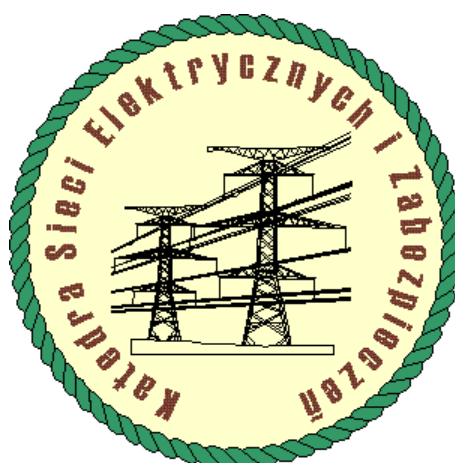


**Politechnika Lubelska**  
**Wydział Elektrotechniki i Informatyki**  
**Katedra Sieci Elektrycznych i Zabezpieczeń**



*Zrównoważenie prądów w obwodach różnicowych  
zabezpieczenia różnicowego transformatora*

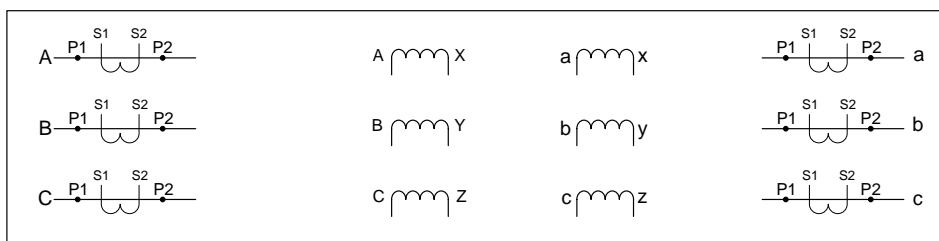
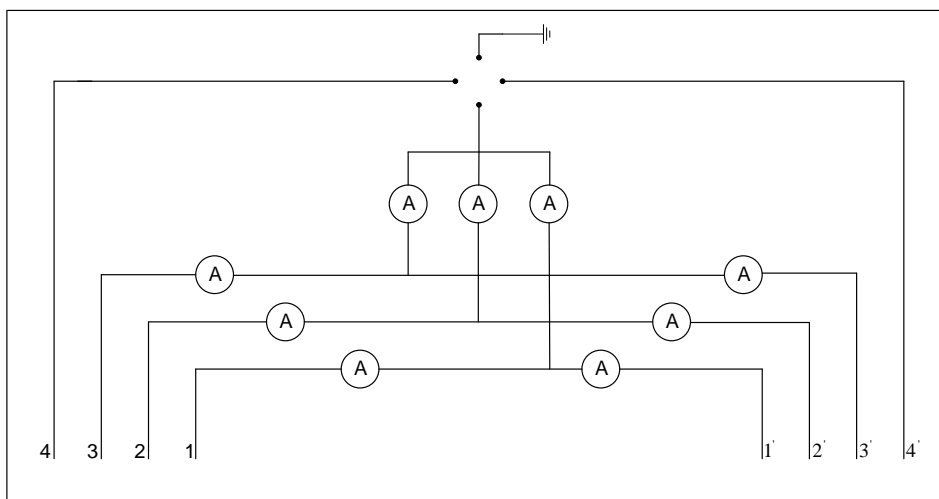
**Laboratorium  
EAZ**

**Celem ćwiczenia jest poznanie metody wyznaczania grup połączeń transformatorów, doboru układu różnicowego przekładników prądowych oraz wyznaczanie rozplywu prądów zwarciovych w transformatorze i układzie połączeń różnicowym przekładników prądowych.**

## Polecenia do wykonania w domu przed wykonaniem ćwiczenia.

Zaprojektować układu zabezpieczenia różnicowego wzdłużnego transformatora o grupie połączeń: 1) **Yd5**, 2) **Yd7**, 3) **Dy5**, 4) **Dy7**, 5) **Yy6**, 6) **Yy0**, 7) **Yd11\***.

