoczenia  $\vartheta_o$  równanie nagrzewania otrzymuje postać:

$$\tau_u - \tau = (\tau_u - \tau_p) e^{-\frac{t}{T}} \quad (6)$$

lub

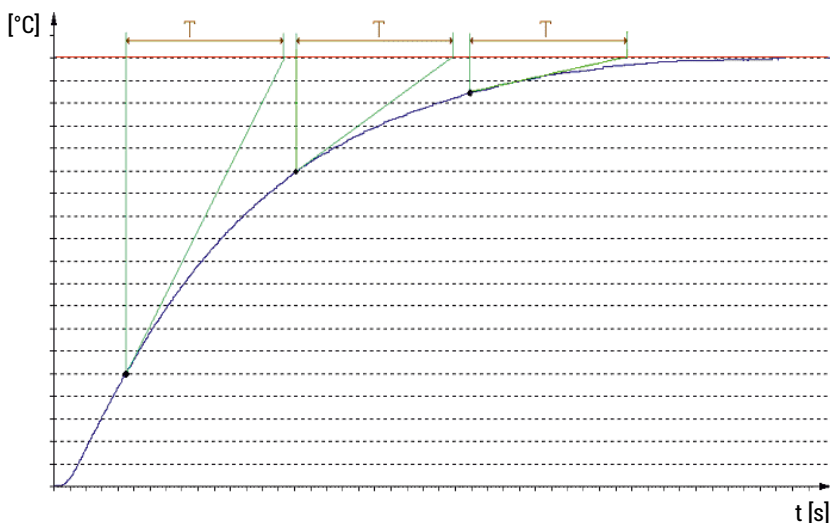
$$\tau = \tau_p + (\tau_u - \tau_p) \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) \quad (7)$$

przy czym  $\tau_p$  jest początkowym przyrostem wartości temperatury przewodu ponad temperaturę otoczenia [°C].

Wartość cieplnej stałej czasowej nagrzewania można określić, kreśląc w dowolnym punkcie krzywej nagrzewania styczną do tej krzywej, aż do przecięcia się z prostą  $\tau_u = \text{const}$ . Długość podstycznej zmierzona na prostej  $\tau_u = \text{const}$  jest równa stałej czasowej nagrzewania w przyjętej skali czasu (rys. 1).

W przypadku, gdy przewód jest obciążony dłużej niż cztery ciepłe stałe czasowe, można przyjąć, że przewód jest pod obciążeniem długotrwałym. Oznacza to, że prąd o stałym natężeniu płynący nieskończenie długo spowoduje wzrost temperatury przewodu do wartości granicznej dopuszczalnej długotrwałe:  $\vartheta_z$ . Z zależności (4) oraz przyrostu temperatury dopuszczalnej długotrwałe  $\tau_z = (\vartheta_z - \vartheta_o)$  otrzymuje się:

$$I_z = \sqrt{\frac{s \cdot \alpha \cdot S}{k_d \cdot \rho}} \cdot (\vartheta_z - \vartheta_o) \quad (8)$$



RYŚ. 2. Graficzne wyznaczenie cieplnej stałej czasowej  $T$  w oparciu o charakterystykę nagrzewania przewodu

Innym rodzajem obciążenia przewodu jest obciążenie dorywcze. Charakteryzuje się ono tym, że czas przepływu prądu jest niewystarczający do ustalenia się przyrostu temperatury, po którym następuje przerwa, kiedy to przewód ochładza się do temperatury otoczenia. Największą wartość prądu dorywczego  $I_{dor}$  można wyznaczyć z zależności [4]:

$$I_{dz} = I_z \frac{1}{\sqrt{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}}} \quad (9)$$

gdzie:

$t_p$  – czas trwania obciążenia przewodu.

Kolejnym rodzajem obciążenia jest obciążenie przerywane. Charakteryzuje się ono cyklicznie powtarzającymi się okresami obciążenia (o niezmienniej wartości prądu) i przerwami bezprądowymi, przy czym przewód nie nagrzewa się do temperatury dopuszczalnej długotrwale oraz nie stygnie do temperatury otoczenia. Największą dopuszczalną wartość prądu obciążenia przerywanego wyznacza się z równania [4]:

$$I_{pZ} = I_Z \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{t_p}{\alpha' \cdot T}}}{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}}} \quad (10)$$

gdzie:

$t_o$  – czas trwania przerwy w obciążeniu;

$\alpha'$  – względny czas pracy wyrażony wzorem:

$$\alpha' = \frac{t_p}{t_p + t_o} \quad (11)$$

## 2. Cel i zakres ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się ze zjawiskami cieplnymi występującymi podczas przepływu prądu przez przewody elektryczne w zależności od sposobu wykonania instalacji elektrycznej. Zakres ćwiczenia obejmuje zarejestrowanie krzywych nagrzewania wybranych obwodów elektrycznych oraz wyznaczenie na ich podstawie obciążalności prądowej dorywczej i przerywanej badanych układów.

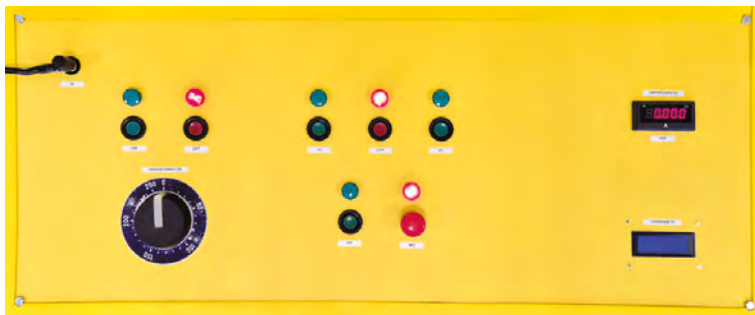
## 3. Program badań

### 3.1. Opis stanowiska

Stanowisko badawcze składa się z:

- części sterowniczej (rys. 2), na której umieszczony jest układ regulacyjny zadanego prądu obciążenia wraz z wyświetlaczami wartości temperatury panującej w badanym układzie oraz natężenia prądu płynącego przez badany obwód;
- części badawczej (rys. 3), na której znajduje się osiem badanych obwodów elektrycznych.

Zmiana badanej linii odbywa się poprzez przykręcenie końcówki przewodu odchodzącego od części sterowniczej stanowiska do zacisku (od Z1 do Z8) na tablicy instalacyjnej (części badawczej stanowiska).



RYS. 3. Widok tablicy sterowniczej stanowiska laboratoryjnego



RYS. 4. Widok tablicy badawczej stanowiska laboratoryjnego

Wszelkie przełączenia w obwodzie należy wykonywać przy wyłączonym napięciu na stanowisku.

Kolejność załączania stanowiska:

1. Przyłączyć przewód zasilający do badanej linii.
2. Załączyć stanowisko przyciskiem ON (obok WG).
3. Wybrać rodzaj wymuszenia prądowego:
  - AC – obciążenie prądu przemiennego,
  - DC – obciążenie prądu stałego.

4. Załączyć zasilanie badanych przewodów przyciskiem ON (nad transformatorem).
5. Za pomocą pokrętła autotransformatora ustawić wartość prądu (zgodnie z przekładnią i zaleceniami prowadzącego).

TAB. 1. Przewody znajdujące się na tablicy badawczej

| Oznaczenie linii | Rodzaj obudowy      | Rodzaj przewodu             |
|------------------|---------------------|-----------------------------|
| Z1               | peszel              | YDY 3 × 2,5 mm <sup>2</sup> |
| Z2               | peszel              | 3 × DY 2,5 mm <sup>2</sup>  |
| Z3               | rurka PVC           | YDY 3 × 2,5 mm <sup>2</sup> |
| Z4               | rurka PVC           | 3 × DY 2,5 mm <sup>2</sup>  |
| Z5               | rurka metalowa      | YDY 3 × 2,5 mm <sup>2</sup> |
| Z6               | rurka metalowa      | 3 × DY 2,5 mm <sup>2</sup>  |
| Z7               | listwa instalacyjna | YDY 3 × 2,5 mm <sup>2</sup> |
| Z8               | listwa instalacyjna | 3 × DY 2,5 mm <sup>2</sup>  |

## 3.2. Przebieg ćwiczenia

Dla wybranych przez prowadzącego linii wyznaczyć krzywe nagrzewania przewodów pod wpływem płynącego przez nie prądu. Pomiaru należy dokonywać co 15 sekund przez czas wskazany przez prowadzącego. Wskazania amperomierza, które odpowiadają poszczególnym wartościom prądów obciążenia DC zostały zamieszczone w tab. 2.

TAB. 2. Rzeczywiste prądy DC i odpowiadające im wskazania amperomierza

| Prąd rzeczywisty DC [A] | Wskazanie amperomierza |
|-------------------------|------------------------|
| 22                      | 0,71                   |
| 23                      | 0,72                   |
| 24                      | 0,75                   |
| 25                      | 0,77                   |
| 26                      | 0,79                   |
| 27                      | 0,82                   |
| 28                      | 0,84                   |
| 29                      | 0,87                   |
| 30                      | 0,89                   |

## 4. Sprawozdanie studenckie

Sprawozdanie z ćwiczenia powinno zawierać:

1. Schematy badanych układów.
2. Zestawienie zmierzonych wielkości.
3. Wykresy zależności  $\vartheta = f(t)$ .
4. Graficzne wyznaczenie wartości cieplnych stałych czasowych badanych układów.
5. Obliczenia wartości prądów dopuszczalnych dorywczych i przerywanych dla trzech wybranych czasów trwania obciążenia i przerw bezprądowych.
6. Analizę otrzymanych wyników.
7. Wnioski.

## Literatura

1. PN-EN 60446:2010 *Zasady podstawowe i bezpieczeństwa przy współdziałaniu człowieka z maszyną, znakowanie i identyfikacja – Identyfikacja przewodów kolorami albo znakami alfanumerycznymi.*
2. Lejdy B., Sulkowski M., *Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych*, WNT, Warszawa 2019.
3. Markiewicz H., *Instalacje elektryczne*, WNT, Warszawa 2018.
4. Markiewicz H., *Urządzenia elektroenergetyczne*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2016.
5. *Poradnik inżyniera elektryka*, praca zbiorowa, WNT, Warszawa 2022 i wydania wcześniejsze.

# Ćwiczenie nr 7

## BADANIE SPADKÓW NAPIĘĆ W INSTALACJACH ELEKTRYCZNYCH

### 1. Wiadomości wstępne

Instalacją elektryczną nazywa się zespół urządzeń elektroenergetycznych o skoordynowanych parametrach, służących do przesyłu, rozdziału, sygnalizacji, zabezpieczania i przekształcania energii elektrycznej z sieci rozdzielczej energetyki zawodowej do odbiorników o napięciu znamionowym nieprzekraczającym 1 kV, rozpoczynający się w złączu elektrycznym i kończący się na odbiorniku [2]. W skład instalacji elektrycznej wchodzi m.in.: przewody, aparaty i przyrządy łączeniowe, zabezpieczające, ochronne, sterujące i pomiarowe oraz obudowy i konstrukcje wsporcze.

W każdej instalacji elektrycznej dąży się do tego, aby odbiorniki energii elektrycznej pracowały po ich załączeniu na napięciu jak najbliższym wartości napięcia znamionowego, przy czym odchylenie wartości napięcia dostarczonego z sieci dystrybucyjnej nie może przekraczać  $\pm 10\%$  (przez 95% czasu w tygodniu).

W przewodach zasilających odbiorniki energii występują straty wynikające z rezystancji żył przewodu. Wartość rezystancji  $R_L$  przewodu można wyznaczyć na podstawie zależności [1, 2, 4]:

$$R_L = \frac{l}{\gamma \cdot s} \quad (1)$$

gdzie:

$l$  – długość przewodu [m];

$\gamma$  – przewodność właściwa materiału przewodowego [ $\text{m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$ ];

$s$  – pole przekroju poprzecznego przewodu [ $\text{mm}^2$ ].

Przewodność właściwa miedzi wynosi (w zależności od czystości materiału, z jakiego wykonana jest żyła) ok. 55 [ $\text{m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$ ], natomiast aluminium ok. 35 [ $\text{m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$ ].

Spadek napięcia w linii jednofazowej, obciążonej prądem  $I$  o stałym natężeniu, określony jest zależnością [2, 4]:

$$\Delta U = 2 \cdot I \cdot (R_L \cos \varphi \pm X_L \sin \varphi) \quad (2)$$

a dla obwodów trójfazowych:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot I \cdot (R_L \cos \varphi \pm X_L \sin \varphi) \quad (3)$$

Procentowy spadek napięcia przewodowego:

$$\Delta U_{(\%)} = \frac{\Delta U}{U_n} 100\% = \frac{P R}{U_n^2} = \frac{P l}{U_n^2 s \gamma} 100\% = \frac{\sqrt{3} U_n I l \cos \varphi}{U_n^2 s \gamma} = \frac{\sqrt{3} I R \cos \varphi}{U_n} 100\% \quad (4)$$

Procentowy spadek napięcia fazowego:

$$\Delta U_{f(\%)} = \frac{\Delta U_f}{U_f} 100\% = \frac{P l}{U_n^2 s \gamma} 100\% = \frac{\sqrt{3} U_n I l \cos \varphi}{U_n^2 s \gamma} 100\% = \frac{\sqrt{3} I R \cos \varphi}{U_n} 100\% \quad (5)$$

gdzie:

$\Delta U_{(\%)}, \Delta U_{f(\%)}$  – procentowy spadek napięcia przewodowego/fazowego [%];

$\Delta U, \Delta U_f$  – spadek napięcia przewodowego/fazowego [V];

$I$  – prąd płynący w linii [A];

$P$  – moc obciążenia linii [W];

$U_n$  – napięcie znamionowe [V];

$R$  – rezystancja linii [ $\Omega$ ];

$\gamma$  – przewodność elektryczna właściwa materiału, z którego wykonany jest przewód [ $\text{m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$ ];

$s$  – pole przekroju przewodu [ $\text{mm}^2$ ];

$l$  – długość linii [m];

$\cos \varphi$  – współczynnik mocy obciążenia.

W zależnościach (2) i (3) znak „+” dotyczy obciążenia o charakterze indukcyjnym (np. silniki indukcyjne), a znak „-” obciążenia pojemnościowego (np. kondensatory) [3].

W obwodach z przewodami o przekroju żył do  $16 \text{ mm}^2$  można pominąć reakcję, gdyż wartość rezystancji przewodów jest ponad pięciokrotnie wyższa od ich reakcji [4]. Uproszczenie to nie ma więc istotnego wpływu na dokładność wyników obliczeń. Przy uwzględnieniu tego uproszczenia spadek napięcia w linii jednofazowej można opisać zależnością:

$$\Delta U = 2 \cdot I \cdot R_L \cdot \cos \varphi \quad (6)$$

Należy przy tym pamiętać, że dla odbiorników o charakterze rezystancyjnym (np. żarówki)  $\cos\phi$  w przybliżeniu wynosi 1.

Zbyt niska wartość napięcia zasilającego odbiorniki może powodować nieprawidłowe działanie urządzeń elektrycznych, co w skrajnych przypadkach prowadzi niekiedy nawet do ich uszkodzenia. Ponadto spadki napięć powodują występowanie zwiększonych wartości strat mocy, co często prowadzi do nadmiernego nagrzewania się przewodów i kabli elektrycznych.

Wartość spadku napięcia w obwodzie elektrycznym niskiego napięcia zależy głównie od:

- wartości prądu przepływającego przez obwód (wartości mocy zainstalowanych odbiorników);
- pola przekroju poprzecznego żyły (żył) roboczych przewodu/kabla;
- materiału, z którego wykonana jest żyła przewodu/kabla;
- łącznej długości przewodów w analizowanym obwodzie;
- rezystancji zestyków na łączeniach urządzeń elektrycznych oraz rezystancji innych aparatów zainstalowanych w obwodzie.

W obecnie obowiązujących przepisach [5] wymaga się, aby wartość procentowego spadku napięcia w instalacji elektrycznej na odcinku od złącza do odbiornika nie przekraczała 3% wartości napięcia znamionowego dla obwodów oświetleniowych oraz 5% dla pozostałych obwodów. W literaturze [1, 2] można znaleźć również wymagania stawiane dopuszczalnym wartościami spadków napięć w zależności od budowy i przeznaczenia instalacji elektrycznej (tab. 1).

TAB. 1. Dopuszczalne procentowe spadki napięcia w instalacjach elektroenergetycznych odbiorczych o napięciu wyższym niż 42 V

| Źródło zasilania                           | Dopuszczalny spadek napięcia w instalacjach zasilających odbiorniki [%]: |                                       |                        |
|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|------------------------|
|                                            | oświetleniowe                                                            | oświetleniowe, siłowe i (lub) grzejne | siłowe i (lub) grzejne |
| wewnętrzna linia zasilająca                | 2                                                                        | 2                                     | 3                      |
| sieć o $U_n \leq 1$ kV                     | 4                                                                        | 4                                     | 6                      |
| rozdzielnica główna stacji lub inne źródło | 5                                                                        | 7                                     | 9                      |

Wartości dopuszczalnych spadków napięcia mogą być większe od 4% dla linii zasilających silniki w czasie ich rozruchu lub inne odbiorniki z dużym prądem rozruchowym, lecz nie powinny przekraczać [4]:

- dla rozruchu lekkiego – 35%,
- dla rozruchu ciężkiego i rzadkiego (mniej niż 15 razy na godzinę) – 15%,
- dla rozruchu ciężkiego i częstego (ponad 15 razy na godzinę) – 10%.

Zbyt duże wartości spadku napięcia mogą być spowodowane:

- doбором w fazie projektowania przewodów zasilających odbiorniki o zbyt małym polu przekroju poprzecznego;
- przyłączeniem do obwodu odbiornika o mocy większej niż ta, dla której został on zaprojektowany i wykonany;
- zaśniedziałymi stykami aparatów lub luźnymi połączeniami żył zwiększającymi rezystancję obwodu.

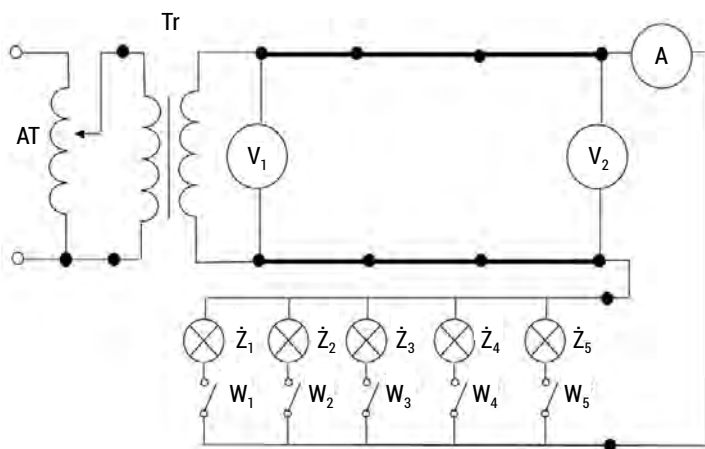
## 2. Cel i zakres ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zbadanie zjawiska spadku napięcia w instalacji elektrycznej oraz jego wpływu na działanie odbiorników energii elektrycznej. Ćwiczenie obejmuje wyznaczenie wartości spadków napięcia w obwodzie elektrycznym w zależności od wartości napięcia zasilającego badany obwód oraz od charakteru obciążenia (obciążenie rezystancyjne, rezystancyjno-indukcyjne, rezystancyjno-pojemnościowe).

## 3. Program badań

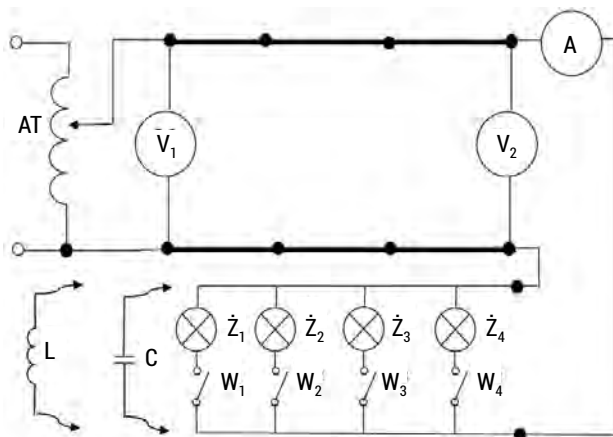
### 3.1. Opis stanowiska badawczego

Przedmiotem badania jest model instalacji elektrycznej jednofazowej (dwuprzewodowej), pracującej na dwóch poziomach napięć znamionowych: 24 V oraz 230 V.



RYS. 1. Schemat układu pomiarowego do wyznaczania spadków napięć w linii jednofazowej o napięciu znamionowym 24 V

Pomiary wartości spadków napięć w badanej linii o napięciu znamionowym 24 V należy wykonać w układzie, którego schemat przedstawiony został na rys. 1. W układzie tym model linii (zaznaczony na rysunku grubą kreską) zasilany jest z autotransformatora AT o zakresie regulacji napięcia 0–250 V poprzez transformator obniżający napięcie Tr o przekładni 220/24 V. Układ obciążony jest żarówkami  $\dot{Z}_1$ – $\dot{Z}_5$  o napięciu znamionowym równym 24 V, załączanymi przy wykorzystaniu łączników  $W_1$ – $W_5$ .



RYŚ. 2. Schemat układu pomiarowego do wyznaczania spadków napięć w linii jednofazowej o napięciu znamionowym 230 V

W przypadku, gdy napięcie znamionowe linii wynosi 230 V, pomiarów należy dokonać w układzie, którego schemat przedstawiony został na rys. 2, jako obciążenia używając:

- żarówek o napięciu znamionowym 230 V,
- żarówek o napięciu znamionowym 230 V z połączonym równolegle elementem indukcyjnym (dławik),
- żarówek o napięciu znamionowym 230 V z połączonym równolegle elementem pojemnościowym (kondensator).

Przy wykonywaniu badań na napięciu zasilającym równym 230 V należy pamiętać o włączeniu w układ pomiarowy watomierza (o odpowiednim zakresie pomiarowym), który pozwoli na wyznaczenie  $\cos\varphi$  występującego w badanym układzie.

## 3.2. Przebieg ćwiczenia

### 3.2.1. Badanie linii o napięciu znamionowym 24 V

Należy połączyć układ pomiarowy zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 1, zwracając szczególną uwagę na zakresy przyrządów pomiarowych.

Za pomocą autotransformatora nastawić napięcie  $U_1$  na wartość znamionową (24 V) i utrzymywać tę wartość przez cały czas trwania pomiarów.

Zmieniając obciążenie linii poprzez załączanie lub wyłączanie poszczególnych odbiorników  $\tilde{Z}_1-\tilde{Z}_5$ , wykorzystując wszystkie możliwe (różne) kombinacje wartości sumarycznej mocy żarówek, należy dokonać pomiarów napięć w poszczególnych punktach pomiarowych linii oraz natężenia prądu  $I$  płynącego w obciążonych przewodach.

Wyniki pomiarów zestawień w tab. 2.

TAB. 2. Zestawienie wyników pomiarów przy  $U = 24$  V

| Lp. | Wartości zmierzone |       |       |       |       |       |     | Wartości obliczone |                  |                  |                 |                 |
|-----|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|--------------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|
|     | $P_n$              | $U_1$ | $U_2$ | $U_3$ | $U_4$ | $U_5$ | $I$ | $R_{1-5}$          | $\Delta U_{1-5}$ | $\Delta P_{1-5}$ | $\Delta U_{\%}$ | $\Delta P_{\%}$ |
|     | W                  | V     | V     | V     | V     | V     | A   | $\Omega$           | V                | W                | %               | %               |
|     |                    |       |       |       |       |       |     |                    |                  |                  |                 |                 |
|     |                    |       |       |       |       |       |     |                    |                  |                  |                 |                 |
|     |                    |       |       |       |       |       |     |                    |                  |                  |                 |                 |

Przyjmując średnią wartość rezystancji przewodu  $R_L$  i zakładając, że przewód o przekroju  $s = 2,5 \text{ mm}^2$  wykonany jest z miedzi, należy obliczyć rzeczywistą długość linii  $l$ .

Na podstawie tabeli sporządzić i omówić wykresy:  $\Delta U = f(I)$ ,  $\Delta U_{\%} = f(I)$ ,  $\Delta P = f(I)$ ,  $\Delta P_{\%} = f(I)$ .

### 3.2.2. Badanie linii o napięciu znamionowym 230 V

Należy połączyć układ pomiarowy zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 2, zwracając szczególną uwagę na zakresy przyrządów pomiarowych.

Za pomocą autotransformatora nastawić napięcie  $U_1$  na wartość znamionową (230 V) i utrzymywać tę wartość przez cały czas trwania pomiarów.

Zmieniając obciążenie linii poprzez załączanie lub wyłączanie poszczególnych odbiorników  $\tilde{Z}_1-\tilde{Z}_4$  oraz wykorzystując wszystkie możliwe (różne) kombinacje wartości sumarycznej mocy żarówek, należy dokonać pomiarów napięć w poszczególnych punktach pomiarowych linii, natężenia prądu  $I$  płynącego w obciążonych przewodach oraz mocy czynnej  $P$ .

Następnie pomiary powtórzyć przy dołączonych równolegle do układu odbiornikach indukcyjnym oraz pojemnościowym (kolejny układ). Wyniki pomiarów zestawień w tab. 3.

Przyjmując średnią wartość rezystancji przewodu  $R_L$  i zakładając, że przewód o przekroju  $s = 2,5 \text{ mm}^2$  wykonany jest z miedzi, należy obliczyć rzeczywistą długość linii  $l$ .

TAB. 3. Zestawienie wyników pomiarów przy  $U = 230\text{ V}$ 

| Lp. | Wartości zmierzone |       |       |       |       |       |     | Wartości obliczone |                  |                  |                 |                 |
|-----|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|--------------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|
|     | $P_n$              | $U_1$ | $U_2$ | $U_3$ | $U_4$ | $U_5$ | $I$ | $R_{L1-5}$         | $\Delta U_{1-5}$ | $\Delta P_{1-5}$ | $\Delta U_{\%}$ | $\Delta P_{\%}$ |
|     | W                  | V     | V     | V     | V     | V     | A   | $\Omega$           | V                | W                | %               | %               |
|     |                    |       |       |       |       |       |     |                    |                  |                  |                 |                 |
|     |                    |       |       |       |       |       |     |                    |                  |                  |                 |                 |

Na podstawie tabeli sporządzić i omówić wykresy:  $\Delta U = f(I)$ ,  $\Delta U_{\%} = f(I)$ ,  $\Delta P = f(I)$ ,  $\Delta P_{\%} = f(I)$ .

## 4. Sprawozdanie studenckie

Sprawozdanie z ćwiczenia powinno zawierać:

1. Cel ćwiczenia.
2. Schematy układów pomiarowych.
3. Tabelaryczne zestawienie wyników badań.
4. Obliczenia i wykresy.
5. Wnioski.

We wnioskach należy zwrócić szczególną uwagę na omówienie otrzymanych w wyniku pomiarów wykresów, jak również na określenie parametrów, od których zależy wartość spadku napięcia.

## Literatura

1. Lejdy B., Sulkowski M., *Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych*, WNT, Warszawa 2019.
2. Markiewicz H., *Instalacje elektryczne*, WNT, Warszawa 2018.
3. Marzecki J., *Sieci elektroenergetyczne w obiektach przemysłowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2024.
4. *Poradnik inżyniera elektryka*, praca zbiorowa, WNT, Warszawa 2022 i wydania wcześniejsze.
5. PN-HD 60364-4-41:2017-09 *Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 4-41: Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa – Ochrona przed porażeniem elektrycznym*.

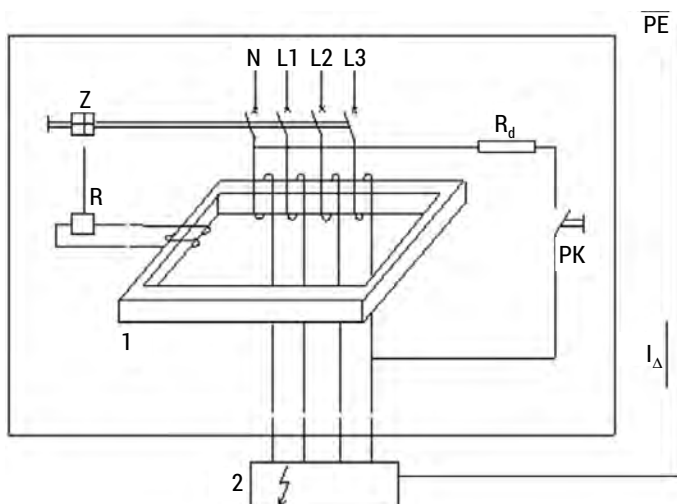
# Ćwiczenie nr 8

## BADANIA WYŁĄCZNIKÓW PRZECIWPORAŻENIOWYCH RÓŻNICOWOPRĄDOWYCH

### 1. Wiadomości wstępne

#### 1.1. Budowa i zasada działania wyłączników różnicowoprądowych

Budowę urządzenia ochronnego różnicowoprądowego przedstawiono na rys. 1.



RYS. 1. Zasada budowy wyłącznika różnicowoprądowego [1]: 1 – przekładnik Ferrantiego; 2 – część przewodząca dostępna odbiornika; Z – zamek wyłącznika; R – wyzwalacz, cewka wyzwalacza; PK – przycisk kontrolny; R<sub>d</sub> – opornik dodatkowy; L1, L2, L3 – przewody fazowe; N – przewód neutralny; PE – przewód ochronny

W konstrukcji wyłącznika różnicowoprądowego można wyróżnić trzy podstawowe elementy:

- przekładnik Ferrantiego,
- wyzwalacz odryglowujący zestyki wyłącznika,
- zamek wyłącznika.

Przekładnik sumujący (Ferrantiego) obejmuje wszystkie przewody czynne (bez przewodu ochronnego PE), czyli przewody, przez które podczas normalnej pracy przepływa prąd wynikający z obciążenia elektrycznego powodowanego przez odbiorniki przyłączone za wyłącznikiem różnicowoprądowym. Konstrukcja wyłączników różnicowoprądowych umożliwia jednocześnie otwarcie zestyków biegunów fazowych i bieguna neutralnego. Czas wyłączenia zależy przede wszystkim od typu wyłącznika oraz od krotności prądu różnicowego  $I_{\Delta}$  w stosunku do znamionowego prądu wyzwalającego  $I_{\Delta N}$  [2, 4].

W warunkach normalnej pracy suma wartości chwilowych prądów przepływających przewodami fazowymi i neutralnym jest równa zero:

$$i_{L1} + i_{L2} + i_{L3} + i_N = 0 \quad (1)$$

W wyłączniku różnicowoprądowym każdy przewód fazowy oraz neutralny ma nawiniętą na rdzeniu jednakową liczbę zwojów. W związku z tym w trakcie normalnej pracy w rdzeniu nie występuje strumień magnetyczny. Jeżeli w chronionym wyłącznikiem obwodzie wystąpi zakłócenie powodujące przepływ prądu różnicowego  $\Delta i$ , w przewodzie ochronnym PE suma prądów w równaniu (1) będzie różna od zera. W rdzeniu przekładnika Ferrantiego indukuje się wówczas strumień magnetyczny, który powoduje przepływ prądu w obwodzie cewki wyzwalacza różnicowego. Przekroczenie wartości znamionowej prądu różnicowego  $\Delta i$  powoduje zwolnienie zamka i zadziałanie wyłącznika (otwarcie styków ruchomych, najczęściej przy pomocy napędu sprężynowego). Przycisk kontrolny PK służy do sprawdzenia sprawności wyłącznika. Po jego naciśnięciu następuje wymuszenie w obwodzie z opornikiem dodatkowym prądu różnicowego (o wartości zależnej od wartości rezystancji opornika dodatkowego), który powoduje zadziałanie wyłącznika. Sprawność działania wyłącznika należy kontrolować w czasie jego eksploatacji poprzez naciśnięcie przycisku kontrolnego i sprawdzenie otwarcia styków głównych wyłącznika świadczącego o braku napięcia na zaciskach odejściowych.

Wyłączniki różnicowoprądowe reagują tylko na prąd płynący (w wyniku uszkodzenia) do uziemionego przewodu PE lub do ziemi. Wyłączniki nie reagują na prądy przetężeniowe (przeciążeniowe, zwarciove), które przepływają przez przewody robocze. W związku z tym wymaga się, aby każdy wyłącznik różnicowoprądowy był dodatkowo zabezpieczony urządzeniem przetężeniowym (najczęściej stosowane są do tego wyłączniki nadprądowe bądź, rzadziej, wkładki bezpiecznikowe), którego prąd zadziałania jest nie większy od prądu znamionowego ciągłego ochranianego wyłącznika różnicowoprądowego [1, 2, 3, 4].

Podstawowe parametry wyłączników różnicowoprądowych:

- napięcie znamionowe  $U_N$  – dla wyłączników jednofazowych (dwubiegunowych) wynosi ono 230 V, a dla wyłączników trójfazowych (czterobiegunowych) 400 V;
- prąd znamionowy ciągły  $I_n$  (najczęściej spotyka się wyłączniki o prądach 16, 20, 25, 40, 63, 100 A);
- typ wyłącznika (tab. 1);
- częstotliwość znamionowa  $f$ ;
- prąd znamionowy wyzwalający  $I_{\Delta n}$ .

Wyłączniki różnicowoprądowe budowane są jako:

- wysokoczułe – o  $I_{\Delta n}$  równym 6, 10, 30 mA;
- średnioczułe – o  $I_{\Delta n}$  równym 100, 300, 500 mA;
- niskoczułe – o  $I_{\Delta n}$  równym 1000, 3000 mA.

TAB. 1. Typy wyłączników różnicowoprądowych [1]

| Typ | Zakres stosowania                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AC  | Do stosowania przy prądach sinusoidalnie przemiennych. Wyłączniki można stosować do zabezpieczenia instalacji i urządzeń elektrycznych, w których nie są zainstalowane urządzenia energoelektroniczne mogące powodować znaczne odkształcenia parametrów sieci zasilającej                                                                                                               |
| A   | Do stosowania przy prądach sinusoidalnie przemiennych, pulsujących stałych lub pulsujących stałych ze składową wygładzoną 6 mA                                                                                                                                                                                                                                                          |
| B   | Do stosowania w sieciach, w których prąd ma przebieg sinusoidalnie przemienny, stały pulsujący lub sinusoidalny ze składową wygładzoną o wartości większej niż $0,4 I_{\Delta n}$ lub 10 mA oraz stały z układów prostownikowych. Wyłączniki posiadają człon działający w sposób bezpośredni na prądy różnicowe oraz człon o działaniu pośrednim reagujący na składową stałą tego prądu |
| G   | Wyłącznik krótkozwłoczny o czasie przetrzymywania 10 ms. Odporny na udarowy prąd różnicowy 3 kA, 8/20 $\mu$ s                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| S   | Wyłącznik selektywny działający z opóźnieniem. Opóźnienie czasowe wyzwalania – element RC w obwodzie wtórnym przekładnika sumującego. Przeznaczony do współpracy przy połączeniu szeregowym z wyłącznikiem różnicowoprądowym bezzwłocznym                                                                                                                                               |

Z punktu widzenia obciążalności zwarciowej rozróżnia się wyłączniki różnicowoprądowe [4]:

1. Bez członu przetężeniowego, charakteryzujące się zdolnością wyłączania prądu o wartości równej co najmniej dziesięciokrotnej wartości prądu znamionowego ciągłego, ale nie mniejszej niż 500 A. Tego typu wyłączniki wymagają dodatkowego zabezpieczenia wyłącznikami nadprądowymi lub bezpiecznikami.
2. Wyłączniki różnicowoprądowe z wyzwalaczami przetężeniowymi, o zdolności wyłączania porównywalnej z wyłącznikami instalacyjnymi nadprądowymi. Wyłączniki tego typu mają podany typ charakterystyki, tak samo jak wyłączniki nadprądowe: np. B16/0,03 oznacza charakterystykę B, prąd znamionowy

16 A i prąd różnicowy 0,03 A. Ponadto wyłączniki posiadają symbol graficzny, który określa wartość prądu zwarcowego umownego (np. 6000 oznacza wartość prądu zwarcowego równą 6 kA).

## 1.2. Zasady pomiaru miernikiem MRP-1

Miernik zabezpieczeń różnicowoprądowych typu MRP-1 jest przenośnym cyfrowym przyrządem przeznaczonym do pomiaru parametrów wyłączników różnicowoprądowych (RCD) [5]. Dodatkowo miernik wyposażony jest w układ pomiaru wartości skutecznych napięć przemiennych. Miernik MRP-1 można stosować w sieciach prądu przemiennego jednofazowego i trójfazowego o napięciu znamionowym 230/400 V i częstotliwości 50 Hz.



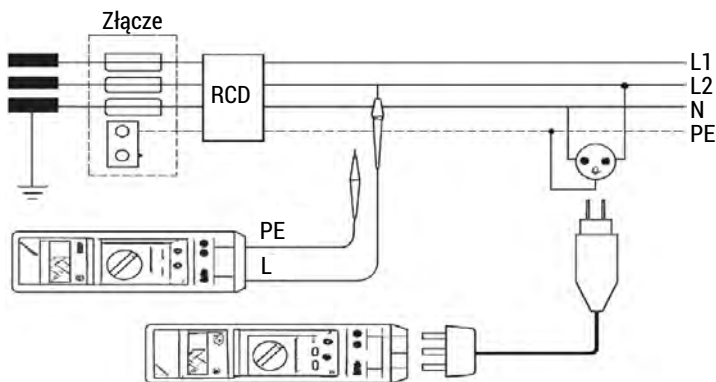
RYS. 2. Miernik zabezpieczeń różnicowoprądowych typu MRP-1 [5]

Miernik ten umożliwia:

- pomiar prądu wyzwalania wyłącznika RCD,
- pomiar napięcia dotykowego,
- pomiar rezystancji uziemienia,
- skontrolowanie poprawności podłączenia gniazdka sieciowego,
- pomiar czasu zadziałania wyłącznika RCD przy prądzie wyzwalającym równym  $I_{\Delta n}$ .

W celu dokonania pomiaru z wykorzystaniem miernika MRP-1 należy ustawić przełącznik obrotowy we właściwym położeniu, wybierając wartość zgodną z wartością prądu  $I_{\Delta n}$  badanego wyłącznika różnicowoprądowego i podłączyć przyrząd do sprawdzanego urządzenia (sieci). Następnie należy nacisnąć przycisk inicjujący pomiar – u góry dla pomiaru napięcia dotykowego oraz czasu wyłączenia RCD lub u dołu dla pomiaru rezystancji obwodu oraz prądu  $I_{\Delta n}$ .

Miernik przyłącza się (rys. 3) do instalacji wyposażonej w gniazdka wtyczkowe poprzez sondę pomiarową zakończoną wtyczką.



RYS. 3. Podłączenie miernika MRP-1 do sieci w celu zbadania wyłącznika RCD [5]

Przed rozpoczęciem pomiaru należy się upewnić, czy przełącznik obrotowy jest we właściwym położeniu, a przewody podłączone są do odpowiednich gniazd pomiarowych.

Pomiary miernikiem MRP-1 należy wykonywać w następujący sposób:

1. Nacisnąć przycisk ON/OFF. Ponowne naciśnięcie przycisku powoduje wyłączenie zasilania.
2. Naciskając przycisk S, wybiera się pomiędzy pomiarem różnicowoprądowym ogólnego typu a pomiarem wyłączników selektywnych.
3. Przyciskiem  $U_L$  wybiera się odpowiednią wartość napięcia bezpiecznego: 25 V lub 50 V. Przełączenie tej wartości sygnalizowane jest sygnałem brzęczyka oraz wyświetloną wartością  $U_L$ .
4. Przyciskiem  $U_B/T_A$  wykonuje się pomiar wartości napięcia dotykowego lub (po drugim wciśnięciu przycisku) czasu zadziałania wyłącznika.
5. Przyciskiem  $R_E/I_A$  wykonuje się pomiar wartości rezystancji obwodu lub (po drugim wciśnięciu przycisku) wartości prądu wywołującej zadziałanie wyłącznika.
6. Elektroda dotykowa służy do szybkiego sprawdzenia przewodu PE w gniazdku. Jeśli różnica potencjałów pomiędzy zaciskiem PE a dotkniętą elektrodą przekracza 50 V, na wyświetlaczu pojawia się napis PE.

### 1.2.1. Pomiar napięcia dotykowego

W celu zmierzenia wartości napięcia dotykowego należy:

1. Wybrać przełącznikiem obrotowym wartość znamionową prądu różnicowego  $I_{AN}$ .
2. Nacisnąć przycisk  $U_B/T_A$  – pomiar trwa ok. 2 sekund.

W przypadku prawidłowego pomiaru na wyświetlaczu zostanie wyświetlona wartość napięcia dotykowego (napięcie dotykowe wskazywane jest do wartości 99 V) odniesiona do prądu znamionowego różnicowego ( $I_{AN}$ ). W praktyce napięcie dotykowe wynosi ok. 1 V. Jeżeli napięcie dotykowe przekroczy ustawioną uprzednio wartość napięcia bezpiecznego  $U_L$ , wówczas pomiar czasu zadziałania zostaje zablokowany.

### 1.2.2. Test wyłączania i pomiar czasu zadziałania wyłącznika ochronnego

Test wyłączania z jednoczesnym pomiarem czasu zadziałania wyłącznika różnicowoprądowego możliwy jest tylko po uprzednim wykonaniu pomiaru napięcia dotykowego. W celu zainicjowania tego pomiaru należy ponownie nacisnąć przycisk  $U_B/T_A$ . Naciśnięcie przycisku  $U_B/T_A$  bezpośrednio po zmianie położenia przełącznika obrotowego lub po naciśnięciu innego przycisku wyzwoli pomiar napięcia dotykowego. Pomiar czasu zadziałania zostaje zablokowany, jeśli wynik pomiaru napięcia dotykowego wykazał przekroczenie ustawionej wartości napięcia bezpiecznego  $U_L$ .

### 1.2.3. Pomiar rezystancji uziemienia

W celu zmierzenia wartości rezystancji uziemienia należy:

1. Wybrać przełącznikiem obrotowym wartość znamionową prądu różnicowego  $I_{\Delta N}$ .
2. Zainicjować pomiar, naciskając przycisk  $R_E/I_A$  – pomiar trwa ok. 2 sekund.

Jeżeli pomiar zostanie wykonany poprawnie, na wyświetlaczu pojawi się wartość rezystancji uziemienia (wyświetlana jest w  $k\Omega$ ). W przypadku, gdy zmierzona wartość rezystancji jest na tyle duża, że przepływ prądu różnicowego równego  $I_{\Delta N}$  spowodowałby powstanie napięcia dotykowego o wartości większej niż wybrana wartość napięcia bezpiecznego  $U_L$ , pomiar prądu zadziałania jest automatycznie blokowany.

### 1.2.4. Pomiar prądu zadziałania wyłącznika

Pomiar prądu zadziałania wyłącznika różnicowoprądowego możliwy jest tylko bezpośrednio po uprzednim wykonaniu pomiaru rezystancji uziemienia, poprzez ponowne naciśnięcie przycisku  $R_E/I_A$ .

## 1.3. Interpretacja wyników

Przedział, w którym powinien znajdować się prąd zadziałania wyłącznika różnicowoprądowego, jest różny w zależności od typu danego wyłącznika. W przypadku najbardziej rozpowszechnionych wyłączników różnicowoprądowych typu AC (prądu przemiennego) prąd zadziałania powinien zawierać się w przedziale  $(0,5-1,0) I_{\Delta N}$ .

## 2. Cel i zakres ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z budową i zasadą działania wyłącznika przeciwporażeniowego różnicowoprądowego oraz poznanie zasady działania i zakresu stosowania mierników zabezpieczeń różnicowoprądowych. W czasie ćwiczenia należy sprawdzić (analizując otrzymane w wyniku pomiarów wartości), czy badane wyłączniki różnicowoprądowe spełniają odpowiednie normy i czy mogą być dopuszczone do eksploatacji.

### 3. Program badań

W czasie ćwiczenia należy:

1. Zapoznać się z budową i instrukcją obsługi wskazanych przez prowadzącego mierników.
2. Wykonać oględziny oraz próby dla wskazanych przez prowadzącego wyłączników różnicowoprądowych.
3. Sporządzić protokoły z badań.
4. Ocenic, czy badane wyłączniki różnicowoprądowe mogą być dopuszczone do eksploatacji.

### 4. Sprawozdanie studenckie

Sprawozdanie z ćwiczenia powinno zawierać:

1. Wyniki badań zestawione w tabelach.
2. Wnioski wynikające z porównania wyników sprawdzeń badanych wyłączników różnicowoprądowych z uwzględnieniem:
  - zalet i wad oraz zakresu stosowania badanych wyłączników różnicowoprądowych,
  - oceny skuteczności ochrony przeciwporażeniowej w instalacjach zabezpieczonych badanymi wyłącznikami różnicowoprądowymi.
3. Protokoły ze sprawdzeń badanych urządzeń różnicowoprądowych zgodne z PN-HD 60364-6 [6].

### Literatura

1. Lejdy B., Sulkowski M., *Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych*, WNT, Warszawa 2019.
2. Markiewicz H., *Instalacje elektryczne*, WNT, Warszawa 2018.
3. Markiewicz H., *Bezpieczeństwo w elektroenergetyce*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2024.
4. Markiewicz H., *Urządzenia elektroenergetyczne*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2016.
5. Instrukcje do mierników firmy Sonel.
6. PN-HD 60364-6: 2008 *Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 6: Sprawdzenie*.