- Zaznaczyć rozplyw prądów w uzwojeniach transformatora i obwodach wtórnych przekładników.
- Narysować wykresy wektorowe prądów płynących w uzwojeniach transformatora i w uzwojeniach wtórnych przekładników.



(\*) Grupę połączeń transformatora dla każdego studenta podaje prowadzący, lub wynika od kolejności studentów w grupie ćwiczącej.

## **1 Wprowadzenie**

Transformator jest jednym z droższych elementów układu energetycznego i w związku z tym należy odpowiednio dbać o jego żywotność. W celu wyeliminowania uszkodzenia transformatorów stosuje się liczne ich zabezpieczenia.

## **2 Zakłócenia w transformatorach**

### **2.1 Rodzaje zakłóceń w pracy transformatorów**

Zakłócenia w pracy transformatorów elektroenergetycznych mogą być spowodowane bądź uszkodzeniami tych transformatorów, bądź wynikać z nienormalnych warunków ich pracy.

Do najważniejszych zakłóceń należą zwarcia zewnętrzne, przeciążenia cieplne, zwarcia wewnętrzne w uzwojeniach oraz na wyprowadzeniach, przegrzanie rdzenia, uszkodzenia przełączników zaczepów, nieszczelność kadzi i radiatorów, zakłócenia w pracy pomp olejowych, wodnych lub wentylatorów powietrznych obiegu chłodzącego.

### **2.2 Zwarcia**

Zwarcia możemy podzielić na te wywołane w polu transformatora oraz zwarcia wewnątrz kadzi. Te pierwsze są mniej groźne dla samego transformatora, ale bardzo groźne dla stabilności systemu. Oczywiście, stopień zależy od tego, czy są to zwarcia trójfazowe, czy dwu- lub jednofazowe, a wartość prądu zwarciowego jest związana z poziomem mocy zwarciowej oraz napięcia w danym punkcie systemu i może być bardzo znaczna. Jeśli wartość tego prądu odnieść do znamionowego prądu transformatora, to największe krotności występują wówczas, gdy iloraz mocy zwarciowej i mocy znamionowej jednostki jest szczególnie duży, a więc gdy transformator o stosunkowo niewielkiej mocy pracuje w systemie o znacznej mocy zwarciowej.

Zwarcia wewnątrz kadzi mogą być zwarciami na wyprowadzeniach uzwojeń, zwarciami zwojowymi oraz zwarciami pomiędzy uzwojeniem, a kadzią. Pierwsze z nich, oprócz skutków takich jak te wywołane zwarciami w polu transformatora, powodują znaczny stopień uszkodzeń wewnątrz kadzi. Są one przyczyną zniszczenia izolacji, przewodów, a niekiedy i rdzenia. Mogą także spowodować znaczny wzrost ciśnienia wewnątrz kadzi, wywołany energią łuku, rozkładającą olej na produkty gazowe. Zwarcia te, podobnie do zwarć w polu charakteryzują się znacznymi prądami, więc są dość łatwo wykrywalne przez zabezpieczenia.