# Ćwiczenie nr 9

## BADANIA SKUTECZNOŚCI OCHRONY PRZECIWPORAŻENIOWEJ W INSTALACJACH ELEKTRYCZNYCH NISKIEGO NAPIĘCIA

### 1. Wiadomości wstępne

Praca przy urządzeniach elektroenergetycznych może być przyczyną wystąpienia nie-szczęśliwego wypadku spowodowanego bezpośrednim lub pośrednim oddziaływaniem prądu elektrycznego na organizm ludzki. Do podstawowych przyczyn porażen prądem elektrycznym należą [3]:

- wadliwa budowa urządzeń,
- uszkodzona izolacja lub obudowa urządzenia,
- nieprzestrzeganie przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy.

Skutki porażenia prądem elektrycznym zależą głównie od [2]:

- natężenia prądu przepływającego przez ciało człowieka;
- czasu, w którym prąd rażeniowy przepływa przez organizm ludzki;
- rezystancji ciała człowieka oraz rezystancji przejścia (np. obuwia, ubrania);
- drogi przepływu prądu w organizmie (np. ręka–ręka, ręka–nogi).

Rozróżnia się dwa rodzaje środków ochrony przeciwporażeniowej: ochrona przed dotykiem bezpośrednim (ochrona podstawowa) i ochrona przed dotykiem pośrednim (ochrona przy uszkodzeniu) [1].

**Ochrona przed dotykiem bezpośrednim** (ochrona przeciwporażeniowa podstawowa) ma na celu wyeliminowanie lub ograniczenie prawdopodobieństwa bezpośredniego dotyku przez człowieka lub zwierzę części czynnych (części znajdujących się w czasie normalnej pracy urządzeń elektrycznych pod napięciem) instalacji elektrycznych i odbiorników. Ochrona ta realizowana jest poprzez [2, 3, 4]:

- izolowanie części czynnych urządzeń elektrycznych,

- umieszczenie części czynnych urządzeń elektrycznych i elementów instalacji poza zasięgiem ręki,
- użycie ogrodzenia lub obudowy,
- zastosowanie barier i przeszkód uniemożliwiających dotknięcie części czynnych,
- zastosowanie bezpiecznego napięcia.

**Ochrona przy uszkodzeniu** (przed dotykiem pośrednim) ma na celu zapobieganie niebezpiecznym skutkom dotknięcia części przewodzących dostępnych w przypadku pojawienia się na nich napięcia (w warunkach zakłóceń).

Ochrona przy uszkodzeniu realizowana jest poprzez zastosowanie [1, 2, 3, 4]:

1. Urządzeń o II klasie ochronności – zastosowanie izolacji urządzeń o takich parametrach technicznych, aby ograniczała do minimum możliwość porażenia prądem elektrycznym.
2. Izolacji stanowiska – izolowanie stanowiska od ziemi i wyrównanie potencjałów części przewodzących obcych dostępnych z danego stanowiska.
3. Nieuziemionych połączeń wyrównawczych – połączeń elektrycznych, które zapobiegają występowaniu różnic potencjałów pomiędzy jednocześnie dostępnymi częściami przewodzącymi. Połączenia te łączą wszystkie występujące elementy przewodzące.
4. Separacji elektrycznej – rozdzielenie (np. przy użyciu transformatora separacyjnego) obwodu zasilającego i obwodu odbiorczego tak, aby w razie uszkodzenia izolacji podstawowej w obwodzie separowanym nie wystąpiły warunki grożące porażeniem elektrycznym.
5. Samoczynnego wyłączenia zasilania – połączenie części przewodzących dostępnych (nieznajdujących się w warunkach normalnej pracy pod napięciem, lecz na których może pojawić się napięcie w wyniku uszkodzenia) z uziemionym przewodem ochronnym PE (lub przewodem ochronno-neutralnym PEN) i spowodowanie (w warunkach zakłóceń) samoczynnego wyłączenia zasilania. Urządzenie zabezpieczające (wyłączające) powinno działać w taki sposób, aby w przypadku zwarcia między częścią czynną a częścią przewodzącą dostępną napięcie na części przewodzącej dostępnej zostało wyłączone w czasie niepowodującym u człowieka niebezpiecznych skutków patofizjologicznych lub nie przekroczyło wartości napięcia bezpiecznego dopuszczalnego długotrwale  $U_L$ . W tab. 1 podane zostały wartości granicznych dopuszczalnych czasów wyłączania w sieciach typu TN. W pewnych okolicznościach dopuszcza się, aby czas wyłączenia był dłuższy niż podany w tab. 1, jednak nie może przekraczać 5 sekund.

Ochrona przez zastosowanie samoczynnego wyłączenia zasilania jest realizowana poprzez:

- urządzenia ochronne przetężeniowe (wyłączniki z wyzwalaczami nadprądowymi lub przekątnikami nadprądowymi, bezpieczniki z wkładkami topikowymi),
- urządzenia ochronne różnicowoprądowe.

TAB. 1. Najdłuższe dopuszczalne czasy wyłączania zasilania w sieciach typu TN [1]

| Napięcie znamionowe względem ziemi $U_0$<br>[V] | Czasy wyłączania [s] |     |
|-------------------------------------------------|----------------------|-----|
|                                                 | AC                   | DC  |
| od 50 do 120                                    | 0,8                  | –   |
| powyżej 120 do 230                              | 0,4                  | 5   |
| powyżej 230 do 400                              | 0,2                  | 0,4 |
| powyżej 400                                     | 0,1                  | 0,1 |

Urządzenia różnicowoprądowe można stosować we wszystkich układach sieci z wyjątkiem układu TN-C. Jeżeli znamionowy prąd różnicowy urządzenia nie jest większy niż 500 mA, to spełnia ono także funkcję zabezpieczenia przeciwpożarowego.

Sprawdzenie warunku samoczynnego wyłączenia zasilania należy przeprowadzić według wzoru [1, 2]:

$$Z_s \cdot I_a < U_0 \quad (1)$$

w którym:

$Z_s$  – impedancja pętli zwarciowej obejmującej źródło zasilania, przewód roboczy aż do punktu zwarcia i przewód ochronny między punktem zwarcia a źródłem;

$I_a$  – prąd powodujący samoczynne zadziałanie urządzenia wyłączającego;

$U_0$  – napięcie znamionowe względem ziemi.

Wartość prądu  $I_a$  wyznacza się na podstawie charakterystyk czasowo-prądowych zabezpieczeń nadprądowych lub wartości współczynników  $k$  przyjętych dla danych zabezpieczeń. Wówczas:

$$I_a = k \cdot I_n \quad (2)$$

gdzie:

$I_n$  – wartość znamionowa prądu urządzenia zabezpieczającego [A],

$k$  – krotność prądu znamionowego powodująca zadziałanie urządzenia zabezpieczającego w określonym czasie [3]:

$k = 5$  dla charakterystyki B;

$k = 10$  dla charakterystyki C;

$k = 20$  dla charakterystyki D;

$k = 1$  dla wyłączników różnicowoprądowych typu AC;

$k = 1,4$  dla wyłączników różnicowoprądowych typu A;

$k = 2$  dla wyłączników różnicowoprądowych typu B.

Jeżeli do wyłączenia zasilania zastosowano urządzenia ochronne różnicowoprądowe o znamionowym prądzie różnicowym  $I_{\Delta n} < 500$  mA, to zazwyczaj pomiar impedancji pętli zwarciowej nie jest konieczny [1]. Alternatywnie wystarczające jest wówczas

sprawdzenie ciągłości elektrycznej żył przewodów ochronnych, jeżeli są dostępne obliczenia impedancji pętli zwarcia lub rezystancji przewodów ochronnych, a sposób wykonania instalacji umożliwia sprawdzenie długości i przekroju przewodów. Spełnienie wymagań można również sprawdzić, mierząc rezystancję przewodów ochronnych.

## 1.1. Pomiar impedancji pętli zwarcia

### 1.1.1. Pomiar impedancji pętli zwarcia miernikiem MZW-5

Miernik MZW-5 (rys. 1) służy do badania skuteczności ochrony przeciwporażeniowej w sieciach o napięciu 230/400 V mających bezpośrednio uziemiony punkt neutralny.



RYS. 1. Widok płyty czołowej miernika WZW-5

Miernik MZW-5 pozwala:

- zmierzyć wartość napięcia roboczego sieci względem ziemi,
- sprawdzić ciągłość obwodu pętli zwarcia,
- zmierzyć wartość impedancji pętli zwarcia.

Wartość impedancji pętli zwarcia wyznacza się na podstawie pomiaru wartości napięcia  $U_1$  pomiędzy przewodem skrajnym a dostępną częścią przewodzącą (bez sztucznego zwarcia) oraz napięcia  $U_2$  pomiędzy tymi punktami w czasie sztucznego zwarcia.

Pomiar wartości impedancji pętli zwarcia miernikiem MZW-5 wykonuje się w następujący sposób:

1. Jeden zacisk pomiarowy przyrządu (oznaczony „F”) należy połączyć z przewodem fazowym obwodu zasilającego badane urządzenie, a drugi zacisk (oznaczony „50 A” lub „100 A”) z częścią przewodzącą dostępną badanego urządzenia.

Zacisk 50 A wykorzystuje się, gdy prąd znamionowy zabezpieczenia (wyłącznika nadprądowego, bezpiecznika) chroniącego badany obwód/urządzenie jest nie większy niż 10 A. W pozostałych przypadkach należy wykorzystać zacisk 100 A.

2. Dokonać pomiaru wartości napięcia fazowego  $U_1$ , ustawiając łącznik POMIAR w pozycji  $U_1$ .
3. Dokonać kontroli ciągłości badanego obwodu przez ustawienie przełącznika POMIAR w pozycji „K”. Woltomierz powinien wskazywać napięcie równe napięciu fazowemu sieci  $U_1$ . Gdy wskazanie woltomierza jest mniejsze o nie mniej niż 5% od wartości napięcia  $U_1$ , dalszych pomiarów nie wolno wykonywać.
4. Ustawić przełącznik POMIAR w pozycji  $U_2$  – wskazówka woltomierza powinna wskazywać zero. Gdy wskazówka woltomierza nie znajduje się w tej pozycji, należy wyzerować miernik poprzez krótkotrwałe naciśnięcie przycisku KASOWANIE.
5. Nacisnąć przycisk ZWARCIE i odczytać wartość napięcia  $U_2$  przy maksymalnym wychyleniu wskazówki woltomierza.
6. Pomiary powtórzyć trzykrotnie.
7. Na podstawie pomiarów  $U_1$  i  $U_2$  obliczyć wartość impedancji pętli zwarcia odpowiednio do wartości prądu zwarcowego (100 A lub 50 A):

$$Z_p(50 \text{ A}) = K_1(U_1/U_2 - 1) \quad (3)$$

$$Z_p(100 \text{ A}) = K_2(U_1/U_2 - 1) \quad (4)$$

Wartości  $K_1$  i  $K_2$  podane są na tylnej płycie miernika.

### 1.1.2. Pomiary impedancji pętli zwarcia miernikiem MZC-1

Przyrząd MZC-1 (rys. 2) jest przeznaczony do badania kontrolnego ochrony przeciwporażeniowej w sieciach typu TN i TT.



RYC. 2. Widok miernika MZC-1

W środkowej części miernika znajduje się wyświetlacz umożliwiający cyfrowy odczyt wartości mierzonego napięcia oraz oporu pętli zwarciowej badanego obwodu. Obok wyświetlacza umieszczona jest neonowa lampka, której zadaniem jest sygnalizowanie obecności napięcia na wejściu przyrządu (ciągłość obwodu). Poniżej wyświetlacza znajduje się łącznik służący do załączenia i wyłączenia zasilania przyrządu (bateria zasilająca znajduje się w rękojeści przyrządu). Obok łącznika umieszczono przycisk służący do inicjowania pomiaru wartości rezystancji pętli zwarciowej.

Miernik MZC-1 umożliwia wykonanie pomiarów:

- napięć fazowych i międzyprzewodowych sieci,
- rezystancji pętli zwarcia,
- rezystancji uziemienia.

Pomiar wartości rezystancji pętli zwarcia w instalacjach elektrycznych wykonuje się miernikiem MZC-1, zachowując następujący ciąg czynności:

1. Jeden przewód przyłączeniowy przyrządu należy połączyć z częścią przewodzącą dostępną badanego urządzenia, a drugi przewód połączyć z przewodem fazowym obwodu zasilającego badane urządzenie.
2. Świecenie neonówki świadczy o ciągłości pętli zwarciowej i upoważnia do wykonania dalszych czynności pomiarowych.
3. Należy włączyć zasilanie przyrządu, wciskając przełącznik zasilający. Przyrząd powinien wskazać wartość napięcia roboczego sieci  $U_1$ .
4. Należy wykonać sztuczne zwarcie poprzez naciśnięcie przycisku zwarciowego. Odczytać zmierzoną wartość rezystancji pętli zwarciowej  $R_p$  – wartość ta wyświetlana jest przez przyrząd przez ok. 4 sekundy, po czym następuje ponowny pomiar wartości napięcia zasilającego.
5. Gdy przyrząd powróci do wskazywania wartości napięcia sieci  $U_1$ , możliwe jest wykonanie powtórnego pomiaru wartości rezystancji pętli zwarcia.
6. Pomiar należy powtórzyć trzykrotnie.

### 1.1.3. Pomiar rezystancji pętli zwarcia miernikiem MZC-2

Miernik MZC-2 (rys. 3) służy do kontrolnych badań samoczynnego wyłączenia zasilania w sieciach elektroenergetycznych typu TN i TT.



RYŚ. 3. Widok miernika MZC-2

Miernik MZC-2 umożliwia dokonanie pomiarów [5]:

- napięć fazowych i międzyprzewodowych sieci,
- rezystancji pętli zwarciowej,
- rezystancji uziemienia.

Pomiar impedancji pętli zwarciowej miernikiem MZW-5 wykonuje się w następujący sposób:

1. Przewody miernika należy połączyć z chronioną obudową badanego urządzenia oraz z przewodem fazowym tegoż urządzenia zgodnie z oznaczeniami podanymi na płycie czołowej miernika.
2. Włączyć zasilanie bateryjne przyrządu, wciskając przycisk ON. Poczekać na pojawienie się na wyświetlaczu wartości zmierzonego napięcia fazowego sieci.
3. Wykonać sztuczne zwarcie poprzez naciśnięcie przycisku pomiarowego wybranego zakresu i odczytać zmierzoną wartość rezystancji pętli zwarcia.
4. Wykonanie powtórnego pomiaru jest możliwe, gdy przyrząd ponownie zacznie wskazywać napięcie sieci.
5. Pomiar należy powtórzyć trzykrotnie.

## 1.2. Przykładowy protokół z badań skuteczności ochrony przeciwporażeniowej

PROTOKÓŁ nr ...

### BADANIA SKUTECZNOŚCI OCHRONY PRZECIWPORAŻENIOWEJ URZĄDZEŃ ORAZ INSTALACJI ELEKTRYCZNEJ

1. *Zlecniodawca:*
2. *Obiekt badań:*
3. *Data badania:*
4. *Rodzaj zasilania:*
5. *Przyrządy pomiarowe:*
6. *Wynik oględzin – pozytywny/negatywny\*.*

*Wyniki badań*

| Lp. | Osprzęt elektroinstalacyjny<br>(nr, typ gniazda, oprawy,<br>urządzenia) | Typ<br>zabezpie-<br>czenia | $I_n$ zabezp. | $I_a$ | $U_o$ | $Z_s$ | $Z_s \cdot I_a$ | Ochrona<br>skuteczna |
|-----|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------|---------------|-------|-------|-------|-----------------|----------------------|
|     |                                                                         |                            | [A]           | [A]   | [V]   | [W]   | [V]             |                      |
|     |                                                                         |                            |               |       |       |       |                 |                      |
|     |                                                                         |                            |               |       |       |       |                 |                      |
|     |                                                                         |                            |               |       |       |       |                 |                      |

7. *Ocena wyników badań.*

Badana instalacja/urządzenie\* posiada zapewnioną/niezapewnioną\* ochronę przeciwporażeniową poprzez samoczynne wyłączenie zasilania.

**Uwagi:**

8. *Termin następnych badań:*

Badania wykonali (*imię, nazwisko, nr uprawnień*):

## 2. Cel i zakres ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z wymaganiami stawianymi ochronie przeciwporażeniowej realizowanej poprzez samoczynne wyłączenia zasilania oraz z zasadą działania i zakresem stosowania podstawowych mierników wykorzystywanych do badania tego środka ochrony. Zakres ćwiczenia obejmuje wykonanie kontroli skuteczności działania ochrony przeciwporażeniowej poprzez samoczynne wyłączenie zasilania wybranych urządzeń elektrycznych niskiego napięcia.

## 3. Program badań

W czasie ćwiczenia należy:

1. Zapoznać się z budową i instrukcją obsługi wskazanych przez prowadzącego mierników.
2. Wykonać pomiary impedancji (rezystancji) pętli zwarciowej przy wykorzystaniu mierników wskazanych przez prowadzącego – należy je wykonać dla wskazanych przez prowadzącego gniazd wtyczkowych oraz dla silnika trójfazowego (między wybranymi elementami silnika a poszczególnymi zaciskami zasilającymi).
3. Ocenić skuteczność ochrony przeciwporażeniowej badanych urządzeń.
4. Sporządzić protokoły z przeprowadzonych badań.

## 4. Sprawozdanie studenckie

Sprawozdanie studenckie powinno zawierać:

1. Cel ćwiczenia.
2. Schematy połączonych w trakcie ćwiczenia układów badawczych.
3. Tabele wyników.

4. Uwagi i wnioski końcowe, a w szczególności:
  - ocenę skuteczności ochrony przeciwporażeniowej badanych urządzeń elektrycznych – jeżeli jakieś urządzenie nie spełnia warunku samoczynnego wyłączenia zasilania, należy podać, co zmienić w badanym układzie, aby warunek został spełniony;
  - subiektywną ocenę stosowanych do pomiarów wartości impedancji pętli zwarciowej mierników.

## Literatura

1. PN-HD 60364-4-41:2017-09 *Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 4-41: Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa – Ochrona przed porażeniem elektrycznym*.
2. Lejdy B., Sulkowski M., *Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych*, WNT, Warszawa 2019.
3. Markiewicz H., *Instalacje elektryczne*, WNT, Warszawa 2018.
4. Markiewicz H., *Bezpieczeństwo w elektroenergetyce*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2024.
5. Instrukcje obsługi mierników firmy Sonel.

# Ćwiczenie nr 10

## BADANIE WYŁĄCZNIKÓW SAMOCZYNNYCH NISKIEGO NAPIĘCIA

### 1. Wiadomości wstępne

#### 1.1. Ogólna charakterystyka wyłączników niskiego napięcia

Nowoczesną formą konstrukcyjną łączników niskiego napięcia są wyłączniki kompaktowe, przerywające samoczynnie obwód w momencie zakłócenia (np. zwarcia, przeciążenia, obniżenia albo zaniku napięcia). Powinny one zapewnić dużą wytrzymałość zwarciovą przy wysokiej częstotliwości łączeń. Wyłączniki samoczynne niskonapięciowe produkowane są wyłącznie jako suche.

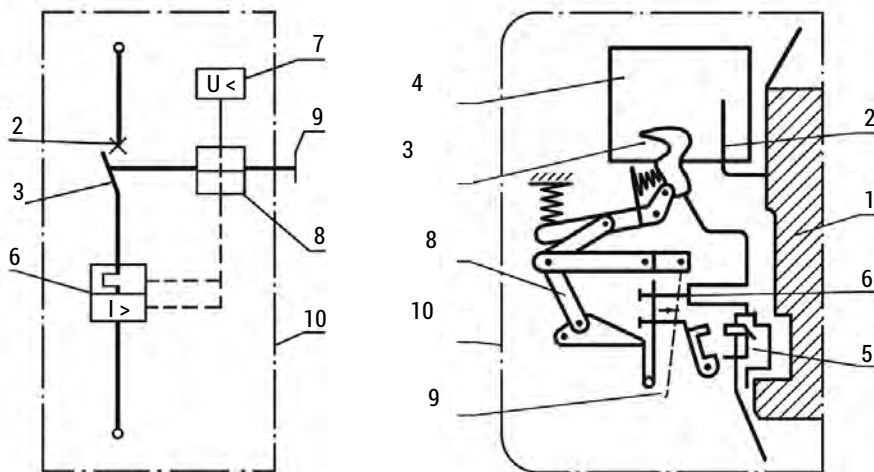
Podstawowe elementy funkcjonalne wyłącznika [1, 2]:

- układ zestyków głównych i pomocniczych (złożony ze styków stałych i ruchomych),
- komora gasząca,
- zamek,
- urządzenia wyzwajające,
- napęd,
- obudowa wraz z zaciskami przyłączeniowymi.

Układ połączeń przedstawiający podstawowe elementy składowe oraz szkic budowy wyłączników samoczynnych niskiego napięcia przedstawiony został na rys. 1.

Jednym z elementów wyłącznika jest zamek, który powoduje, że po zamknięciu się styków wyłącznika układ napędowy zostaje zaryglowany i zmiana wartości siły docisku styków ruchomych (np. w wyniku przerywania prądu w obwodzie cewki elektromagnesu napędowego) nie powoduje ich rozwarcia się. Zwolnienie zapadki zamka wyłącznika zamkniętego powoduje otwarcie jego styków głównych. Podobnie, gdyby zapadka zamka została zwolniona w trakcie zamykania wyłącznika, styki główne rozewrą się niezależnie od ruchu dźwigni napędowej. W związku z tym, jeżeli w trakcie

załączania wyłącznika okaże się, że w załączonym obwodzie występuje np. zwarcie, to styki ruchome powrócą – dzięki swobodnemu sprzęgłowi – do położenia spoczynkowego nawet wówczas, gdy układ napędowy nadal działa w kierunku zamknięcia styków wyłącznika. Zwolnienie zapadki zamka następuje w wyniku zadziałania różnego rodzaju wyzwalaczy lub przekaźników (w zależności od typu wyłącznika mogą to być wyzwalacze nadprądowe, nadnapięciowe, zanikowe, różnicowoprądowe itp.), dzięki którym wyłącznik samoczynnie wyłącza obwód w razie przetężenia, odwrócenia kierunku przepływu energii, nadmiernego obniżenia napięcia lub innego stanu zakłóceniewego.



RYS. 1. Układ połączeń podstawowych elementów oraz szkic budowy wyłączników samoczynnych [3]: 1 – podstawa; 2, 3 – styki nieruchomy i ruchomy; 4 – komora gaszeniowa; 5 – wyzwalacz nadprądowy elektromagnetyczny; 6 – wyzwalacz cieplny; 7 – cewka podnapięciowa; 8 – zamek; 9 – dźwignia napędu; 10 – obudowa wyłącznika.