Zwarcia zwojowe mogą w skrajnych przypadkach dotyczyć jednego zwoju. Wówczas na skutek transformacji występuje takie zjawisko, że prąd w zwartych zwojach (czy też zwoju) osiąga gigantyczne wartości, na zaciskach zaś pojawia się jako niewielka wartość, często wielokrotnie mniejsza od prądu znamionowego. Istotnie, gdy zwarcie dotyczy jednego zwoju, prąd nim spowodowany, a mierzony na zaciskach transformatora, jest zbliżony do prądu znamionowego. Jeśli jednak zwarcie to wystąpi tylko w jednym równoległym przewodzie składającym się na uzwojenie, prąd zwarciovym mierzony na zaciskach transformatora może być mniejszy niż 10% prądu znamionowego. Natomiast poprzez łuk (bo są to zwarcia, które na ogół przekształcają się w łukowe) płynie ogromny prąd, niekiedy kilkakrotnie przewyższa prąd znamionowy. Spadek napięcia na występującym łuku ma zwykle wartość zbliżoną do 100V, a to pozwala oszacować energię wyładowującą się wewnątrz kadzi. Na każdą kilowatosekundę energii wydzielanej na łuku przypada ok.  $75 \text{ cm}^3$  gazu będącego produktem rozkładu oleju. Można zatem ocenić te ilości gazu powstające przy zwarcu zwojowym (grożące spowodowaniem wybuchu kadzi), mimo że wynik pomiaru prądu na zaciskach transformatora na to nie wskazuje. Jednocześnie prąd zwarciovym płynący przez uszkodzony zwój (lub zwoje) powoduje szybki wzrost temperatury przewodów. Osiągnięcie temperatury topnienia miedzi ( $1080 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) jest możliwe już po czasie 1 s.

Zwarcu wewnętrznemu między uzwojeniem a kadzią towarzyszy prąd zależny od liczby zwartych zwojów oraz od tego, czy punkt gwiazdowy jest uziemiony. Jeśli tak jest, to zwarcie można traktować jako zwarcie zwojowe pewnej liczby zwojów.

## 2.3 Przegrzanie uzwojeń

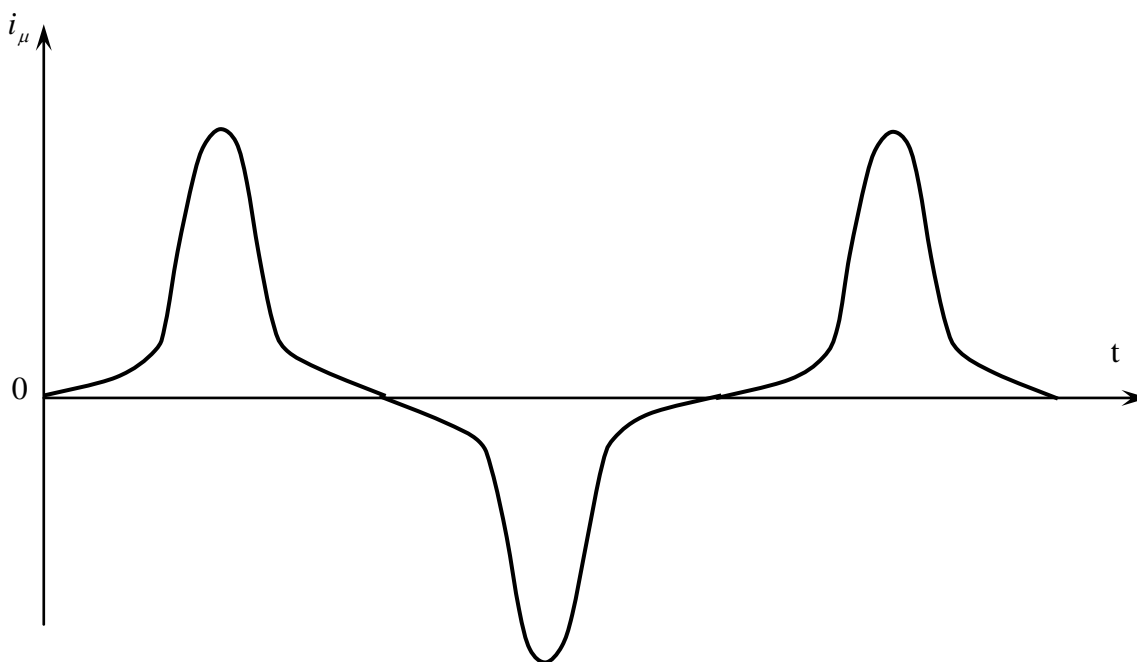
Energia wydzielana na rezystancji uzwojeń jest przyczyną wzrostu temperatury wewnątrz kadzi. Powstające ciepło jest oddawane izolacji stałej i olejowi, który przez system naturalnego, a nawet częściej wymuszonego obiegu oleju powoduje efekt chłodzenia. Najgorętsza jest wierzchnia warstwa oleju, ale ze względu na cieplne zagrożenie stanu izolacji istotniejsze jest to miejsce na powierzchni przewodu uzwojenia, w którym lokalnie temperatura osiąga największą wartość. W stanie normalnym temperatura górnej warstwy oleju może wynosić  $90^{\circ}\text{C}$ , co odpowiada temperaturze ok.  $105^{\circ}\text{C}$  w najgorętszym miejscu przewodu. Natomiast, jeśli temperatura górnej warstwy przekroczy  $105^{\circ}\text{C}$ , oznacza to, że najgorętszy punkt ma zapewne temperaturę ok.  $140^{\circ}\text{C}$  i można ją uznać za granicznie dopuszczalną. Taki wzrost temperatury może być wywołany przeciążeniem prądowym lub zmniejszeniem intensywności chłodzenia, np. na skutek całkowitego lub częściowego wyłączenia pomp wymuszających obieg oleju.