## 1.2. Podział wyłączników niskiego napięcia

Wyłączniki niskonapięciowe można podzielić na trzy grupy różniące się znamionowym prądem ciągłym, prądem wyłączalnym oraz wyposażeniem [3]:

- wyłączniki instalacyjne,
- wyłączniki sieciowe,
- wyłączniki stacyjne.

Wyłączniki instalacyjne produkowane są z przeznaczeniem do instalacji domowych oraz do obwodów silnikowych. Mają one wyłącznie napęd ręczny i budowane są na prąd znamionowy ciągły do 63 A i prąd wyłączalny (w zależności od typu) od 3 do 10 kA. Wyłączniki silnikowe posiadają nastawialne wyzwalacze przeciążeniowe oraz mogą być wyposażone w wyzwalacze napięciowe.

Wyłączniki sieciowe produkowane są na prądy znamionowe do 630 A i mają przeważnie konstrukcję tzw. kompaktową (zwartą, o niedużych wymiarach) o mocnej, izolacyjnej obudowie. Są przystosowane do instalowania w niedużych rozdzielnicach. Małe wymiary, duże bezpieczeństwo obsługi oraz brak wymagań dotyczących konserwacji powodują, że łączniki te znajdują szerokie zastosowanie jako wyłączniki odpływowe. Ze względu na budowę ich komór gaszeniowych mogą wyłączać prądy zwarciovowe do 35 kA, a przy zastosowaniu ograniczników prądu zwarciovego – nawet powyżej 35 kA. Mają one na ogół nieregulowane wyzwalacze przeciążeniowe i zwarciovowe. Mogą być wyposażone w zestyki pomocnicze oraz wyzwalacze napięciowe: wyzwalacz podnapięciowy i/lub wyzwalacz napięciowy wzrostowy.

Wyłączniki stacyjne przeznaczone są do instalowania w stacjach transformatorowo-rozdzielczych i rozdzielnicach dużej mocy, czyli w miejscach, gdzie występują największe prądy robocze i zwarciovowe. Wyłączniki stacyjne mają prąd znamionowy ciągły mieszczący się w granicach od 400 do 4000 A i prąd wyłączalny w zakresie 20–80 kA. Oprócz napędu ręcznego mogą posiadać one napęd maszynowy – zwykle silnikowy, dzięki czemu można je załączać zdalnie.

Do podstawowych parametrów wyłączników należą [1]:

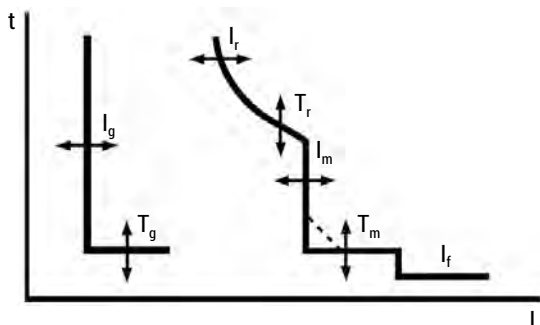
- umowny prąd niezadziałania – największa wartość skuteczna prądu, który może przepływać przez wyłącznik w określonym (umownym) czasie, nie powodując jego zadziałania;
- umowny prąd zadziałania – najmniejsza wartość prądu, który przepływając przez wyłącznik, spowoduje jego zadziałanie przed upływem określonego (umownego) czasu;
- prąd zadziałania bezzwłocznego – najmniejsza wartość prądu, który powoduje bezzwłoczne działanie wyłącznika.

### 1.3. Ogólna charakterystyka wyłączników

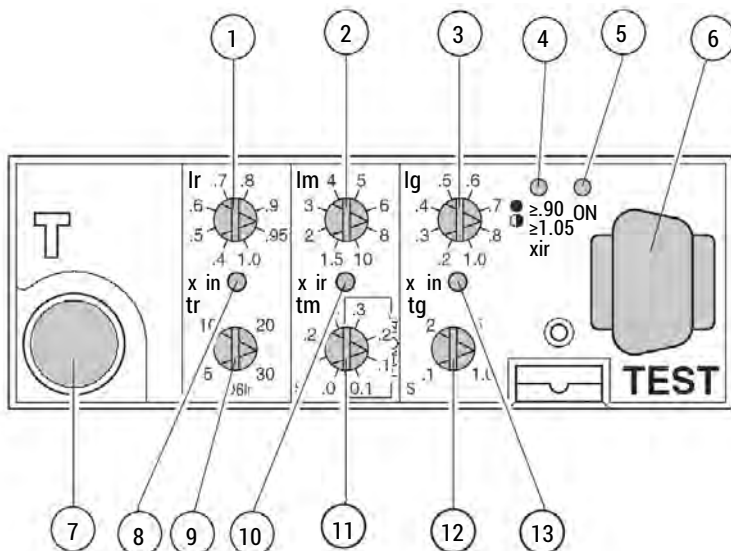
#### Legrand DPX 630 Sg 160A E oraz Merlin Gerin Compact NSA 160E

Wyłączniki DPX 630 Sg 160A E oraz NSA 160E służą do zabezpieczania instalacji i sieci rozdzielczych niskiego napięcia oraz urządzeń elektrycznych przed skutkami przeciążeń i zwarc. Ich izolacyjna obudowa chroni przed wydmuchem gazów powstających w czasie wyłączania bezpośrednio na zewnątrz wyłącznika. Przeznaczone są do łączenia prądów roboczych i zakłóceńowych (przeciążeniowych, zwarciovych) oraz do stworzenia bezpiecznej przerwy izolacyjnej w sieciach prądu przemiennego o napięciu do 690 V w przypadku DPX 630 Sg 160 A oraz 500 V w przypadku NSA 160E. Prąd znamionowy wyłącznika DPX 630 wynosi 160 A, natomiast wyłącznika NSA 160E 16 A.

Wyłącznik DPX 630 umożliwia regulację swojej charakterystyki czasowo-prądowej poprzez regulację nastaw umieszczonych na jego płycie czołowej. Widok płyty czołowej oraz zakres regulacji charakterystyki nastaw prądów przedstawiono na rys. 2, panel regulacji nastaw tego wyłącznika na rys. 3, a charakterystykę prądu ograniczonego na rys. 4.

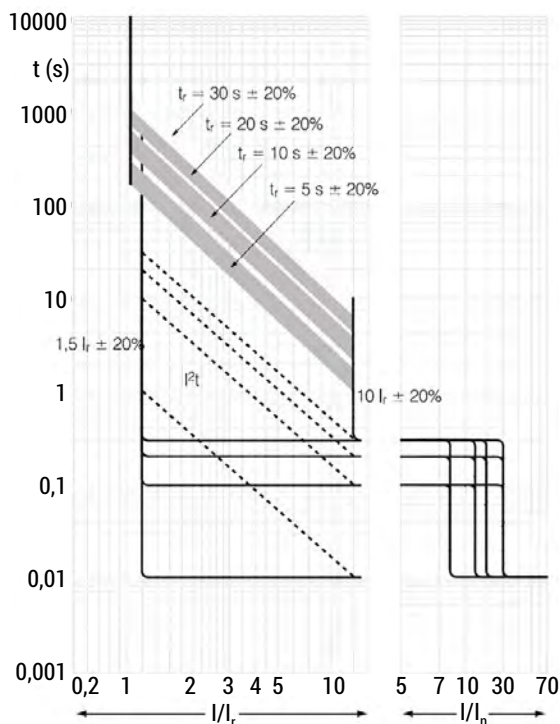


RYS. 2. Regulacja nastaw prądów  $I_r$ ,  $T_r$ ,  $I_m$ ,  $T_m$ ,  $I_g$ ,  $T_g$  [5]:  $I_r$  – prąd zabezpieczenia przeciążeniowego zwłocznego ( $0,4 \times I_n$ ;  $0,5 \times I_n$ ;  $0,6 \times I_n$ ;  $0,7 \times I_n$ ;  $0,8 \times I_n$ ;  $0,9 \times I_n$ ;  $0,95 \times I_n$ ;  $1 \times I_n$ );  $T_r$  – czas wyzwolenia wyzwalacza przeciążeniowego zwłocznego (5 s; 10 s; 20 s; 30 s – regulacja dotyczy punktu charakterystyki odpowiadającego  $6 \times I_r$ );  $I_m$  – prąd zabezpieczenia zwarciovego zwłocznego ( $1,5 \times I_r$ ;  $2 \times I_r$ ;  $3 \times I_r$ ;  $4 \times I_r$ ;  $5 \times I_r$ ;  $6 \times I_r$ ;  $8 \times I_r$ ;  $10 \times I_r$ );  $T_m$  – czas wyzwolenia wyzwalacza zwarciovego zwłocznego (dla  $I^2t$  zmiennego:  $t_{m1} = 0,0$  s;  $0,1$  s;  $0,2$  s;  $0,3$  s; oraz dla  $I^2t$  stałego:  $t_{m2} = 0,01$  s;  $0,1$  s;  $0,2$  s;  $0,3$  s);  $I_g$  – prąd zabezpieczenia różnicowoprądowego ( $0,2 \times I_n$ ;  $0,3 \times I_n$ ;  $0,4 \times I_n$ ;  $0,5 \times I_n$ ;  $0,6 \times I_n$ ;  $0,7 \times I_n$ ;  $0,8 \times I_n$ ;  $1 \times I_n$ );  $T_g$  – zwłoka czasowa wyzwalacza różnicowoprądowego (0,1 s; 0,2 s; 0,5 s; 1 s);  $I_f$  – prąd zabezpieczenia zwarciovego bezwłocznego (wartość stała wynosząca 5 kA)



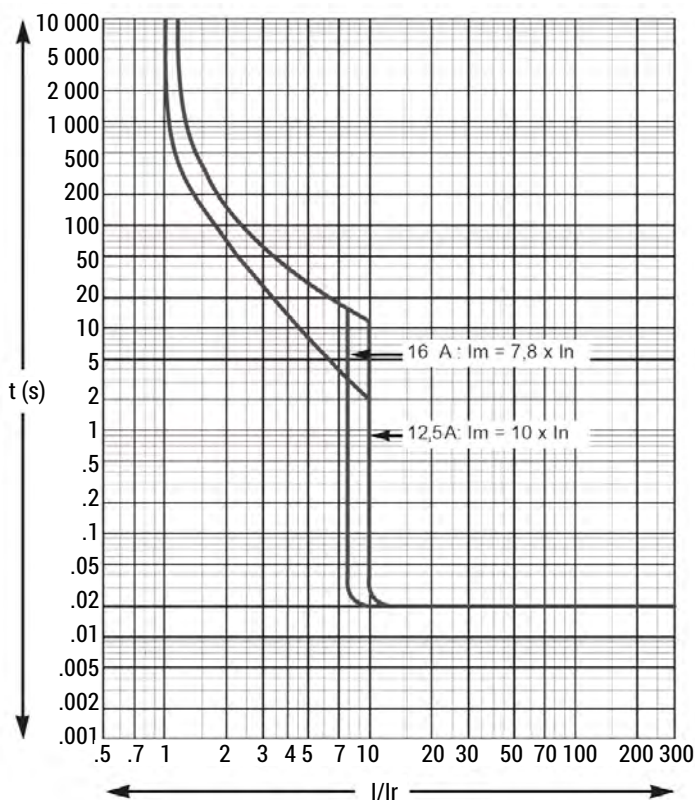
RYS. 3. Panel regulacji nastaw wyłącznika DPX 630 [5]: 1 – pokrętło ustawienia prądu zabezpieczenia przeciążeniowego zwłocznego; 2 – pokrętło ustawienia prądu zabezpieczenia zwarciovego zwłocznego; 3 – pokrętło ustawienia prądu zabezpieczenia różnicowoprądowego; 4 – wskaźnik

koloru czerwonego ostrzegający świeceniem przy  $I \geq 0,9 I_r$  oraz pulsowaniem przy  $I \geq 1,05 I_r$ ; 5 – wskaźnik koloru zielonego sygnalizujący pracę normalną, włączający się przy  $I \geq 0,2 I_n$ ; 6 – złącze testera elektronicznego; 7 – przycisk testu mechanicznego; 8, 10, 13 – wskaźniki koloru czerwonego sygnalizujące zadziałanie wyzwalacza (działają tylko przy podłączeniu dodatkowego zasilania 12 V dc); 9 – pokrętło ustawienia czasu wyzwolenia wyzwalacza przeciążeniowego zwłocznego; 11 – pokrętło ustawienia czasu wyzwolenia wyzwalacza zwarciowego zwłocznego; 12 – pokrętło ustawienia zwłoki czasowej wyzwalacza różnicowoprądowego (przy zainstalowaniu tego wyzwalacza – najczęściej jest w wyposażeniu dodatkowym)



RYS. 4. Charakterystyka prądu ograniczonego wyłącznika DPX 630 [5]

Wyłącznik NSA 130E nie posiada możliwości regulacji charakterystyki czasowo-prądowej – charakterystyka ta przedstawiona jest na rys. 5.



RYS. 5. Charakterystyka czasowo-prądowa wyłącznika NSA 160E [4]

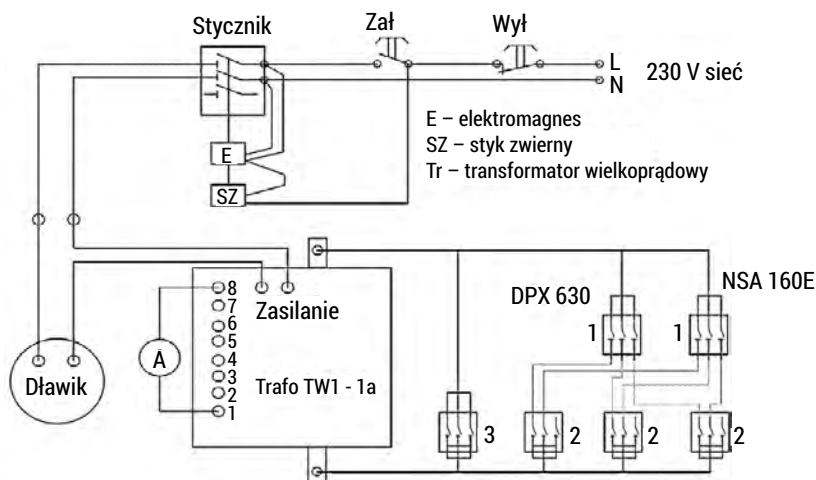
## 2. Cel i zakres ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z budową oraz zasadą działania wyłączników samoczynnych niskiego napięcia. Zakres ćwiczenia obejmuje poznanie sposobów wyznaczania oraz regulacji charakterystyk czasowo-prądowych badanych wyłączników samoczynnych niskiego napięcia.

### 3. Program badań

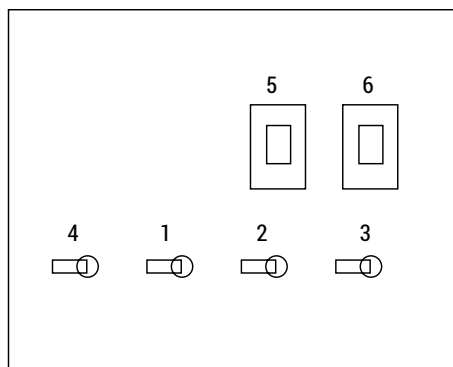
#### 3.1. Opis stanowiska badawczego

Do wyznaczenia charakterystyk czasowo-prądowych wykorzystywany jest układ pomiarowy przedstawiony na rys. 6.

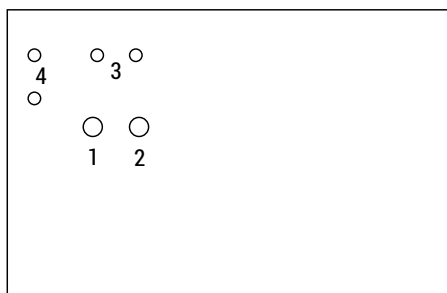


RYS. 6. Układ do wyznaczania charakterystyk czasowo-prądowych wyłączników niskiego napięcia: 1 – badane wyłączniki; 2, 3 – rozłączniki sterujące

Dla zachowania bezpieczeństwa wszystkie niezbędne do wykonania pomiarów zaciski układu badawczego (rys. 6) zostały przeniesione na płytę czołową oraz blat główny stanowiska. Ich rozmieszczenie pokazano na rys. 7 i 8. Rozłącznik nr 4 (rys. 7) służy do załączenia obwodu umożliwiającego nastawienie wartości prądu, jaki będzie płynął przez badany wyłącznik. Rozłączniki 1, 2 i 3 służą do wybrania fazy wyłącznika, która ma być badana.



RYS. 7. Schemat rozmieszczenia urządzeń na płycie czołowej stanowiska: 1, 2, 3, 4 – rozłączniki; 5 – wyłącznik DPX 630; 6 – wyłącznik NSA 160E

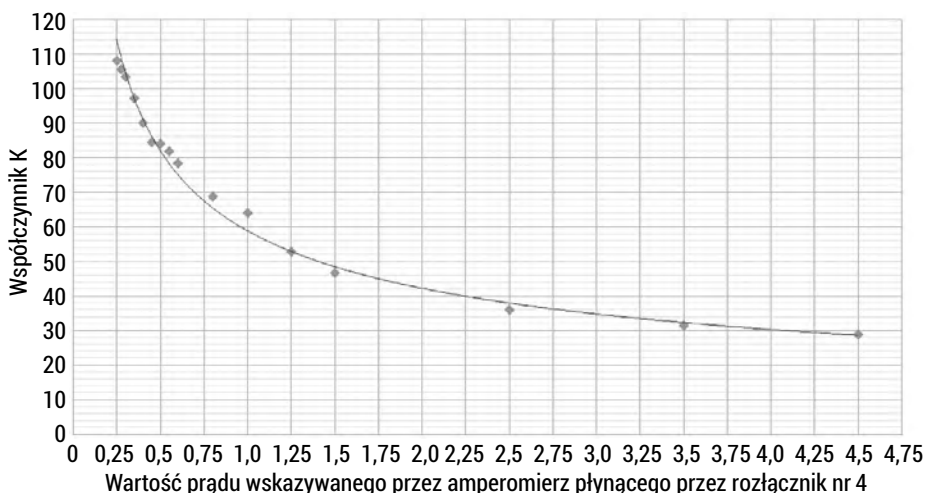


RYS. 8. Schemat rozmieszczenia zacisków oraz przycisków na blacie głównym stanowiska: 1 – przycisk ZAŁĄCZ; 2 – przycisk WYŁĄCZ; 3 – zaciski przyłączeniowe amperomierza pomiarowego; 4 – zaciski przyłączeniowe dławika regulacyjnego

Przed przystąpieniem do pomiarów należy podłączyć amperomierz do zacisków nr 3 (rys. 8) oraz ustawić jego zakres na maksimum; podłączyć dławik do zacisków nr 4 (rys. 8) oraz sprawdzić wartość indukcyjności – powinna być nastawiona na minimum.

### UWAGA!

Ze względu na różnice w wartościach rezystancji poszczególnych obwodów oraz z uwagi na przekładnię zainstalowanego w układzie przekładnika prądowego rzeczywisty prąd płynący przez wyłącznik DPX 630 jest 20 razy większy niż wartość prądu nastawiona w obwodzie obejściowym (zamknięty rozłącznik 4 – rys. 7; łączniki 1, 2, 3 są otwarte). W przypadku wyłącznika NSA 160E, ze względu na występowanie nieprostoliniowej zależności pomiędzy prądem rzeczywistym płynącym przez wyłącznik a wartością prądu nastawianą przy pomocy rozłącznika nr 4, wartość prądu nastawioną w obwodzie obejściowym należy przemnożyć przez wartość współczynnika  $K$  odczytanego z wykresu na rys. 9. Współczynnik  $K$  uwzględnia przekładnię pomiarową przekładnika prądowego wbudowanego w transformator wielkoprądowy.



RYS. 9. Wykres zależności prądu płynącego przez rozłącznik nr 4 oraz współczynnika  $K$

Sprawdzenie działania wyłączników przy pomocy przycisku TEST.

Wyłączniki DPX 630 i NSA 160E wyposażone są w przycisk umożliwiający wykonanie testu sprawdzającego poprawność działania układu mechanicznego wyłączników. Sprawdzenie poprawności jego działania wykonuje się następująco:

1. Sprawdzić wartość indukcyjności dławika wymuszającego – powinna być nastawiona na minimum. Sprawdzić, czy wyłączniki i rozłączniki stanowiska są otwarte.
2. Załączyć wyłącznik DPX 630.
3. Zamknąć rozłącznik nr 1, 2 lub 3 (rys. 7) – w zależności od tego, która faza wyłącznika będzie badana.
4. Włączyć zasilanie na tablicy zasilającej.
5. Włączyć zasilanie stanowiska przyciskiem załączającym znajdującym się na blacie głównym stanowiska.
6. Wcisnąć przycisk TEST.
7. **Po zadziałaniu wyłącznika niezwłocznie wyłączyć zasilanie przyciskiem WYŁ. znajdującym się na blacie głównym stanowiska.**
8. Zanotować zadziałanie lub niezadziałanie wyłącznika w tab. 1.
9. Powyższe czynności powtórzyć dla wyłącznika NSA 160E.

TAB. 1. Sprawdzenie działania wyłączników przy pomocy przycisku TEST

| Wyłącznik | Badana faza | Zadziałanie wyłącznika | Niezadziałanie wyłącznika |
|-----------|-------------|------------------------|---------------------------|
| DPX 630   | 1           |                        |                           |
|           | 2           |                        |                           |
|           | 3           |                        |                           |
| NSA 160E  | 1           |                        |                           |
|           | 2           |                        |                           |
|           | 3           |                        |                           |

### 3.2. Sprawdzenie poprawności działania sygnalizatorów świetlnych umieszczonych na płycie czołowej wyłącznika DPX 630

Aby dokonać sprawdzenia poprawności działania sygnalizatorów świetlnych umieszczonych na płycie czołowej wyłącznika DPX 630, należy wykonać następujące czynności:

1. Sprawdzić wartość indukcyjności dławika wymuszającego – powinna być nastawiona na minimum. Sprawdzić, czy wyłączniki oraz rozłączniki stanowiska są otwarte.
2. Nastawić wartość prądu  $I_r$  na płycie czołowej wyłącznika DPX 630 wg tab. 2.
3. Nastawić wartość prądu  $I_m$  na maksimum.
4. Załączyć wyłącznik DPX 630.