## 2.4 Nadmierny strumień w rdzeniu

Rdzenie współczesnych transformatorów, w których maksymalna znamionowa indukcja sięga  $1,6 \div 1,75 \text{ T}$ , pracują blisko poziomu nasycenia, wynoszącego  $2 \div 2,1 \text{ T}$  dla zimnowalcowanych blach transformatorowych. Jeśli w czasie pracy indukcja ulegnie zwiększeniu na skutek wzrostu napięcia i/lub zmniejszenia częstotliwości, to nastąpi zjawisko nasycania się rdzenia, zwłaszcza w tych jego częściach, gdzie występują zwężenia przekroju. Podczas nasycenia zmienia się rozptył strumienia i zwiększa jego część zamykającą się przez powietrze. Jest to szczególnie groźne w otoczeniu śrub mocujących, przez które w normalnych warunkach przepływa część strumienia. Po nasyceniu sytuacja ulega zmianie, gdyż większy strumień przechodzący przez stalowe, lite śruby powoduje powstawanie znacznych prądów wirowych i nagrzewanie się tych fragmentów konstrukcji. Wzrost temperatury może być tak duży, że zostaną zniszczone podkładki izolujące konstrukcję od rdzenia, tworzące diamagnetyczną przegrodę dla strumienia. Mogą więc powstawać lokalne obszary, w których nawet po zmniejszeniu indukcji strumień przechodzi przez elementy, wywołując w nich nadal znaczne prądy wirowe i nagrzewając je. Taki długotrwały stan podwyższa tempe-

ratę w sąsiedztwie izolacji przewodów, prowadząc zarówno do jej stopniowego osłabienia, a niekiedy nawet do zwarć wewnętrznych, jak i do skrócenia trwałości użytkowej transformatora. Z tego względu dopuszczanie długotrwałego wzrostu indukcji w rdzeniu powyżej granicy 2 T jest dla transformatora groźne.

Rozpatrując pomiar prądu na zaciskach transformatora należy stwierdzić, że nadmierna wartość strumienia powiększa prąd magnesowania, który w warunkach normalnych, przy parametrach znamionowych, ma bardzo małą wartość (w nowoczesnych, dużych transformatorach najczęściej mniej niż 1% prądu znamionowego). Jednak dziesięcioprocentowy wzrost indukcji w rdzeniu powoduje przeważnie trzykrotny wzrost tego prądu, natomiast zwiększenie indukcji o 20% - aż dziesięciokrotny wzrost jego wartości skutecznej. Jednocześnie następuje zwiększenie zawartości wyższych harmonicznych nieparzystych w przebiegu tego prądu (typowy kształt fali prądu magnesującego jedną kolumnę przedstawia rysunek 2.1).