5. Zamknąć rozłącznik nr 1, 2 lub 3 – w zależności, która faza wyłącznika będzie badana.
6. Włączyć zasilanie na tablicy zasilającej.
7. Włączyć zasilanie przyciskiem ZAŁ. na blacie głównym stanowiska.
8. Regulując wartość indukcyjności dławika, zwiększać wartość prądu płynącego przez wyłącznik oraz obserwować zachowanie wskaźnika nr 4 (rys. 2). Wskaźnik powinien świecić na czerwono przy  $I \geq 0,9 I_r$  oraz pulsować przy  $I \geq 1,05 I_r$ .
9. Zanotować wartości prądów, przy których wystąpiła sygnalizacja.
10. Wyłączyć zasilanie przyciskiem WYŁ. na blacie głównym stanowiska.
11. Powtórzyć wszystkie czynności łączeniowe dla kolejnych wartości prądu  $I_r$  oraz dla kolejnych badanych faz wyłącznika.
12. Wyniki zapisać w tab. 2.

TAB. 2. Zestawienie wyników sprawdzenia poprawności działania sygnalizatorów umieszczonych na płycie czołowej wyłącznika DPX 630

|               | $I_r$                                                               | [A] | $0,4 I_n$ | $0,5 I_n$ | $0,6 I_n$ | $0,7 I_n$ | $0,8 I_n$ | $0,9 I_n$ | $0,95 I_n$ | $1 I_n$ |
|---------------|---------------------------------------------------------------------|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|---------|
| Faza          | wartość $I_r$                                                       | [A] |           |           |           |           |           |           |            |         |
| 1, 2<br>lub 3 | wartość prądu, przy której następuje sygnalizacja $I \geq 0,9 I_r$  | [A] |           |           |           |           |           |           |            |         |
|               | wartość prądu, przy której następuje sygnalizacja $I \geq 1,05 I_r$ | [A] |           |           |           |           |           |           |            |         |

### 3.3. Wyznaczenie charakterystyki czasowo-prądowej wyłącznika NSA 160E

W celu wyznaczenia charakterystyki czasowo-prądowej wyłącznika NSA 160E należy wykonać następujące czynności:

1. Sprawdzić wartość indukcyjności dławika wymuszającego – powinna być nastawiona na minimum. Sprawdzić, czy wyłączniki oraz rozłączniki stanowiska są otwarte.
2. Włączyć zasilanie na tablicy zasilającej.
3. Zamknąć rozłącznik nr 4.
4. Włączyć zasilanie przyciskiem ZAŁ. na blacie głównym stanowiska.
5. Regulując wartość indukcyjności dławika, nastawić pożądaną wartość prądu płynącego przez rozłącznik nr 4.
6. Po nastawieniu żądanej wartości prądu wyłączyć zasilanie przyciskiem WYŁ. na blacie głównym stanowiska.
7. Otworzyć rozłącznik nr 4.

8. Zamknąć rozłącznik nr 1, 2 lub 3 – w zależności od tego, która faza wyłącznika będzie badana.
9. Załączyć wyłącznik NSA 160E.
10. Włączyć zasilanie przyciskiem ZAŁ. na blacie głównym stanowiska; w tym samym czasie włączyć stoper i zanotować w tab. 3 czas wyłączenia.
11. Po zadziałaniu wyłącznika niezwłocznie wyłączyć zasilanie przyciskiem WYŁ. na blacie głównym stanowiska.
12. Powtórzyć wszystkie czynności łączeniowe dla kolejnych wartości prądów.
13. Wyniki zapisać w tab. 3.

TAB. 3. Tabela do wyznaczenia charakterystyki czasowo-prądowej wyłącznika NSA 160E:  $I_w$  – prąd płynący przez wyłącznik;  $t$  – czas, po jakim wyłącznik samoczynnie zadziałał

| Numer badanej fazy wyłącznika ..... |     |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-------------------------------------|-----|--|--|--|--|--|--|--|--|
| $I_w$                               | [A] |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $t$                                 | [s] |  |  |  |  |  |  |  |  |

### 3.4. Wyznaczenie charakterystyki czasowo-prądowej wyłącznika DPX 630

Charakterystykę czasowo-prądową wyłącznika DPX 630 wyznacza się, wykonując następujące czynności:

1. Sprawdzić wartość indukcyjności dławika wymuszającego – powinna być nastawiona na minimum. Sprawdzić, czy wyłączniki oraz rozłączniki stanowiska są otwarte.
2. Ustawić wybrane wartości  $I_r$ ,  $T_r$ ,  $I_m$ ,  $T_m$ ,  $I_g$ ,  $T_g$  (rys. 4).
3. Włączyć zasilanie na tablicy zasilającej.
4. Zamknąć rozłącznik nr 4.
5. Włączyć zasilanie przyciskiem ZAŁ. na blacie głównym stanowiska.
6. Regulując wartość indukcyjności dławika, nastawić wartość prądu płynącego przez rozłącznik nr 4.
7. Po nastawieniu żądanej wartości prądu należy niezwłocznie wyłączyć zasilanie przyciskiem WYŁ. na blacie głównym stanowiska.
8. Otworzyć rozłącznik nr 4.
9. Zamknąć rozłącznik nr 1, 2 lub 3 – w zależności, która faza wyłącznika będzie badana.
10. Załączyć wyłącznik DPX 630.
11. Włączyć zasilanie przyciskiem ZAŁ. na blacie głównym stanowiska; w tym samym czasie włączyć stoper i zanotować w tab. 4 czas wyłączenia.
12. Po zadziałaniu wyłącznika niezwłocznie wyłączyć zasilanie przyciskiem WYŁ. na blacie głównym stanowiska.
13. Powtórzyć wszystkie czynności łączeniowe dla kolejnych wartości prądów.
14. Wyniki zapisać w tab. 4.

TAB. 4. Tabela do wyznaczenia charakterystyki czasowo-prądowej wyłącznika DPX 630:  $I_w$  – prąd płynący przez wyłącznik,  $t$  – czas, po jakim wyłącznik samoczynnie zadziałał

| $I_r = \dots, T_r = \dots, I_m = \dots, T_m = \dots, I_g = \dots, T_g = \dots$ |     |  |  |  |  |  |  |  |  |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----|--|--|--|--|--|--|--|--|
| Numer badanej fazy wyłącznika ....                                             |     |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $I_w$                                                                          | [A] |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $t$                                                                            | [s] |  |  |  |  |  |  |  |  |

## 4. Sprawozdanie studenckie

Sprawozdanie z ćwiczenia powinno zawierać:

1. Cel ćwiczenia.
2. Schemat badanego układu.
3. Zestawienie wyznaczonych wartości.
4. Wyznaczone charakterystyki czasowo-prądowe badanych wyłączników.
5. Porównanie wyznaczonych charakterystyk z charakterystykami podanymi przez producenta.
6. Wnioski.

## Literatura

1. Lejdy B., Sulkowski M., *Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych*, WNT, Warszawa 2019.
2. Markiewicz H., *Instalacje elektryczne*, WNT, Warszawa 2018.
3. Markiewicz H., *Urządzenia elektroenergetyczne*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2016.
4. Katalog firmy Merlin Gerin: *Aparatura Elektryczna*.
5. Katalog firmy Legrand: *Instalacyjna Aparatura Elektryczna*.

# Ćwiczenie nr 11

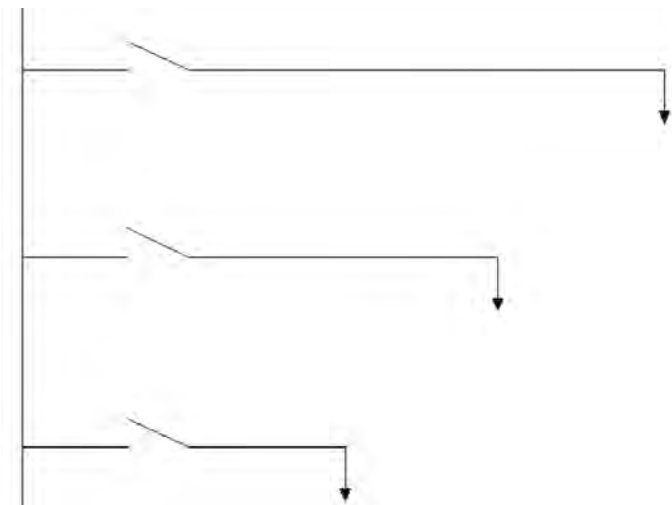
## BADANIE ROZPŁYWU PRĄDÓW I MOCY W UKŁADACH ELEKTROENERGETYCZNYCH

### 1. Wiadomości wstępne

#### 1.1. Rodzaje sieci elektroenergetycznych

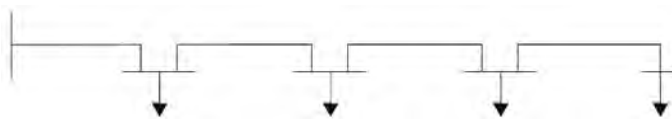
Układ elektroenergetyczny to połączenie podstawowych elementów sieci, jakimi są stacje i linie elektroenergetyczne. Powinny być one połączone w taki sposób, aby stworzona sieć zapewniała odbiorcom dostawę energii elektrycznej o wysokiej niezawodności i odpowiedniej jakości. Rozróżnia się cztery podstawowe typy układów sieci: promieniowy, magistralny, pętlowy i zamknięty [1].

Układ promieniowy (rys. 1) charakteryzuje się tym, że każdy odbiornik zasilany jest z oddzielnej gałęzi sieci elektrycznej. Wyróżnia się przy tym układy promieniowe jedno- i wielostopniowe. Głównymi zaletami układów promieniowych są ich przejrzystość i prostota. Do wad należy zaliczyć natomiast przede wszystkim niską niezawodność, co powoduje, że stosuje się je w układach niewymagających wysokiej stabilności zasilania.



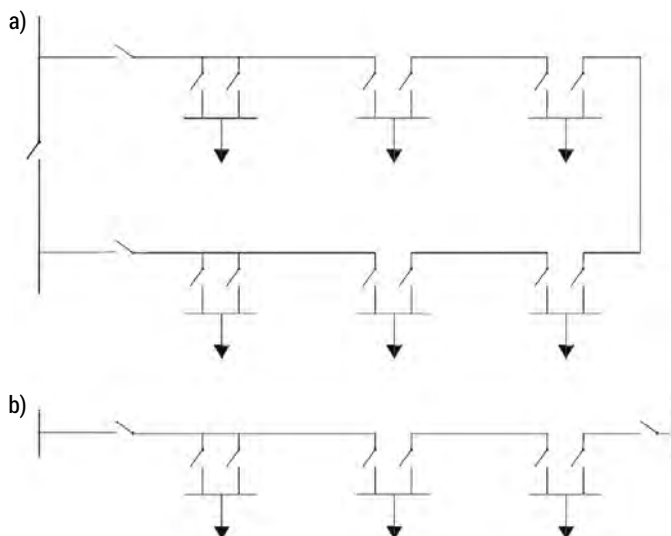
RYS. 1. Schemat układu promieniowego [1]

Najprostszy obwód magistralny składa się z pojedynczej linii, do której dołączono kilka odbiorów (rys. 2). Układy te charakteryzują się niską ceną w porównaniu do układów promieniowych oraz bardzo niską niezawodnością.



RYS. 2. Schemat układu magistralnego [1]

Układ pętlowy charakteryzuje się zasilaniem odbiorów z obu stron. Tworzona jest wówczas tzw. pętla, w której energia elektryczna dostarczana jest z jednego punktu (rys. 3a) bądź z dwóch różnych stacji elektroenergetycznych (rys. 3b). Najczęściej sieć pracuje jako rozcięta w naturalnym punkcie jej podziału. Jeżeli w sieci zostaną zainstalowane rozłączniki sterowane drogą radiową, wówczas można zdalnie wybrać (w zależności od potrzeb) punkt podziału sieci – wykorzystywane jest to przede wszystkim do zapewnienia odbiorcom pewności zasilania w przypadkach awarii odcinka sieci lub planowanych remontów. Podczas wystąpienia zakłócenia podziału dokonuje się w miejscu pozwalającym wyeliminować uszkodzony odcinek, przy jednoczesnym utrzymaniu zasilania w „zdrowych” fragmentach sieci. Układ pętlowy charakteryzuje się dużą niezawodnością.



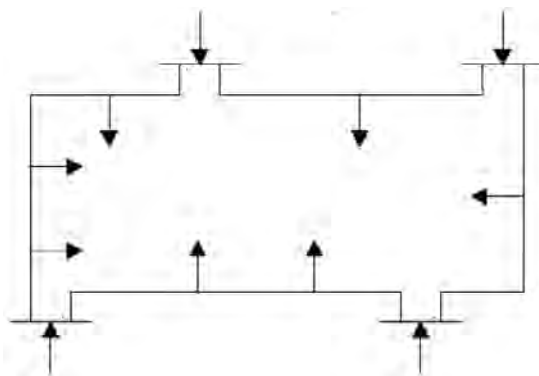
RYS. 3. Schemat układu pętlowego zasilanego: a) z jednej stacji; b) z dwóch stacji [2, 3]

Zamknięte układy sieciowe wyróżniają się dostarczaniem energii elektrycznej z dwóch stron danego odcinka instalacji. Przykładem takiego rozwiązania jest sieć pierścieniowa (rys. 4).

Cechy wyróżniające układ zamknięty sieci:

- bardzo wysoki współczynnik niezawodności,
- niskie spadki napięcia,
- niski poziom strat mocy,
- ryzyko rozprzestrzenienia się zakłócenia,
- potrzeba stosowania bardziej zaawansowanych zabezpieczeń.

Układy zamknięte ze względu na wysokie koszty instalacji znajdują zastosowanie w sieciach, w przypadku których szczególnie ważna jest niezawodność elektryczna.



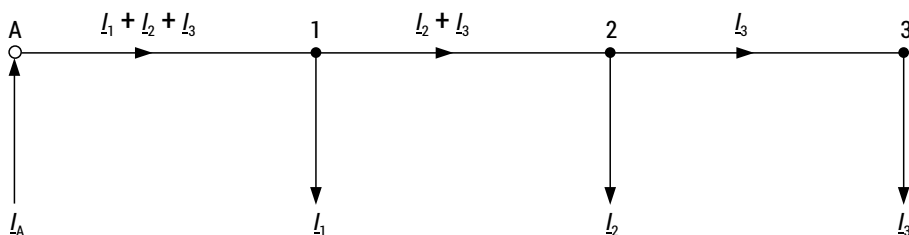
RYS. 4. Przykładowy schemat sieci zamkniętej [3]

## 1.2. Rozpływy prądów i mocy w sieciach elektroenergetycznych

Znajomość rozpływu prądów i mocy w sieciach elektroenergetycznych pozwala nie tylko na utrzymanie stabilności systemu elektroenergetycznego, ale również na wyznaczenie wartości spadków napięcia i strat mocy w poszczególnych elementach układu oraz umożliwia wykonanie analizy kosztów strat.

W celu obliczenia rozpływu prądów w liniach elektroenergetycznych należy znać wartości prądów w punktach odbioru. Najczęściej odbiory określone są wartością mocy, a do obliczeń należałoby (ze względu na ich dokładność) przyjmować napięcie rzeczywiście występujące w poszczególnych punktach odbioru. Ponieważ w praktyce najczęściej napięcie to nie jest jednak znane (ze względu na występujące w układzie spadki napięcia), do obliczeń przyjmuje się zwykle napięcie znamionowe sieci, a uzyskane w ten sposób wyniki są dla celów praktycznych dostatecznie dokładne.

Rozpływ prądów w sieci magistralnej obciążonej w wielu punktach wyznacza się, korzystając z pierwszego prawa Kirchhoffa, dotyczącego bilansu prądów w węźle obwodu. Zasadę wyznaczania rozpływu w linii zasilanej jednostronnie, obciążonej w wielu punktach ilustruje rys. 5.



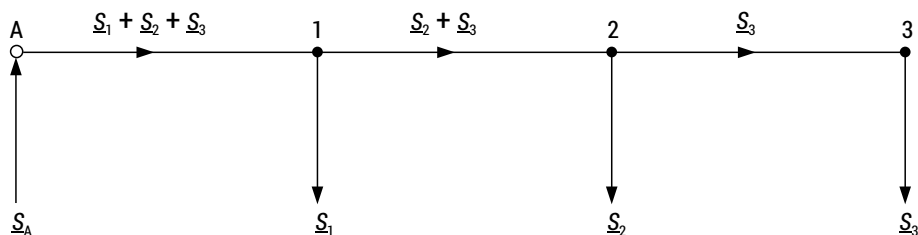
RYŚ. 5. Rozpływ prądów w torze otwartym, obciążonym w wielu punktach [3]

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{A1} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 \quad (1)$$

$$\underline{I}_{12} = \underline{I}_2 + \underline{I}_3 \quad (2)$$

$$\underline{I}_{23} = \underline{I}_3 \quad (3)$$

W analogiczny sposób wyznacza się w takim układzie rozpływ mocy (rys. 6).



RYŚ. 6. Rozpływ mocy w torze otwartym, obciążonym w wielu punktach [3]

$$\underline{S}_A = \underline{S}_{A1} = \underline{S}_1 + \underline{S}_2 + \underline{S}_3 \quad (4)$$

$$\underline{S}_{12} = \underline{S}_2 + \underline{S}_3 \quad (5)$$

$$\underline{S}_{23} = \underline{S}_3 \quad (6)$$

### 1.3. Spadek i strata napięcia w sieci elektroenergetycznej

**Spadek napięcia** to różnica algebraiczna modułów napięć na początku i na końcu rozpatrywanego układu elektroenergetycznego. W przypadku różnicy napięć fazowych jest to spadek napięcia fazowy ( $\Delta U_f$ ), a w przypadku różnicy wartości przewodowych (międzyfazowych) – przewodowy (międzyfazowy) ( $\Delta U$ ), opisany zależnościami:

$$\Delta U_f = U_{fp} - U_{fk} \quad (7)$$

$$\Delta U = U_p - U_k \quad (8)$$

gdzie:

$U_{fk}$ ,  $U_k$  – moduły napięcia fazowego i przewodowego na końcu układu,

$U_{fp}$ ,  $U_p$  – moduły napięcia fazowego i przewodowego na początku układu.

W przypadku układów rozgałęzionych, obciążonych w wielu punktach spadek napięcia wyznacza się z zależności [3, 4]:

1. Dla układów jednofazowych:

a) metoda odcinkowa:

$$\Delta U_f = 2 \cdot \sum_{p=1}^n I_{(p-1),p} \cdot R_{(p-1),p} \quad (9)$$

$$\Delta U_f = \frac{2}{\gamma \cdot s} \cdot \sum_{p=1}^n I_{(p-1),p} \cdot l_{(p-1),p} \quad (10)$$

$$\Delta U_{f\%} = \frac{200}{\gamma \cdot s \cdot U_f} \cdot \sum_{p=1}^n I_{(p-1),p} \cdot l_{(p-1),p} \quad (11)$$

b) metoda momentów:

$$\Delta U_f = 2 \cdot \sum_{p=1}^n I_p \cdot R_{A,p} \quad (12)$$

$$\Delta U_f = \frac{2}{\gamma \cdot s} \cdot \sum_{p=1}^n I_p \cdot l_{A,p} \quad (13)$$

$$\Delta U_{f\%} = \frac{200}{\gamma \cdot s \cdot U_f} \cdot \sum_{p=1}^n I_p \cdot l_{A,p} \quad (14)$$

2. Dla układów trójfazowych:

a) metoda odcinkowa:

$$\Delta U_f = \sum_{p=1}^n I_{(p-1),p} \cdot R_{(p-1),p} \quad (15)$$

$$\Delta U_f = \frac{1}{\gamma \cdot s} \cdot \sum_{p=1}^n I_{(p-1),p} \cdot l_{(p-1),p} \quad (16)$$

$$\Delta U_{f\%} = \frac{100}{\gamma \cdot s \cdot U_f} \cdot \sum_{p=1}^n I_{(p-1),p} \cdot l_{(p-1),p} \quad (17)$$

b) metoda momentów:

$$\Delta U_f = \sum_{p=1}^n I_p \cdot R_{A,p} \quad (18)$$

$$\Delta U_f = \frac{1}{\gamma \cdot s} \cdot \sum_{p=1}^n I_p \cdot l_{A,p} \quad (19)$$

$$\Delta U_{f\%} = \frac{100}{\gamma \cdot s \cdot U_f} \cdot \sum_{p=1}^n I_p \cdot l_{A,p} \quad (20)$$

**Strata napięcia** to różnica geometryczna wektorów napięć na początku i końcu rozpatrywanego układu elektroenergetycznego. W przypadku różnicy wektorów napięć fazowych jest to strata fazowa ( $\Delta \underline{U}_f$ ), w przypadku różnicy napięć przewodowych (międzyfazowych) – przewodowa (międzyfazowa) ( $\Delta \underline{U}$ ).

$$\Delta \underline{U}_f = \underline{U}_{fp} - \underline{U}_{fk} \quad (21)$$

$$\Delta \underline{U} = \underline{U}_p - \underline{U}_k \quad (22)$$

gdzie:

$\underline{U}_{fk}, \underline{U}_k$  – fazowe i przewodowe napięcie na końcu układu,

$\underline{U}_{fp}, \underline{U}_p$  – fazowe i przewodowe napięcie na początku układu.

W przypadku układów rozgałęzionych, obciążonych w wielu punktach spadek napięcia wyznacza się z zależności [3, 4]:

1. Dla układów jednofazowych:

a) metoda odcinkowa:

$$\Delta \underline{U}_f = 2 \cdot \sum_{p=1}^n \underline{I}_{(p-1),p} \cdot R_{(p-1),p} \quad (23)$$

$$\Delta \underline{U}_f = \frac{2}{\gamma \cdot s} \cdot \sum_{p=1}^n \underline{I}_{(p-1),p} \cdot l_{(p-1),p} \quad (24)$$

$$\Delta \underline{U}_{f\%} = \frac{200}{\gamma \cdot s \cdot U_f} \cdot \sum_{p=1}^n \underline{I}_{(p-1),p} \cdot l_{(p-1),p} \quad (25)$$

b) metoda momentów:

$$\Delta \underline{U}_f = 2 \cdot \sum_{p=1}^n \underline{I}_p \cdot R_{A,p} \quad (26)$$

$$\Delta \underline{U}_f = \frac{2}{\gamma \cdot s} \cdot \sum_{p=1}^n \underline{I}_p \cdot l_{A,p} \quad (27)$$

$$\Delta \underline{U}_{f\%} = \frac{200}{\gamma \cdot s \cdot U_f} \cdot \sum_{p=1}^n \underline{I}_p \cdot l_{A,p} \quad (28)$$

2. Dla układów trójfazowych:

a) metoda odcinkowa:

$$\Delta \underline{U}_f = \sum_{p=1}^n \underline{I}_{(p-1),p} \cdot R_{(p-1),p} \quad (29)$$

$$\Delta \underline{U}_f = \frac{1}{\gamma \cdot s} \cdot \sum_{p=1}^n \underline{I}_{(p-1),p} \cdot l_{(p-1),p} \quad (30)$$

$$\Delta \underline{U}_{f\%} = \frac{100}{\gamma \cdot s \cdot U_f} \cdot \sum_{p=1}^n \underline{I}_{(p-1),p} \cdot l_{(p-1),p} \quad (31)$$

b) metoda momentów:

$$\Delta U_f = \sum_{p=1}^n I_p \cdot R_{A,p} \quad (32)$$

$$\Delta U_f = \frac{1}{\gamma \cdot s} \cdot \sum_{p=1}^n I_p \cdot l_{A,p} \quad (33)$$

$$\Delta U_{f\%} = \frac{100}{\gamma \cdot s \cdot U_f} \cdot \sum_{p=1}^n I_p \cdot l_{A,p} \quad (34)$$

## 1.4. Straty mocy w sieciach elektroenergetycznych

Straty mocy są w układach elektroenergetycznych zjawiskiem niekorzystnym, ponieważ powodują dodatkowe obciążenia poszczególnych elementów układu oraz konieczność wytworzenia dodatkowej energii w elektrowniach. Wywołują tym samym potrzebę instalowania dodatkowych urządzeń w sieciach i elektrowniach, zwiększania przekrojów żył przewodów i kabli w liniach elektroenergetycznych oraz mocy znamionowej transformatorów, turbin i generatorów, a także wymuszają zużycie większej ilości paliwa w elektrowniach, co pociąga za sobą zwiększenie kosztów wytwarzania i przesyłu energii elektrycznej. W sieci prądu przemiennego występują przepływ oraz straty mocy czynnej i biernej.

Straty mocy czynnej występują w elementach rezystancyjnych sieci, a straty mocy biernej w elementach reaktancyjnych (indukcyjnych lub pojemnościowych). Straty energii występują wyłącznie w elementach rezystancyjnych.

Straty mocy czynnej ( $\Delta P$ ) w układzie rozgałęzionym, obciążonym w wielu punktach wyznacza się z zależności:

1. Dla układów jednofazowych:

$$\Delta P = 2 \cdot \sum_{p=1}^n I_{(p-1),p}^2 \cdot R_{(p-1),p} \quad (35)$$

$$\Delta P = \frac{2}{\gamma \cdot s} \cdot \sum_{p=1}^n I_{(p-1),p}^2 \cdot l_{(p-1),p} \quad (36)$$

2. Dla układów trójfazowych:

$$\Delta P = 3 \cdot \sum_{p=1}^n I_{(p-1),p}^2 \cdot R_{(p-1),p} \quad (37)$$

$$\Delta P = \frac{3}{\gamma \cdot s} \cdot \sum_{p=1}^n I_{(p-1),p}^2 \cdot l_{(p-1),p} \quad (38)$$

Procentowe straty mocy opisuje równanie:

$$\Delta P_{\%} = \frac{\Delta P}{P} \cdot 100 \quad (39)$$

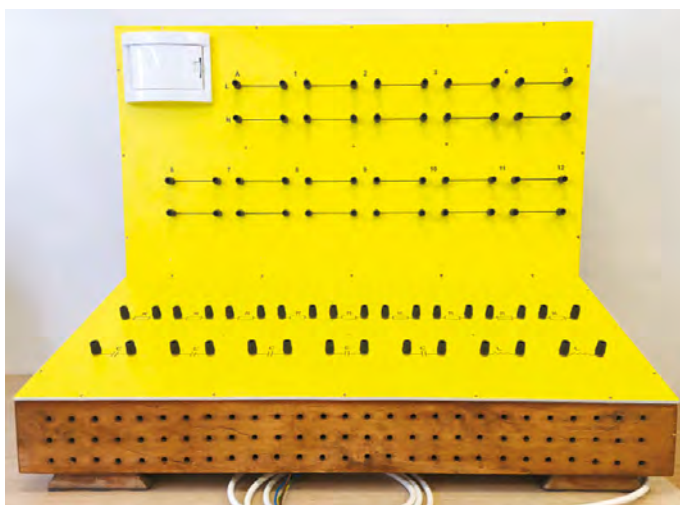
## 2. Cel i zakres ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z zagadnieniami rozprężu prądów i mocy w torach otwartych, rozgałęzionych, obciążonych w wielu punktach. Zakres ćwiczenia obejmuje wyznaczanie wartości prądów, mocy, strat mocy i napięcia w poszczególnych gałęziach wybranych układów elektroenergetycznych.

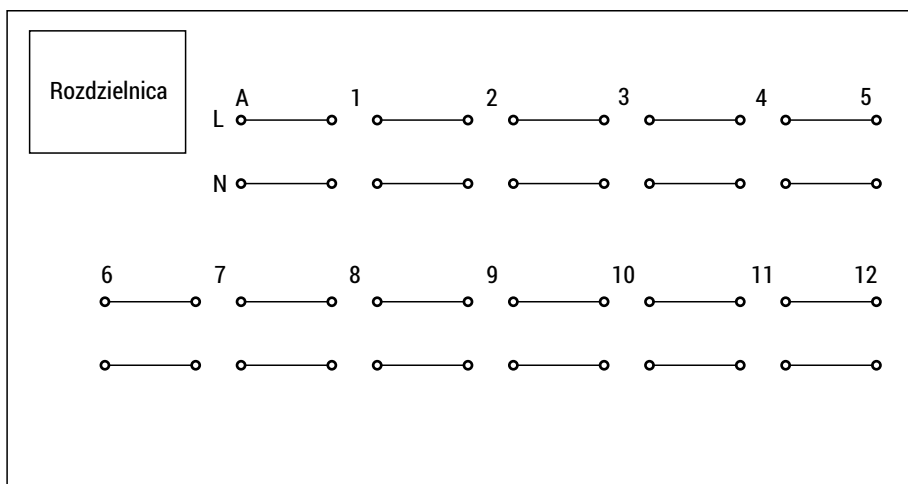
## 3. Program badań

### 3.1. Opis stanowiska badawczego

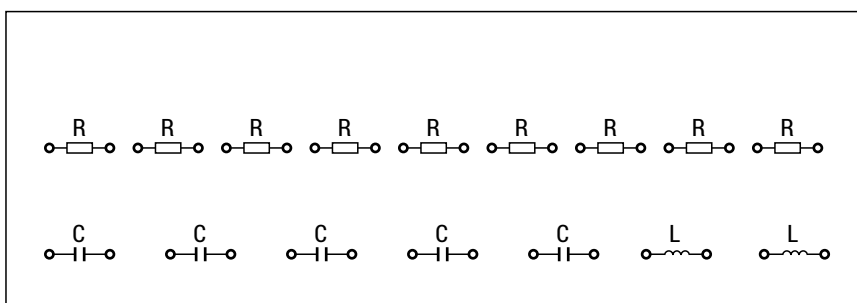
Przedmiotem badania jest model rozgałęzionej sieci elektroenergetycznej niskiego napięcia, obciążonej w wielu punktach. Stanowisko laboratoryjne do badania rozprężu prądów i mocy w układach elektroenergetycznych składa się z pulpitu oraz płyty czołowej (rys. 7). Na płycie czołowej (rys. 8) zamontowano modele odcinków jedno-fazowych linii niskiego napięcia, natomiast na pulpicie (rys. 9) modele obciążeń rezystancyjnych pojemnościowych i indukcyjnych.



RYŚ. 7. Widok stanowiska badawczego

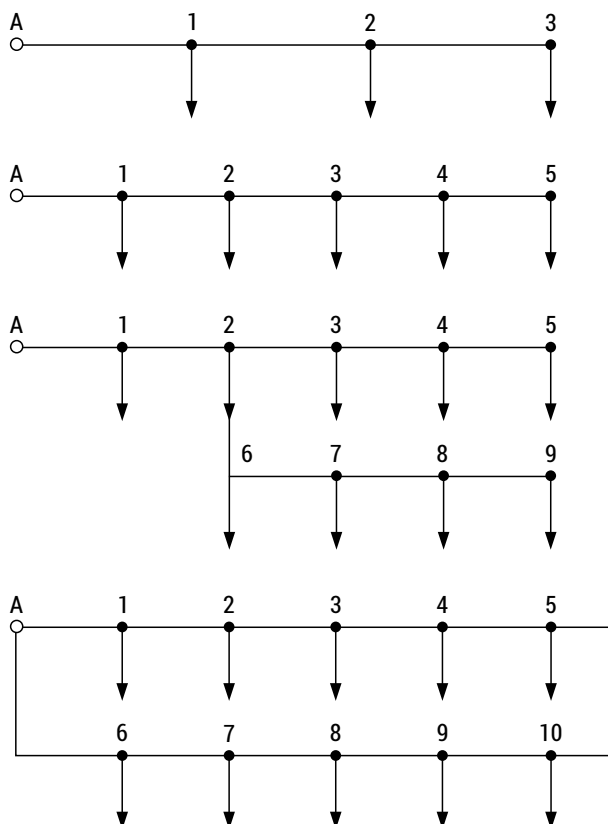


RYS. 8. Schemat płyty czołowej stanowiska badawczego



RYS. 9. Schemat pulpitu stanowiska badawczego

Konstrukcja stanowiska umożliwia dowolną konfigurację układów połączeń odcinków linii oraz ich obciążenia, np.:



### 3.2. Przebieg ćwiczenia

W trakcie ćwiczenia należy:

1. Połączyć układ badanej linii w konfiguracji wskazanej przez prowadzącego.
2. Dokonać pomiarów wartości podstawowych wielkości elektrycznych poszczególnych odbiorników stanowiących obciążenia analizowanego układu. Wyniki zamieścić w tab. 1.

TAB. 1. Zestawienie wyników pomiarów na odbiorach

| Odbiór nr | Prąd odbiorczy   | Moc czynna       | Moc bierna       | Moc pozorna      | Współczynnik mocy     |
|-----------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------------|
|           | $I_{\text{odb}}$ | $P_{\text{odb}}$ | $Q_{\text{odb}}$ | $S_{\text{odb}}$ | $\cos j_{\text{odb}}$ |
|           | A                | W                | var              | VA               | –                     |
| 1         |                  |                  |                  |                  |                       |
| 2         |                  |                  |                  |                  |                       |
| ...       |                  |                  |                  |                  |                       |

3. Dokonać pomiarów wartości podstawowych wielkości elektrycznych w poszczególnych odcinkach analizowanej linii. Wyniki zamieścić w tab. 2.

TAB. 2. Zestawienie wyników pomiarów na odcinkach linii

| Odcinek nr | Prąd odcinka     | Moc czynna       | Moc bierna       | Moc pozorna      | Współczynnik mocy     |
|------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------------|
|            | $I_{\text{odc}}$ | $P_{\text{odc}}$ | $Q_{\text{odc}}$ | $S_{\text{odc}}$ | $\cos j_{\text{odc}}$ |
|            | A                | W                | var              | VA               | –                     |
| A-1        |                  |                  |                  |                  |                       |
| 1-2        |                  |                  |                  |                  |                       |
| ...        |                  |                  |                  |                  |                       |

Dokonać pomiarów napięć w poszczególnych punktach węzłowych analizowanej linii. Wyniki zamieścić w tab. 3.

TAB. 3. Zestawienie wyników pomiarów wartości napięć w węzłach

| Punkt nr | Napięcie |  |
|----------|----------|--|
|          | $U$      |  |
|          | $V$      |  |
| A        |          |  |
| 1        |          |  |
| ...      |          |  |

Wyznaczyć spadki napięć oraz rezystancję poszczególnych odcinków linii i zestawić je w tab. 4.

TAB. 4. Zestawienie wyników pomiarów wartości spadków napięć na poszczególnych odcinkach linii

| Odcinek nr | Spadek napięcia   |
|------------|-------------------|
|            | $DU_{\text{odc}}$ |
|            | $V$               |
| A-1        |                   |
| 1-2        |                   |
| ...        |                   |

Na podstawie wyników pomiarów wyznaczyć wartości spadku napięcia i strat mocy dla całej badanej linii oraz teoretycznie obliczyć te same wartości w oparciu o zmierzone prądy obciążenia i wyznaczone rezystancje poszczególnych odcinków linii.

## 4. Sprawozdanie studenckie

Sprawozdanie studenckie powinno zawierać:

1. Cel ćwiczenia.
2. Schematy układów pomiarowych.
3. Zestawienie wyników badań.
4. Obliczenia.
5. Wnioski.

We wnioskach należy zwrócić szczególną uwagę na omówienie otrzymanych wyników pomiarów oraz wyjaśnienie przyczyn rozbieżności pomiędzy pomiarami a wynikami obliczeń teoretycznych, a także na określenie parametrów, od których zależą wartości spadku napięcia i strat mocy.

## Literatura

1. Marzecki J., *Sieci elektroenergetyczne w obiektach przemysłowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2024.
2. Marzecki J., *Elektroenergetyczne sieci terenowe*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2017.

3. Zajczyk R., *Aktualne problemy pracy systemów elektroenergetycznych*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2023.
4. *Poradnik Inżyniera Elektryka*, praca zbiorowa, WNT, Warszawa 2022 i wydania wcześniejsze.

# Ćwiczenie nr 12

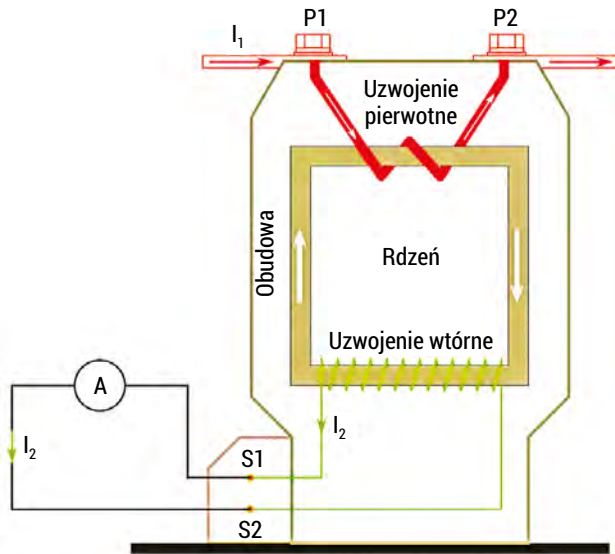
## BADANIE WYBRANYCH PARAMETRÓW PRZEKŁADNIKÓW PRĄDOWYCH I NAPIĘCIOWYCH

### 1. Wiadomości wstępne

Przekładniki indukcyjne, zwane również transformatorami pomiarowymi, odgrywają istotną rolę w dziedzinie pomiarów elektrycznych. Ich główna funkcja to izolacja galwaniczna obwodów pomiarowych od pierwotnych, które często są obwodami o wysokim napięciu. Dodatkowo przekładniki indukcyjne przetwarzają pierwotne wielkości na ujednolicone wielkości wtórne. Ta standaryzacja umożliwia normalizację przyrządów pomiarowych, urządzeń zabezpieczających i sterujących oraz ułatwia integrację sygnałów z różnych punktów w systemach elektroenergetycznych. W zależności od wielkości normalizowanej rozróżnia się przekładniki prądowe i napięciowe. Parametrem opisującym każdy z przekładników jest przekładnia (prądowa lub napięciowa) [1].

#### 1.1. Przekładniki prądowe

W przekładnikach prądowych, w normalnych warunkach pracy, prąd wtórny jest proporcjonalny do prądu pierwotnego. Przekładniki te składają się z rdzenia, wykonanego z blach transformatorowych lub specjalnych stopów żelazo-niklowych o dużej przenikalności magnetycznej początkowej i maksymalnej, oraz uzwojeń pierwotnego i wtórnego (rys. 1) [2].



RYS. 1. Schemat przedstawiający budowę przekładnika prądowego:  $I_1$  – prąd pierwotny,  $I_2$  – prąd wtórny [1].

Stosunek znamionowego prądu pierwotnego ( $I_{1n}$ ) do wtórnego ( $I_{2n}$ ) nazywa się przekładnią znamionową przekładnika:

$$\vartheta_{1n} = \frac{I_{1n}}{I_{2n}} = \frac{z_1}{z_2} \quad (1)$$

w której:

$z_1$  – liczba zwojów uzwojenia pierwotnego,

$z_2$  – liczba zwojów uzwojenia wtórnego.

Do podstawowych parametrów przekładników prądowych, poza przekładnią znamionową, należą [2-4]:

1. Znamionowy prąd pierwotny  $I_1$  – wartość prądu pierwotnego, do którego odniesiona jest praca przekładnika, czyli maksymalna wartość prądu mierzonego, jaka w normalnych warunkach może płynąć przez uzwojenie pierwotne.
2. Znamionowy prąd wtórny  $I_2$  – wartość prądu wtórnego, do którego odniesiona jest praca przekładnika, czyli wartość prądu wtórnego odpowiadająca znamionowemu prądowi pierwotnemu. Jest to wartość normalizowana i wynosi zazwyczaj 1 lub 5 A.
3. Przekładnia rzeczywista – stosunek rzeczywistego prądu pierwotnego do rzeczywistego prądu wtórnego.
4. Błąd prądowy  $\Delta I_{\%}$  – błąd, który przekładnik wprowadza do pomiaru prądu, wynikający z tego, że rzeczywista przekładnia nie jest równa przekładni znamionowej. Opisany jest on zależnością:

$$\Delta I_{\%} = \frac{I_2 \cdot \vartheta_I - I_1}{I_1} \cdot 100 \quad (2)$$

Wartość błędu zależy od wielu czynników, jednak możliwości jego zmniejszenia są bardzo ograniczone. Praktycznie ograniczenie wartości błędu jest możliwe przez zmniejszenie wartości impedancji obciążenia oraz zwiększenie przenikalności magnetycznej rdzenia. W rozwiązaniach praktycznych stosuje się podmagnesowanie rdzenia w celu przesunięcia punktu pracy przekładnika na charakterystyce magnesowania do zakresu większych wartości przenikalności. W nowoczesnych przekładnikach do podmagnesowania wykorzystuje się prądy wtórne przekładników.

Błąd kątowy  $\delta_I$  – kąt fazowy między wektorami prądów pierwotnego i wtórnego. Dodatni znak błędu oznacza, że wskaz prądu wtórnego wyprzedza wskaz prądu pierwotnego.

Klasa dokładności – oznaczenie związane z dopuszczalnymi błędami przekładnika prądowego w określonych warunkach pracy. Ze względu na klasę dokładności przekładniki prądowe dzieli się na pomiarowe i zabezpieczeniowe. W przekładnikach prądowych pomiarowych klasa dokładności jest oznaczona przez największy dopuszczalny procentowy błąd prądowy przy prądzie znamionowym. Znormalizowanymi klasami dokładności przekładników prądowych pomiarowych są: 0,1; 0,2; 0,5; 1; 3; 5. Błędy przekładników pomiarowych są sprawdzane w zakresie od 25 do 100% obciążenia znamionowego dla przekładników klas: 0,1; 0,2; 0,5; 1. Przekładniki klas 3 i 5 sprawdzane są przy obciążeniu wtórnym od 50 do 100% obciążenia znamionowego. Przekładnik obciążony mocą większą od znamionowej transformuje mniej dokładnie, wskutek czego staje się przekładnikiem niższej klasy. Przy zwarcia w sieci wartość prądu w uzwojeniu pierwotnym przekładnika jest wielokrotnie większa od znamionowego. Powoduje to silne nasycenie się rdzenia i znaczny wzrost błędu transformacji. Granica gwarantowanej transformacji jest określona na poziomie 120% pierwotnego prądu znamionowego. W przypadku przekładników przeznaczonych do współpracy z zabezpieczeniami wymaga się, aby zabezpieczenia te pracowały prawidłowo przy zwarcia, a więc poprawna powinna być transformacja prądów wielokrotnie większych od prądu znamionowego. Zakres maksymalnego prądu pierwotnego wyznacza znamionowy graniczny prąd pierwotny. Jest to największa wartość skuteczna prądu pierwotnego, przy którym błąd całkowity przekładnika obciążonego znamionowo osiąga wartość określoną w normie dla przekładników danej klasy. Prądowi temu odpowiada współczynnik graniczny dokładności, określony jako stosunek granicznego prądu pierwotnego do znamionowego prądu pierwotnego. Wśród przekładników zabezpieczeniowych wyróżnia się dwie klasy dokładności, oznaczone 5P oraz 10P. Współczynniki graniczne dokładności tych przekładników powinny odpowiadać znormalizowanemu szeregowi: 5; 10; 15; 20; 30.

Obciążenie uzwojenia wtórnego – impedancja obwodu wtórnego wyrażona w omach przy określonym współczynniku mocy. Obciążenie jest zwykle wyrażane jako moc pozorna, w VA, pobierana przy określonym współczynniku mocy

i przy znamionowym prądzie wtórnym. Moc znamionowa odpowiada jednej z wartości następującego szeregu: 2,5; 5; 10; 15 i 30 VA, a jako znamionowy współczynnik mocy obciążenia ( $\cos\phi$ ) przyjmuje się wartość 0,8 o charakterze indukcyjnym.

Moc znamionowa – wartość mocy pozornej (w woltoamperach, przy określonym współczynniku mocy), którą przekładnik jest zdolny zasilac obwód wtórny przy znamionowym prądzie wtórnym i znamionowym obciążeniu.

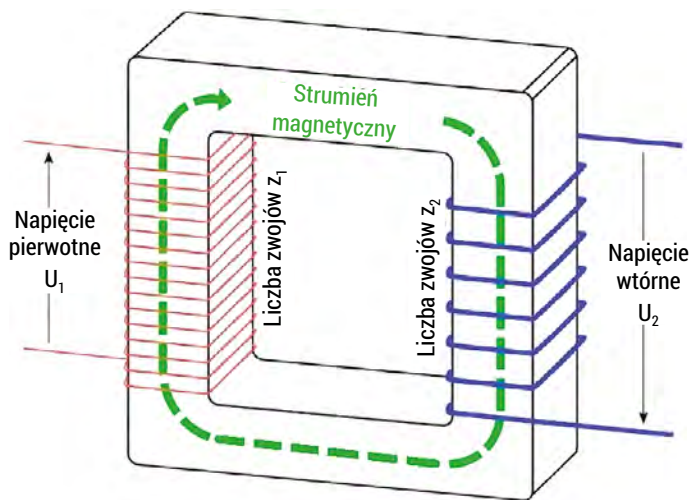
Znamionowy krótkotrwały prąd cieplny  $I_{th}$  – wartość skuteczna prądu pierwotnego, który przekładnik ze zwartymi uzwojeniami wtórnymi powinien wytrzymać bez uszkodzenia przez jedną sekundę.

Znamionowy długotrwały prąd cieplny – wartość prądu, który może trwale płynąć w uzwojeniu pierwotnym przy znamionowym obciążeniu uzwojenia wtórnego bez wzrostu temperatury ponad dopuszczalną wartość.