Rys. 2.1 Kształt prądu magnesowania przy nadmiernej indukcji w rdzeniu

W skrajnych przypadkach nadmiernej indukcji w rdzeniu, wartość skuteczna prądu magnesowania nie przekracza poziomu 50% prądu znamionowego, a wartość piątej harmonicznej (najbardziej typowej dla tego zjawiska) utrzymuje się na poziomie 30 ÷ 50% jego pierwszej harmonicznej.

## 2.5 Udarowe prądy magnesowania

Jeśli na zaciskach transformatora pojawi się napięcie sinusoidalne

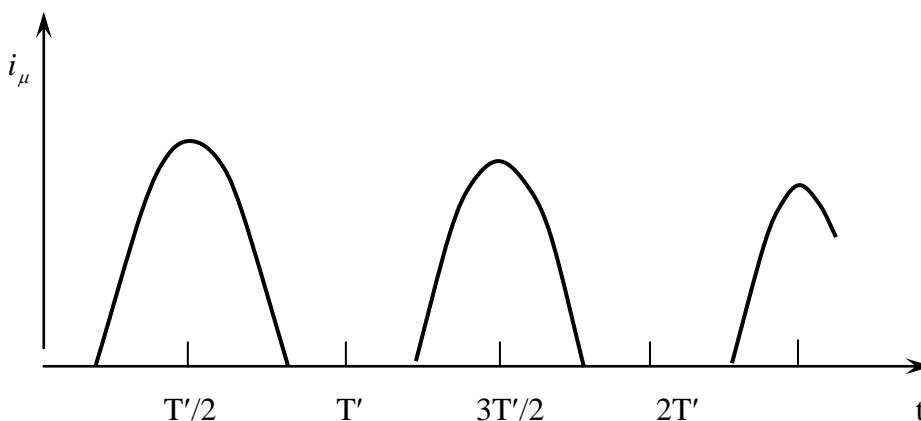
$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.1)$$

to strumień skojarzony z tym uzwojeniem można opisać równaniem

$$\Psi = \int_0^t u dt = \frac{1}{\omega} U_m [\cos \varphi - \cos(\omega t + \varphi)] + \Psi_R \quad (2.2)$$

gdzie  $\Psi_R$  - strumień skojarzony, wywołany przez indukję szczątkową w rdzeniu.

Tak więc strumień (a zatem i indukcja magnetyczna) składa się z przebiegu sinusoidalnego nałożonego na składową stałą. Powoduje to przekroczenie przez indukcję granicy nasycenia i pojawienie się tzw. udarowych prądów magnesowania. Kształt takiego prądu magnesującego jedną kolumnę pokazano na rys. 2.2



Rys. 2.2 Kształt udarowego prądu magnesowania (jednej kolumny)

Na powstawanie udarowych prądów magnesowania podczas załączania transformatora nieobciążonego wpływ mają następujące czynniki:

- trudność ustalenia wartości i kierunku strumienia magnetyzmu szczątkowego w każdej z kolumn;
- wpływ kolumny z nasyconym obwodem magnetycznym na reluktancje pozostałych kolumn;
- zależność przebiegu prądu udarowego od układu połączeń;
- możliwość niejednoczesnego zetknięcia się styków łącznika w każdej z faz.

Prąd udarowy charakteryzuje się następującymi właściwościami:

- wartość maksymalna i skuteczna są porównywalne z wartością prądu płynącego przez transformator przy zwarcu zewnętrznym;
- zanika na skutek strat energii na rezystancjach układu, ale wartość przekraczająca poziom prądu znamionowego transformatora może utrzymywać się przez czas rzędu 1s;
- występują w nim wyższe harmoniczne nieparzyste i parzyste, z których najbardziej znamioną jest druga harmoniczna; przy największych wartościach prądu udarowego względna wartość tej harmonicznej, odniesiona do harmonicznej podstawowej, może wynosić zaledwie  $10 \div 15\%$ , ale jest to przypadek rzadki; w praktyce najczęściej nie jest mniejsza niż 20%, przy zmniejszaniu się prądu udarowego względna wartość tej harmonicznej zwiększa się do ok. 80%.