Znamionowy prąd dynamiczny  $I_{dyn}$  – wartość szczytowa prądu pierwotnego, który przekładnik ze zwartymi uzwojeniami wtórnymi powinien wytrzymać bez uszkodzenia elektrycznego lub mechanicznego w wyniku działania sił elektromagnetycznych.

## 1.2. Przekładniki napięciowe

Przekładniki napięciowe służą do transformacji napięcia na żądane napięcie znormalizowane, przeznaczone głównie do zasilania cewek napięciowych przyrządów pomiarowych i przekaźników. Zasada działania przekładników napięciowych jest analogiczna do zasady działania transformatorów mocy, z tym że ich moc jest wielokrotnie mniejsza, a praca odbywa się w stanie zbliżonym do stanu jałowego (rys. 2) [3].



RYŚ. 2. Schemat przedstawiający budowę przekładnika napięciowego

Do podstawowych parametrów przekładników napięciowych należą [2–4]:

1. Znamionowe napięcie pierwotne  $U_1$  – wartość napięcia pierwotnego, do którego odniesiona jest praca przekładnika, czyli maksymalna wartość napięcia mierzonego, jaka w normalnych warunkach może być przyłożona do uzwojenia pierwotnego.
2. Znamionowe napięcie wtórne  $U_2$  – wartość napięcia wtórnego, do którego odniesiona jest praca przekładnika, czyli wartość napięcia wtórnego odpowiadająca znamionowemu napięciu pierwotnemu. Jest to wartość normalizowana i wynosi zazwyczaj 110 V.
3. Przekładnia znamionowa – stosunek znamionowego napięcia pierwotnego do znamionowego napięcia wtórnego:

$$\vartheta_{U_n} = \frac{U_{1n}}{U_{2n}} = \frac{z_1}{z_2} \quad (3)$$

4. Przekładnia rzeczywista – stosunek rzeczywistego napięcia pierwotnego do rzeczywistego napięcia wtórnego.
5. Błąd napięciowy  $\Delta U_{\%}$  – błąd, który przekładnik wprowadza do pomiaru napięcia, wynikający z tego, że rzeczywista przekładnia nie jest równa przekładni znamionowej. Opisany jest on zależnością:

$$\Delta U_{\%} = \frac{U_2 \cdot \vartheta_U - U_1}{U_1} \cdot 100 \quad (4)$$

Błąd napięciowy ma dwie składowe. Jedna jest spowodowana przepływem prądu magnesującego przez uzwojenie pierwotne i spadkiem napięcia na impedancji strony pierwotnej. Składowa ta pojawia się w momencie podłączenia przekładnika do napięcia  $U_1$ . Druga składowa jest wywoływana przepływem prądu obciążenia i spadkiem napięcia na impedancji uzwojeń pierwotnych i wtórnych. Zależy ona od obciążenia przekładnika. W przekładnikach, w których przekładnia jest równa ilorazowi uzwojeń pierwotnego i wtórnego, błąd napięciowy jest zawsze ujemny. Przekładniki takie nazywa się nieskorygowanymi. Błędy napięciowe można zmniejszyć przez zastosowanie tzw. poprawki zwojowej, polegającej na dodaniu w uzwojeniu wtórnym kilku zwojów lub odjęciu odpowiedniej ich liczby w uzwojeniu pierwotnym, przy zachowaniu oznaczenia przekładni. Zastosowanie poprawki zwojowej powoduje przesunięcie charakterystyki w kierunku wartości dodatnich.

Błąd kątowy  $\delta_U$  – kąt fazowy między wektorami napięcia pierwotnego i wtórnego. Dodatni znak błędu oznacza, że wskaz napięcia wtórnego wyprzedza wskaz napięcia pierwotnego.

Klasa dokładności – oznaczenie związane z dopuszczalnymi błędami przekładnika napięciowego w określonych warunkach pracy. Znormalizowanymi klasami dokładności przekładników napięciowych pomiarowych są: 0,1; 0,2; 0,5; 1; 3. Wśród przekładników zabezpieczeniowych wyróżnia się dwie klasy dokładności oznaczone 3P oraz 6P.

Moc znamionowa – wartość mocy pozornej (w woltoamperach, przy określonym współczynniku mocy), którą przekładnik jest zdolny zasilac obwód wtórny przy znamionowym napięciu wtórnym i znamionowym obciążeniu.

Ciepłna moc graniczna – wartość mocy pozornej odniesiona do napięcia znamionowego, która może być pobierana z uzwojenia wtórnego w przypadku zasilania znamionowym napięciem pierwotnym bez przekroczenia dopuszczalnych przyrostów temperatury.

## 2. Cel i zakres ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z budową, zasadą działania oraz właściwościami eksploatacyjnymi przekładników prądowych i napięciowych. Zakres ćwiczenia obejmuje badanie wybranych przekładników, a w szczególności wyznaczenie ich błędów transformacji.

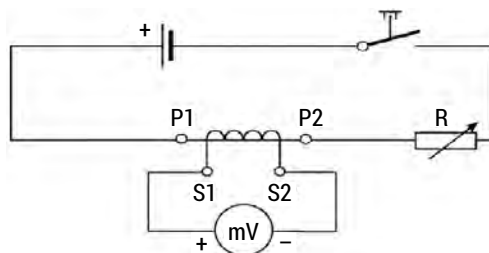
## 3. Program badań

### 3.1. Badanie przekładników prądowych

W ćwiczeniu należy sprawdzić poprawność działania wybranych przekładników prądowych. W tym celu należy wykonać:

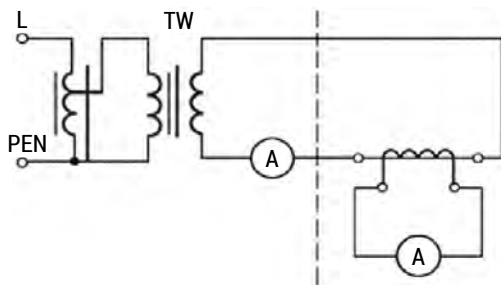
1. Oględziny zewnętrzne – przy pomocy wszystkich zmysłów należy sprawdzić stan techniczny i kompletność przekładnika prądowego. Ponadto należy spisać jego dane znamionowe.
2. Sprawdzenie poprawności oznaczenia zacisków przekładnika – należy podłączyć układ zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 3. Przy prawidłowym oznaczeniu zacisków przekładnika kierunek prądu w przyrządzie pomiarowym zasilanym za pośrednictwem tego przekładnika powinien być taki sam jak przy włączeniu go bezpośrednio do obwodu pomiarowego. Po zamknięciu łącznika powinno nastąpić wychylenie wskazówki woltomierza. Jeżeli oznaczenia zacisków są poprawne, to po zamknięciu obwodu ze źródłem prądu wskazówka przyrządu po stronie wtórnej przekładnika powinna wychylać się tak samo jak w przypadku bezpośredniego włączenia przyrządu do obwodu źródła,

tzn. w kierunku skali. Przy przerywaniu obwodu źródła za pomocą wyłącznika wskazówka przyrządu włączonego w obwód wtórny będzie wychylać się w stronę przeciwną niż poprzednio. Jeżeli wynik pomiaru jest zgodny z przyjętymi wyżej założeniami, to można uznać, że końcówki uzwojeń przekładnika oznaczone są poprawnie.



RYS. 3. Schemat układu pomiarowego do sprawdzenia oznaczeń zacisków przekładnika prądowego

3. Pomiar rezystancji uzwojeń przekładnika – pomiar należy wykonać przy pomocy odpowiedniego do spodziewanych wartości mostka.
4. Pomiar rezystancji izolacji – pomiar należy wykonać pomiędzy stroną pierwotną a wtórnią przekładnika prądowego przy wykorzystaniu megaomomierza. Napięcie probiercze powinno wynosić 500 V.
5. Pomiar błędów prądowych – pomiar należy wykonać przy obciążeniu obwodu wtórnego jednym amperomierzem (rys. 4). W obwodzie pierwotnym należy regulować natężenie prądu od 0,1 do 1,2 prądu znamionowego, z krokiem co 0,1  $I_n$ . Dla nastawionych wartości prądu pierwotnego należy odczytać prąd w obwodzie wtórnym, a następnie obliczyć błąd prądowy według zależności (2), a także przekładnię rzeczywistą.

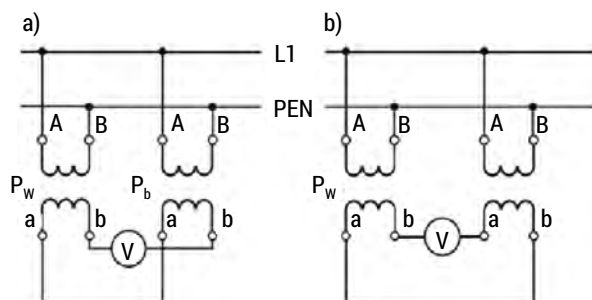


RYS. 4. Schemat układu pomiarowego do pomiaru błędów prądowych przekładnika prądowego przy obciążeniu jednym amperomierzem (TW – transformator wieloprądowy)

## 3.2. Badanie przekładników napięciowych

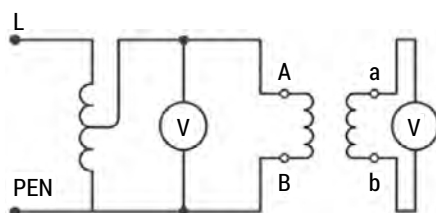
W ćwiczeniu należy sprawdzić poprawność działania wybranego przekładnika napięciowego. W tym celu należy wykonać:

1. Oględziny zewnętrzne – przy pomocy wszystkich zmysłów należy sprawdzić stan techniczny i kompletność przekładnika napięciowego. Ponadto należy spisać jego dane znamionowe.
2. Sprawdzenie poprawności oznaczenia zacisków przekładnika – należy podłączyć układ zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 5. W badanym przekładniku należy oznaczyć zaciski pierwotne i wtórne przekładnika badanego i połączyć go z przekładnikiem wzorcowym o tej samej przekładni. Jeżeli zaciski są oznaczone prawidłowo, woltomierz wskaże zero w układzie przedstawionym na rys. 5a oraz sumę napięć wtórnych w układzie podanym na rys. 5b.



RYS. 5. Schemat układu połączeń do badania prawidłowości oznaczeń zacisków przekładnika napięciowego:  $P_w$  – przekładnik wzorcowy,  $P_b$  – przekładnik badany

3. Pomiar błędów napięciowych – pomiary należy wykonać przy obciążeniu obwodu wtórnego jednym woltomierzem (rys. 6). W obwodzie pierwotnym należy regulować wartość napięcia pierwotnego od 0,6 do 1,2 napięcia znamionowego, z krokiem co 0,1  $U_n$ . Dla nastawionych wartości napięcia pierwotnego należy odczytać napięcie w obwodzie wtórnym, a następnie obliczyć błąd napięciowy według zależności (4), a także przekładnię rzeczywistą.



RYS. 6. Schemat układu pomiarowego do pomiaru błędów napięciowych przekładnika napięciowego przy obciążeniu jednym woltomierzem

### 3.3. Opracowanie wyników badań

Pomierzone i obliczone wartości należy zestawić w tabelach. Sporządzić wykresy błędów prądowych i napięciowych oraz przekładni rzeczywistych badanych przekładników. Określić sprawność techniczną badanych urządzeń oraz podać wnioski dotyczące zakresu ich stosowania.

## 4. Sprawozdanie studenckie

Sprawozdanie studenckie powinno zawierać:

1. Cel ćwiczenia.
2. Schematy układów pomiarowych.
3. Zestawienie wyników badań.
4. Obliczenia.
5. Wnioski.

## Literatura

1. *Poradnik Inżyniera Elektryka*, praca zbiorowa, WNT, Warszawa 2022 i wydania wcześniejsze.
2. Markiewicz H., *Urządzenia elektroenergetyczne*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2016.
3. Niestępski S., Parol M., Pasternakiewicz J., Wiśniewski T., *Instalacje elektryczne. Budowa, projektowanie i eksploatacja*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2019.
4. Leśniewska-Komęza E., *Przekładniki. Modelowanie z zastosowaniem numerycznych metod polowych*, WNT, Warszawa 2010.

# Ćwiczenie nr 13

## BADANIE WYŁĄCZNIKÓW INSTALACYJNYCH NADPRĄDOWYCH

### 1. Wiadomości wstępne

Wyłączniki nadprądowe są obecnie najczęściej używanymi urządzeniami ochronnymi przed przeciążeniem w instalacjach elektrycznych niskiego napięcia. Ich głównym celem jest zabezpieczanie przewodów i urządzeń elektrycznych używanych w domach i innych miejscach przed skutkami przetężenia, takimi jak zwarcia i przeciążenia. Pełnią również znaczącą funkcję w ochronie przed porażeniem prądem elektrycznym. Ich specyficzną cechą jest dwuczłonowa charakterystyka czasowo-prądowa, składająca się z wyzwalacza termicznego (opartego na termobimetalu) oraz wyzwalacza elektromagnetycznego [1].

Obecnie wytwarza się wyłączniki instalacyjne przeznaczone do montażu na standardowej szynie montażowej TH-35. Na rynku dostępne są także modele, które można zamontować w gniazdach bezpiecznikowych, znane jako wyłączniki instalacyjne wkrętkowe (rys. 1). Zazwyczaj są one wykorzystywane w istniejących, „starszych” instalacjach domowych.



RYŚ. 1. Przykładowy widok wyłącznika wkrętkowego (automatu bezpiecznikowego)

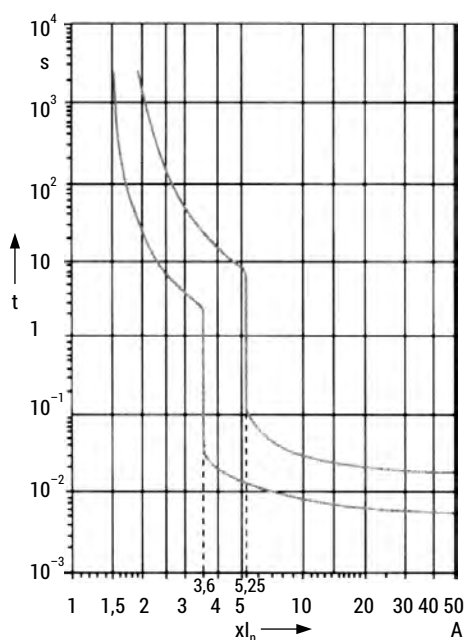
Wyłączniki wkrętkowe (tzw. automaty bezpiecznikowe) opisują trzy podstawowe charakterystyki czasowo-prądowe: L, U i K. Wyłączniki o charakterystykach L i U są przeznaczone do zabezpieczania przed skutkami zwarc i przeciążeń przewodów i kabli elektrycznych oraz odbiorników o małych prądach rozruchowych. Wyłączniki o charakterystyce typu K służą do ochrony silników [2].

Wyłączniki instalacyjne wkrętkowe charakteryzują się trzema wartościami prądów: prądem znamionowym (prądem charakteryzującym każdy z wyłączników), prądem cieplnym  $I_{th}$  (największą dopuszczalną wartością skuteczną prądu, który w określonych warunkach i w ciągu określonego czasu nie spowoduje zadziałania wyłącznika) oraz prądem charakterystycznym  $I_{ch}$  (graniczną wartością prądu niepowodującego zadziałania wyzwalacza przeciążeniowego). W tab. 1 przedstawiono wartości prądów opisujących najczęściej stosowane w instalacjach domowych automaty bezpiecznikowe.

TAB. 1. Parametry opisujące wyłączniki instalacyjne wkrętkowe o charakterystykach typu L i U

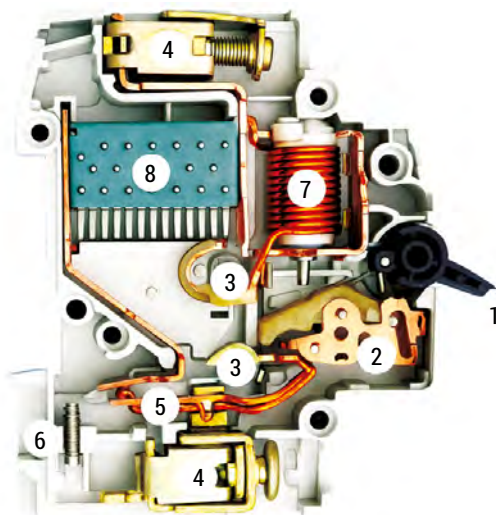
|                                                       |   |    |    |      |      |    |    |      |
|-------------------------------------------------------|---|----|----|------|------|----|----|------|
| <b>Prąd znamionowy <math>I_n</math> w A</b>           | 9 | 12 | 13 | 17   | 22   | 28 | 35 | 42   |
| <b>Prąd cieplny <math>I_{th2}</math> w A</b>          | 6 | 8  | 10 | 12   | 16   | 20 | 25 | 32   |
| <b>Prąd charakterystyczny <math>I_{ch}</math> w A</b> | 9 | 12 | 15 | 16,8 | 22,4 | 28 | 35 | 41,5 |

Na rys. 2 przedstawiona została charakterystyka czasowo-prądowa wyłącznika wkrętkowego typu L.



RYS. 2. Charakterystyka czasowo-prądowa wyłączników instalacyjnych typu L [3]

Zgodnie z obecnie obowiązującymi przepisami obowiązkowym wyposażeniem każdej instalacji odbiorczej oraz rozdzielczej są wyłączniki nadprądowe [3]. Przykładowy schemat budowy wyłącznika nadprądowego został przedstawiony na rys. 3.



RYS. 3. Budowa wyłącznika instalacyjnego (nadprądowego): 1 – dźwignia napędowa; 2 – zamek; 3 – styk stały i styk ruchomy; 4 – zaciski przyłączowe; 5 – wyzwalacz termobimetalowy (przeciążeniowy); 6 – korpus izolacyjny (obudowa); 7 – wyzwalacz elektromagnetyczny (zwarciov); 8 – komora gaszeniowa

Rozróżnia się trzy typy charakterystyk czasowo-prądowych wyłączników instalacyjnych w zależności od zakresu zadziałania wyzwalacza elektromagnetycznego [4]:

a) typ B:

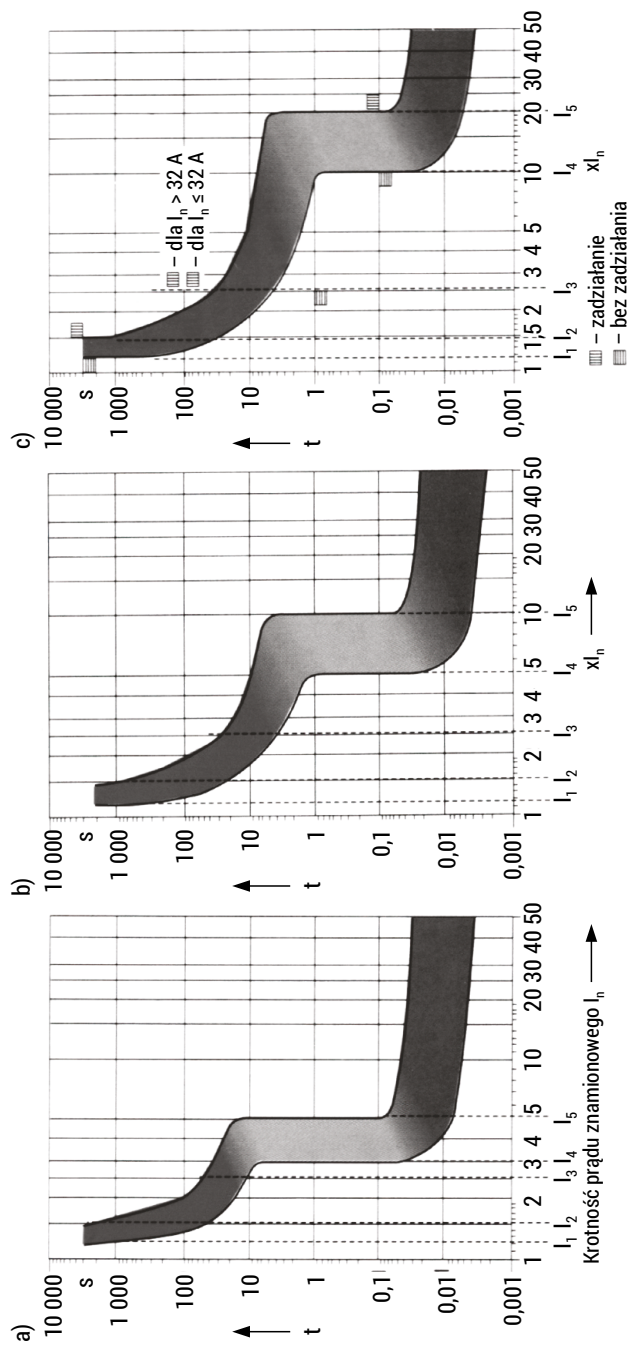
- przeznaczony do zabezpieczania przewodów i odbiorników w obwodach: oświetlenia, gniazd wtyczkowych i sterowania;
- prąd znamionowy od 4 do 63 A;
- granica zadziałania wyzwalacza termobimetalowego zawiera się w przedziale od 1,13 do 1,45-krotności prądu znamionowego wyłącznika (w temperaturze 30°C);
- obszar zadziałania wyzwalacza elektromagnetycznego wynosi od 3 do 5-krotności prądu znamionowego wyłącznika;

b) typ C:

- przeznaczony do zabezpieczania obwodów zasilających urządzenia elektroenergetyczne o dużych prądach rozruchowych (np. silniki, transformatory);
- prąd znamionowy od 0,3 do 63 A;

- granica zadziałania wyzwalacza termobimetalowego zawiera się w przedziale od 1,13 do 1,45-krotności prądu znamionowego wyłącznika (w temperaturze 30°C);
  - obszar zadziałania wyzwalacza elektromagnetycznego wynosi od 5 do 10-krotności prądu znamionowego wyłącznika;
- c) typ D:
- przeznaczony do zabezpieczania obwodów urządzeń elektroenergetycznych o bardzo dużych prądach rozruchowych, np. silników o ciężkim rozruchu (sprężnięte na stałe z odbiorem), transformatorów, grup lamp oświetleniowych;
  - prąd znamionowy od 0,3 do 63 A;
  - granica zadziałania wyzwalacza termobimetalowego zawiera się w przedziale od 1,13 do 1,45-krotności prądu znamionowego wyłącznika (w temperaturze 30°C);
  - obszar zadziałania wyzwalacza elektromagnetycznego wynosi od 10 do 20-krotności prądu znamionowego wyłącznika.

Na rys. 4 przedstawiono normatywne charakterystyki czasowo-prądowe typów B, C, D wyłączników instalacyjnych. Dla zakresu działania wyzwalacza zwarciovego i przeciążeniowego wyłącznika instalacyjnego wartości prądów powodujących działanie wyzwalacza nie powinny się różnić od wartości odczytanych z kształtu charakterystyki czasowo-prądowej.