### 3 Rodzaje zabezpieczeń transformatorów

Znaczne koszty budowy i eksploatacji transformatora powodują, że im większa jest jego moc oraz wyższe napięcie znamionowe, tym w bogatszy i lepszy zestaw zabezpieczeń jest on wyposażony. Poza tym o doborze zabezpieczeń decydują również warunki eksploatacji i znaczenia ruchowe danego transformatora dla układu elektroenergetycznego.

Dobrze dobrany zestaw zabezpieczeń musi chronić transformator od zakłóceń występujących zarówno na zewnątrz, jak i wewnątrz samego transformatora w czasie jego pracy. Ogólnie zabezpieczenia te dzieli się na:

- zabezpieczenia od przeciążeń ruchowych;
- zabezpieczenia od zwarć zewnętrznych;
- zabezpieczenia od zwarć i uszkodzeń wewnętrznych.

#### 3.1 Zabezpieczenia od przeciążeń ruchowych

Zabezpieczenie od przeciążeń ruchowych powinno zapewnić ochronę transformatora od szkodliwych dla jego izolacji przegrzań, ale jednocześnie powinno pozwolić na wykorzystanie faktu, że każdy transformator można poddać przeciążeniu bez szkody dla niego samego.

Uwzględniając dopuszczalną przeciążalność transformatorów dopuszcza się wyłączanie transformatorów po czasie dostatecznie długim, aby uzyskać wybiórczość zadziałania zabezpieczeń, bądź stosuje się tylko sygnalizowanie przeciążeń, jeżeli stacja ma stałą obsługę. Personel stacji dysponuje zwykle dostatecznie długim czasem, aby wykonać przełączenia niezbędne do odciążenia transformatora, przy jednoczesnym zachowaniu ciągłości ruchu. Dopuszczalną przeciążalność transformatora w zależności od warunków jego pracy powinien określić wytwórca. Przeciążalność tą można również określić na podstawie uzgodnionych z wytwórcą pomiarów eksploatacyjnych.

Zabezpieczenia należące do powyższej grupy mogą reagować na rozmaite wielkości fizyczne (prąd, temperaturę itp.). W transformatorach o mocach większych niż 16 MV·A wyposażonych w chłodnice, przeciążenia termiczne uzwojeń mogą przekraczać dopuszczalne wartości nawet w transformatorach niedociążonych. Wynika to z zakłóceń obiegu czynnika chłodzącego.

Dla ochrony transformatora od przeciążeń ruchowych stosuje się następujące rodzaje zabezpieczeń:

- zabezpieczenie nadprądowe niezależne zwłoczne;
- zabezpieczenie nadprądowe zwłoczne, zależne;
- zabezpieczenie termometryczne;
- wskaźnik max temperatury typu „Bewag”;
- model cieplny.

### **3.1.1 Zabezpieczenie nadprądowe niezależne zwłoczne**

Zabezpieczenie nadprądowe niezależne zwłoczne jest najprostszym zabezpieczeniem przeciążeniowym transformatora. Niestety reaguje ono jedynie na zmiany wartości prądu obciążenia transformatora, co nie zawsze ma realne odzwierciedlenie rzeczywistych zmian temperatury uzwojeń i oleju. Stosuje się je jako zabezpieczenie jednofazowe ze względu na symetryczny charakter obciążenia powodującego zadziałanie sygnalizacji. Jest ono zasilane z obwodów prądowych wspólnych z zabezpieczeniem przeciążeniowym (od zwarć zewnętrznych). Zwłokę czasową tego zabezpieczenia ustawia się zazwyczaj w zakresie 6÷12 s, a czasem 20 s. Krótsze czasy stosuje się dla stacji bez obsługi, a dłuższy z obsługą.

Wartość rozruchową takiego zabezpieczenia określa się przy użyciu poniższego wzoru [1].

$$I_r \geq (k_b \cdot I_n) / k_p \quad (3.1)$$

gdzie:

$k_b$  - 1,05 (współczynnik bezpieczeństwa);

$k_p$  - 0,9 (współczynnik powrotu przekąźnika).

### **3.1.2 Zabezpieczenie nadprądowe zwłoczne zależne**

W celu umożliwienia wykorzystania transformatora przy jednoczesnym zachowaniu ciągłości ruchu i braku zbędnej sygnalizacji przeciążenia przez zabezpieczenie niezależne zwłoczne, można wykorzystać zabezpieczenia nadprądowe zwłoczne zależne. Najprostszym zabezpieczeniem nadprądowym zwłocznym zależnym jest układ składający się z dwóch przekąźników czasowych o różnych nastawieniach prądu rozruchowego i opóźnienia czasu działania.

Przełącznik nadprądowy z niższym nastawieniem prądu rozruchowego działa z długim czasem, a przełącznik nadprądowy z wyższym nastawieniem prądu rozruchowego działa z krótkim czasem. Zabezpieczenie to nie reaguje jednak na wzrost temperatury oleju spowodowany innymi przyczynami (poza przeciążeniem prądowym), jak:

- zakłócenie w obiegu czynników chłodzących;
- wzrost strat w żelazie;
- nadmierne nagrzewanie kadzi transformatora spowodowane czynnikami zewnętrznymi.

Zabezpieczenie to nie jest powszechnie stosowane w rozwiązaniach przyjętych w polskiej energetyce zawodowej z powodu braku krajowych przełączników nadprądowych zwłocznych zależnych, dobrze odtwarzających charakterystyki nagrzewania się oleju i uzwojeń transformatora.

### **3.1.3 Zabezpieczenie termometryczne**

Zabezpieczenie to składa się z jednego lub dwu termometrów, które poprzez pomiar temperatury oleju powodują załączenie sygnalizacji, chłodzenia lub wyłączenie transformatora. W zależności od mocy znamionowej transformatory są wyposażone :

- termometr wskazujący dla  $S_{NTr} < 0,315 \text{ MV}\cdot\text{A}$ ;
- termometr wskazujący ze wskaźnikiem maksymalnej temperatury dla  $S_{NTr} < 0,315 \text{ MV}\cdot\text{A}$ ;
- termometr wskazujący kontaktowy jednostykowy ze zdalną sygnalizacją maksymalnej temperatury uzwojenia lub oleju dla  $S_{NTr} < 0,10 \text{ MV}\cdot\text{A}$ ;
- termometr wskazujący kontaktowy dwustykowy, ze zdalną sygnalizacją przekroczenia dopuszczalnych temperatur dla  $S_{NTr} < 0,10 \text{ MV}\cdot\text{A}$ ;
- zestaw dwóch termometrów wskazujących kontaktowych współpracujących z układem chłodzenia transformatora i zdalną sygnalizacją przekroczenia dopuszczalnych temperatur dla  $S_{NTr} < 16 \text{ MV}\cdot\text{A}$ .

Zestaw termometrów nastawiany jest na następujące temperatury:

- 55°C - uruchomienie pierwszej grupy wentylatorów;

- 65°C - sygnalizacja zadziałania pierwszego stopnia zabezpieczenia termometrycznego;
- 75°C - uruchomienie drugiej grupy wentylatorów;
- 85°C - sygnalizacja i wyłączenie przez drugi stopień zabezpieczenia termometrycznego.

#### **3.1.4 Wskaźnik maksymalnej temperatury typu „Bewag”**

Zabezpieczenie typu „Bewag” jest również zabezpieczeniem termometrycznym wykonanym nieco inaczej niż poprzednio omówione zabezpieczenia termometryczne. Jest to wyzwalacz cieplny, którego głównym elementem jest nastawiony w zakresie od 60° do 140° termobimetal w kształcie litery „U”, osłonięty perforowaną osłoną izolacyjną. Styki wyzwalacza muszą pracować w oleju, dlatego jest on przystosowany do bezpośredniego zanurzenia w kieszeni na pokrywie kadzi transformatora. Kieszeń tą napelnia się olejem do poziomu około 35 mm poniżej górnej krawędzi kieszeni.