RYS. 4. Charakterystyki czasowo-prądowe pasmowe wyłączników instalacyjnych: a) typu B; b) typu C; c) typu D [3]

## 2. Cel i zakres ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z zasadą działania oraz wybranymi parametrami wyłączników instalacyjnych nadprądowych. Zakres ćwiczenia obejmuje sprawdzenie zgodności charakterystyk czasowo-prądowych badanych wyłączników z charakterystykami określonymi w obowiązujących przepisach.

## 3. Stanowisko laboratoryjne

### 3.1. Badanie przekładników prądowych

Stanowisko laboratoryjne składa się układu zasilającego (złożonego z transformatora wielkoprądowego i dławika regulującego) oraz z części badawczej (złożonej z układu pomiarowego i badanych instalacyjnych wyłączników nadprądowych). Układ do wyznaczania charakterystyk czasowo-prądowych wyłączników instalacyjnych przedstawiono na rys. 5.



## 4. Program badań

W ćwiczeniu należy wyznaczyć charakterystyki czasowo-prądowe wskazanych przez prowadzącego wyłączników nadprądowych.

Przed przystąpieniem do pomiarów należy autotransformator ustawić w położeniu zerowym oraz podłączyć badany wyłącznik nadprądowy do układu pomiarowego. Następnie należy wyznaczyć współczynnik  $k$ , uwzględniający różnice w rezystancjach obwodu badanego oraz obwodu nastawczego. W tym celu należy:

1. Sprawdzić poprawność połączenia układu pomiarowego.
2. Wyłączyć badany wyłącznik nadprądowy.
3. Założyć cęgi amperomierza na przewód w obwodzie nastawczym.
4. Zewrzeć zaciski łącznika w obwodzie nastawczym.
5. Załączyć styczniki SG i S1.
6. Ustawić za pomocą autotransformatora prąd mniejszy do 20% od prądu znamionowego wyłącznika (oznaczyć go jako  $I_1$ ).
7. Wyłączyć stycznik S1.
8. Rozewrzeć zaciski łącznika w obwodzie nastawczym.
9. Załączyć badany wyłącznik nadprądowy.
10. Założyć cęgi amperomierza na przewód w obwodzie badanym.
11. Załączyć stycznik S1.
12. Odczytać wartość płynącego w badanym obwodzie prądu (oznaczyć go jako  $I_2$ ).
13. Wyłączyć styczniki SG i S1.
14. Obliczyć współczynnik  $k$  ze wzoru:

$$k = \frac{I_1}{I_2}$$

W celu wyznaczenia charakterystyki czasowo-prądowej danego wyłącznika nadprądowego, dla którego wyznaczono wartość współczynnika  $k$ , należy:

1. Założyć cęgi amperomierza na przewód w obwodzie nastawczym.
2. Wyłączyć badany wyłącznik nadprądowy.
3. Zewrzeć zaciski łącznika w obwodzie nastawczym.
4. Załączyć styczniki SG i S1.
5. Ustawić za pomocą autotransformatora żadaną wartość prądu zadziałania (zapisać go jako  $I$ ), pamiętając, że rzeczywisty prąd będzie się różnił od nastawionego o wartość współczynnika  $k$ .
6. Wyłączyć stycznik S1.
7. Rozewrzeć zaciski łącznika w obwodzie nastawczym.
8. Załączyć badany wyłącznik nadprądowy.
9. Zresetować zegar.
10. Załączyć stycznik S1.
11. Po zadziałaniu badanego wyłącznika nadprądowego jak najszybciej wyłączyć stycznik S1 oraz zapisać wartość zmierzonego czasu.

12. Pomiary powtarzać, zmniejszając wartość nastawianego prądu w obwodzie obciążeniowym o ok. 5 A aż do momentu, gdy czas zadziałania będzie dłuższy niż 2 minuty.

## 4.1. Opracowanie wyników badań

Zmierzone i obliczone wartości należy zestawić w tabelach. Sporządzić charakterystyki czasowo-prądowe badanych urządzeń przetężeniowych. Przeprowadzić analizę poprawności działania badanych wyłączników (zgodności otrzymanych wyników z wymaganiami przepisów i norm w tym zakresie).

## 5. Sprawozdanie studenckie

Sprawozdanie studenckie powinno zawierać:

1. Cel ćwiczenia.
2. Schematy układów pomiarowych.
3. Zestawienie wyników badań.
4. Charakterystyki czasowo-prądowe.
5. Wnioski.

## Literatura

1. *Poradnik Inżyniera Elektryka*, praca zbiorowa, WNT, Warszawa 2022 i wydania wcześniejsze.
2. Markiewicz H., *Urządzenia elektroenergetyczne*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2016.
3. Lejdy B., Sulkowski M., *Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych*, WNT, Warszawa 2019.
4. Markiewicz H., *Instalacje elektryczne*, WNT, Warszawa 2018.

# Ćwiczenie nr 14

## BADANIE ZJAWISK CIEPLNYCH I DYNAMICZNYCH PRZY PRZEPŁYWIE PRĄDÓW ZWARCIOWYCH

### 1. Wiadomości wstępne

#### 1.1. Prądy zwarciovowe

Przyczyny powstawania zwarć w instalacjach elektrycznych można podzielić na:

- elektryczne (np. przepięcia łączeniowe i atmosferyczne, długotrwałe przeciążenia prądowe),
- nieelektryczne (np. zawilgocenie izolacji, uszkodzenia mechaniczne przewodów i izolatorów, błąd ludzki).

Prądy zwarciovowe stanowią jedno z kluczowych zagadnień elektroenergetyki, ponieważ determinują zarówno sposób projektowania urządzeń i instalacji, jak i dobór zabezpieczeń oraz ocenę ich niezawodności. Są to prądy pojawiające się w wyniku nagłego obniżenia impedancji obwodu, zwykle spowodowanego połączeniem punktów o różnych potencjałach (bezpośrednio lub poprzez zewnętrzny element przewodzący). Wartość prądu zwarciovowego zależy przede wszystkim od impedancji źródła oraz elementów sieci, takich jak linie, kable i transformatory. Im mniejsza impedancja widziana z miejsca zwarcia, tym większy prąd zwarciovowy. Zjawisko to jest szczególnie istotne w sieciach wysokiego napięcia, gdzie źródła zasilania charakteryzują się bardzo niską impedancją wewnętrzną, co skutkuje wysokimi wartościami prądów zwarciovowych i wymaga stosowania odpowiednio wytrzymałych aparatów łączeniowych. Prąd zwarciovowy początkowy można wyznaczyć z zależności [1]:

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3 \cdot Z_u}} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_u^2 + X_u^2}} \quad (1)$$

gdzie:

$c$  – współczynnik równy liczbowo stosunkowi wartości napięcia, jakie może wystąpić w miejscu zwarcia przed pojawieniem się zwarcia, do napięcia znamionowego (dla sieci w których odchylenie napięcia wynosi  $\pm 10\%$ ,  $c = 1,1$ );

$U_n$  – napięcie znamionowe [kV];

$Z_u, R_u, X_u$  – impedancja, rezystancja, reaktancja zastępcza układu [ $\Omega$ ].

Zwarcia mogą mieć charakter symetryczny lub niesymetryczny [2]. Zwarcie trójfazowe, będące przypadkiem symetrycznym, jest najprostsze do analizy matematycznej i generuje najwyższe wartości prądów. W praktyce projektowej często traktuje się je jako punkt odniesienia przy ocenie wytrzymałości urządzeń. Zwarcia niesymetryczne – jednofazowe doziemne, dwufazowe oraz dwufazowe z ziemią – prowadzą do niesymetrycznych rozpliwów prądów i napięć, co wymaga stosowania metody składowych symetrycznych. Pozwala ona rozłożyć układ niesymetryczny na trzy niezależne układy symetryczne, co znacząco upraszcza analizę i umożliwia precyzyjne wyznaczenie prądów zwarciovych w każdej fazie.

Przebieg prądu zwarciovego w czasie ma charakter dynamiczny. W momencie powstania zwarcia pojawia się składowa udarowa, wynikająca z niesymetrycznego załączenia względem przebiegu sinusoidalnego. Składowa ta powoduje, że początkowy prąd zwarciovym może być nawet kilkakrotnie większy od wartości ustalonej. W kolejnych milisekundach prąd dąży do wartości wynikającej z impedancji obwodu, a jego przebieg zależy od parametrów elementów sieci, w tym od reaktancji i rezystancji. Prąd udarowy oblicza się z zależności [3]:

$$i_p = \sqrt{2} \cdot \kappa \cdot I_k'' \quad (2)$$

gdzie:

$\kappa$  – współczynnik udaru zależny od stosunku  $R_u$  i  $X_u$  obwodu zwarciovego, którego wartość można obliczyć ze wzoru:

$$\kappa \approx 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3R_u/X_u} \quad (3)$$

Wielkością służącą do oceny obciążenia cieplnego elementów sieci elektroenergetycznej podczas zwarcia jest zastępczy prąd zwarciovym cieplny. Określa on taki prąd o stałej wartości, jaki w zadanym przedziale czasowym wywołałby identyczny efekt cieplny co rzeczywisty, zmienny w czasie prąd zwarciovym. Wartość tego prądu wylicza się z zależności:

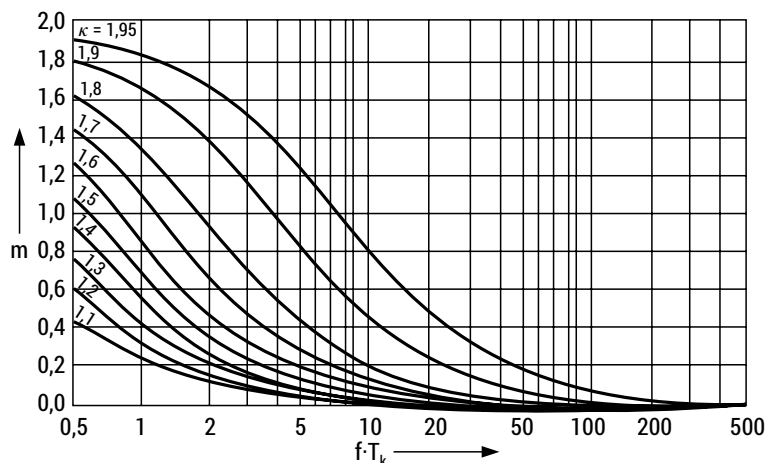
$$I_{th} = I_k'' \cdot \sqrt{m+n} \quad (4)$$

gdzie:

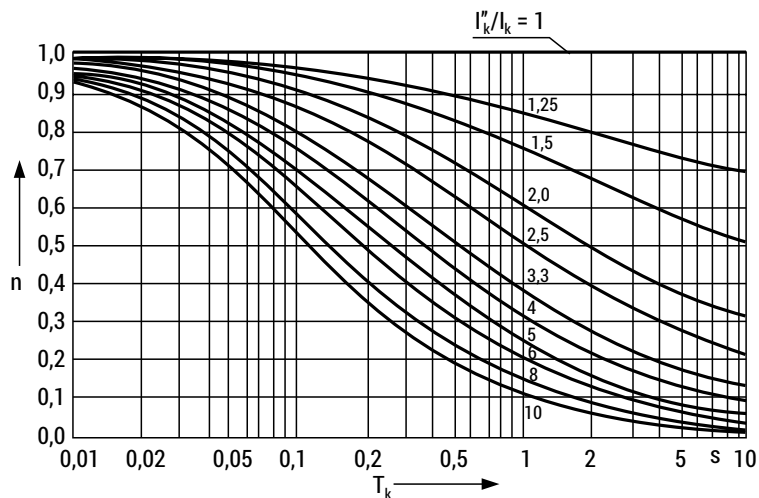
$m$  – współczynnik uwzględniający wpływ zmian składowej nieokresowej prądu zwarciovego;

$n$  – współczynnik uwzględniający wpływ zmian składowej okresowej prądu zwarcioowego.

Zależność wartości współczynnika  $m$  od czasu trwania zwarcia i częstotliwości sieci przedstawiono na rys. 1, natomiast wartości współczynnika  $n$  podano na rys. 2.



RYS. 1. Zależność wartości współczynnika  $m$  od iloczynu czasu trwania zwarcia i częstotliwości sieci dla różnych współczynników udaru:  $T_k$  – czas trwania zwarcia,  $\kappa$  – współczynnik udaru,  $f$  – częstotliwość sieci [2]



RYS. 2. Zależność wartości współczynnika  $n$  od czasu trwania zwarcia  $T_k$  i wartości prądu zwarcioowego:  $I_k''$  – prąd zwarcioowy początkowy,  $I_k$  – prąd zwarcioowy ustalony [2]

Zgodnie z aktualnie obowiązującymi przepisami należy przyjmować, że maksymalna temperatura występująca przy zwarceniu dla „gołych” szyn aluminiowych wynosi 200°C, a dla miedzianych 300°C.

## 1.2. Oddziaływanie cieplne prądów zwarciovych

Oddziaływanie cieplne prądów zwarciovych stanowi jeden z fundamentalnych mechanizmów degradacji elementów elektroenergetycznych podczas stanów awaryjnych. Wynika ono z gwałtownego wzrostu natężenia prądu, który w krótkim czasie prowadzi do intensywnego wydzielania energii cieplnej zgodnie z prawem Joule’a-Lenza. W praktyce prowadzi to do nagrzewania przewodów, uzwojeń, szyn zbiorczych oraz innych elementów przewodzących, a także do wzrostu temperatury izolacji, która jest szczególnie wrażliwa na przeciążenia termiczne.

Za najbardziej gwałtowne nagrzewanie materiałów przewodzących odpowiada składowa udarowa. Jeżeli czas trwania zwarcia jest zbyt długi, temperatura przewodników może przekroczyć dopuszczalne wartości, prowadząc do nieodwracalnych zmian strukturalnych, takich jak rekrytalizacja metali, utrata wytrzymałości mechanicznej czy uszkodzenie izolacji.

Minimalny przekrój przewodnika ze względu na oddziaływanie cieplne prądu zwarciovego wyznacza się z zależności:

$$s_{\min} = \frac{I_{\text{th}}}{s_{\text{thr}}} \sqrt{\frac{T_k}{T_{\text{kr}}}} \quad (5)$$

w której:

$I_{\text{th}}$  – zastępczy prąd zwarciovych cieplny;

$s_{\text{thr}}$  – dopuszczalna gęstość prądu zwarciovego;

$T_k$  – czas trwania zwarcia;

$T_{\text{kr}}$  – zastępczy czas cieplny.

## 1.3. Oddziaływanie dynamiczne prądów zwarciovych

Dynamiczne oddziaływanie prądów zwarciovych polega na generowaniu bardzo dużych sił elektrodinamicznych w elementach przewodzących na skutek przepływu prądu o wysokim natężeniu. W momencie wystąpienia zwarcia prąd gwałtownie rośnie, a towarzyszące mu pole magnetyczne zwiększa się proporcjonalnie do jego wartości. W układach wieloprzewodowych pola magnetyczne poszczególnych faz wzajemnie na siebie oddziałują, co prowadzi do powstawania sił przyciągających (gdy prądy płyną w tym samym kierunku) lub odpychających (gdy prądy płyną w przeciwnych kierunkach) między przewodnikami. Ponieważ siła elektrodinamiczna jest proporcjonalna do kwadratu prądu, nawet krótkotrwały impuls o dużej amplitudzie może

wywołać obciążenia mechaniczne przekraczające wytrzymałość konstrukcyjną elementów instalacji. W efekcie elementy, takie jak szyny zbiorcze, przewody, izolatory wsporcze czy połączenia śrubowe, są narażone na intensywne obciążenia dynamiczne, które mogą powodować ich odkształcenia, przemieszczenia, a w skrajnych przypadkach nawet uszkodzenia lub rozerwania [4].

Ocena dynamicznego oddziaływania prądów zwarciovych jest kluczowym elementem projektowania urządzeń elektroenergetycznych. Normy techniczne definiują pojęcie prądu zwarciovego dynamicznego, który odpowiada maksymalnej wartości prądu udarowego i służy do weryfikacji wytrzymałości mechanicznej elementów instalacji. Konstrukcja szyn, dobór ich przekrojów, odległości między fazami oraz sposób mocowania muszą zapewniać odporność na siły działające podczas zwarcia. W praktyce inżynierskiej uwzględnia się zarówno maksymalną wartość siły, jak i jej charakter impulsowy, ponieważ obciążenia te działają bardzo szybko i mogą wywołać uszkodzenia, zanim zadziałają zabezpieczenia.

Działanie siły na przewody powoduje występowanie w nich naprężeń zginających, jeżeli są to przewody sztywne. W przewodach giętkich występują ich naciągi i wychylenia.

Siły elektromagnetyczne działające między dwoma przewodami równoległymi można obliczyć w niutonach z zależności:

$$F = 0,2 \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot \frac{l}{a} \quad (6)$$

gdzie:

$l$  – odległość między podporami;

$i_1, i_2$  – wartości chwilowe prądów w przewodach;

$a$  – odstęp między osiami przewodów.

Wyznaczenie siły elektromagnetycznej w równolegle ułożonych szynach płaskich można przeprowadzić także na podstawie pomiarów ich strzałki ugięcia. Badane szyny można traktować jako belki umocowane sztywno dwustronnie i obciążone równomiernie na całej długości. Wartość siły oddziaływania elektromagnetycznego oblicza się według zależności:

$$F = \frac{384 \cdot E \cdot J \cdot f_y}{l^3} \quad (7)$$

w której:

$f_y$  – strzałka ugięcia;

$E$  – moduł sprężystości materiału szyny (dla aluminium twardego  $E = 0,68 \cdot 10^6$  daNcm<sup>-2</sup>, a dla miedzi  $1,15 \cdot 10^6$  daNcm<sup>-2</sup>);

$l$  – odstęp między podporami;

$J$  – moment bezwładności opisany równaniem:

$$J = \frac{h \cdot b^3}{12} \quad (8)$$

gdzie:

$h, b$  – wymiary przekroju poprzecznego toru prądowego.

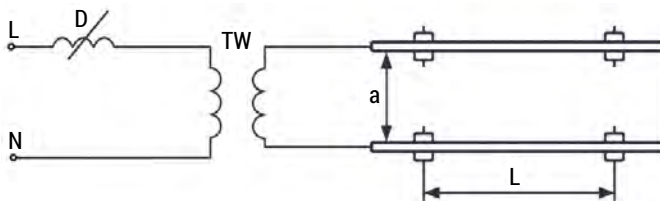
## 2. Cel i zakres ćwiczenia

Podczas ćwiczenia student ma ugruntować wiadomości dotyczące cieplnych i dynamicznych oddziaływań prądów zwarciovych na szyny zbiorcze, które stosuje się w rozdzielnicach elektroenergetycznych. Zakres ćwiczenia obejmuje wyznaczenie krzywych nagrzewania szyn podczas przepływu prądu przetężeniowego oraz wyznaczenie sił oddziałujących wówczas na układ równoległych szyn.

## 3. Program badań

### 3.1. Opis stanowiska

Stanowisko laboratoryjne składa się układu zasilającego szyny (transformatora wielkoprądowego i dławika regulującego) oraz z podstawy, na której równolegle zamontowane są dwie szyny: aluminiowa i miedziana (schemat układu przedstawiono na rys. 3). Zastosowana konstrukcja stanowiska umożliwia zmianę odległości pomiędzy szynami (poprzez odsunięcie jednej z szyn) oraz zmianę odległości pomiędzy izolatorami mocującymi zastosowane szyny (poprzez demontaż środkowej podpory).



RYS. 3. Układ zasilania szyny: TW – transformator wielkoprądowy, D – dławik regulacyjny

Stanowisko wyposażone jest w układ pomiarowy służący do pomiaru płynącego prądu (przy pomocy przekładnika prądowego 1000/5 A współpracującego z miernikiem ND20 – wartość prądu podawana jest w kA) oraz pomiaru temperatury szyn (przy wykorzystaniu czterech mierników typu P30U współpracujących z czujnikami

zamontowanymi na szynach). Na stanowisku znajdują się również dwa cyfrowe mierniki wychylenia (montowane do konstrukcji stanowiska przy pomocy podstaw magnetycznych) umożliwiające pomiar strzałki ugięcia.

### 3.2. Przebieg ćwiczenia

Na wstępie należy na podstawie posiadanej wiedzy teoretycznej określić, w którym punkcie pomiarowym temperatura szyn podczas przepływu prądu zwarciovego będzie najwyższa, a w którym najniższa (odpowiedź uzasadnić). Następnie, w celu zweryfikowania postawionej tezy badawczej, należy wyznaczyć charakterystyki nagrzewania oraz stygnięcia układu szynowego dla wartości prądu podanej przez prowadzącego, wykonując pomiary co 15 sekund. W sprawozdaniu omówić zaobserwowane różnice pomiędzy przyjętymi założeniami a otrzymanymi wynikami badań.

W ćwiczeniu należy dokonać pomiarów strzałki ugięcia (wychylenia) szyn przy przepływie prądu przez układ szynowy. Pomiary i obliczenia wykonać dla podanych przez prowadzącego wartości prądu w szynach zbiorczych oraz odległości pomiędzy osiami szyn. Powyższe pomiary należy wykonać w dwóch wariantach lokalizacji izolatorów wsporczych szyn. W pierwszym wariancie odległość pomiędzy izolatorami ma wynosić 65 cm, a w drugim wariancie – 130 cm. Uzyskane rezultaty należy porównać z wartościami uzyskanymi z obliczeń analitycznych.

### 3.3. Opracowanie wyników badań

Zmierzone i obliczone wartości należy zestawić w tabelach. Sporządzić wykresy nagrzewania się i stygnięcia szyn oraz wykresy sił elektromagnetycznych w funkcji wartości prądów zwarciovych.

## 4. Sprawozdanie studenckie

Sprawozdanie z ćwiczenia powinno zawierać:

1. Schemat badanego układu.
2. Zestawienie zmierzonych wielkości.
3. Wykresy nagrzewania i stygnięcia szyn  $\vartheta = f(t)$ .
4. Obliczenia sił działających na szyny z zależności (6) i (7).
5. Analizę otrzymanych wyników.
6. Wnioski.

## Literatura

1. PN-EN 60909-0:2016-09 *Prądy zwarciove w sieciach trójfazowych prądu przemiennego – Część 0: Obliczanie prądów.*
2. Kacejko P., Machowski J., Pijarski P., Smolarczyk A., *Zwarcia w systemach elektroenergetycznych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2022.
3. Wiatr J., *Praktyczne aspekty obliczania zwarć w sieciach oraz instalacjach elektrycznych niskiego napięcia. Niezbędnik elektryka*, Grupa Medium, 2021.
4. *Poradnik Inżyniera Elektryka*, praca zbiorowa, WNT, Warszawa 2022 i wydania wcześniejsze.