Nastawienie wartości wymaganej temperatury odbywa się za pomocą obrotowej tarczy (zazwyczaj jest to wartość 95°C lub 105°C). Przy odpowiednim do wartości nastawionym przyroście temperatury w górnej warstwie oleju w kadzi transformatora, następuje wygięcie termobimetalu powodujące zamknięcie obwodu elektrycznego, w którym pracują zestyki wskaźnika maksymalnej temperatury. W przypadku zadziałania tego zabezpieczenia, można skasować sygnalizację zadziałania wskaźnika i przygotować go do dalszej pracy dopiero po obniżeniu się temperatury oleju.

#### **3.1.5 Model cieplny**

Najciekawszym i najdoskonalszym zabezpieczeniem transformatorów od przeciążeń ruchowych jest model cieplny tego transformatora. Model cieplny jest wykonywany w postaci niewielkiego naczynia, które jest przymocowane do pokrywy kadzi transformatora i jest zanurzone w oleju wypełniającym kadełko. Wewnątrz tego naczynia znajduje się termometr oporowy otoczony uzwojeniem grzejnym, zasilany prądem proporcjonalnym do prądu płynącego przez uzwojenie transformatora z obwodu wtórnego jednego z przekładników prądowych nakładkowych zainstalowanych na izolatorach przepustowych transformatora.

Rezystancja uzwojenia grzejnego jest tak dobrana, aby przy znamionowym obciążeniu transformatora podgrzało ono termometr oporowy do temperatury uzwojenia, która jest o 10 - 20°C wyższa od temperatury otaczającego oleju. Stała czasowa modelu cieplnego wynosi 6 - 10 min. i odwzorowuje w skali stałą czasową uzwojenia transformatora. W takich warunkach temperatura mierzona przez termometr oporowy jest prawie wierną kopią temperatury uzwojenia transformatora przy dowolnych zmianach obciążenia. Termometr steruje przełącznikiem, który podaje impuls na sygnalizację lub na sygnalizację i wyłączenie.

### **3.2 Zabezpieczenia od zwarć zewnętrznych**

Innym rodzajem zakłóceń mogących wystąpić w pracy transformatorów są zwarcia zewnętrzne. Podczas wystąpienia tego typu zakłóceń prąd płynący przez transformator może osiągać znaczne wartości, które zależą od mocy znamionowej transformatora (im większa moc tym większe prądy) i odległości do miejsca zwarcia (im dalej zwarcie tym mniejszy prąd). Szczególnie niebezpieczne dla transformatorów dużej mocy są zwarcia w bliskich odległościach od niego, gdyż prąd płynący wtedy może osiągnąć wartość nawet 20 krotną prądu znamionowego. Taka wartość prądu powoduje powstanie olbrzymich sił dynamicznych i wydzielenie się ciepła w takiej ilości, że gdyby nie ograniczyć czasu przepływu lub jego wartości nastąpiłoby zniszczenie transformatora w kilka sekund. Ponieważ transformator jest urządzeniem drogim i ważnym, w całym systemie stosuje się zabezpieczenia mające za zadanie jego ochronę przed wyżej wymienionymi skutkami. Jednocześnie stanowią one rezerwę dla zabezpieczeń pól odpiływowych rozdzielni, którą zasila transformator. Stanowią również rezerwę zabezpieczeń od zwarć wewnętrznych transformatora i element blokady SZR sprzęgła. Wśród tego typu zabezpieczeń możemy wyróżnić:

- zabezpieczenie nadprądowe zwłoczne;
- zabezpieczenie nadprądowe zwłoczne z blokadą napięciową;
- zabezpieczenie odległościowe;
- zabezpieczenie ziemnozwarciowe.

### 3.2.1 Zabezpieczenie nadprądowe zwłoczne

Zabezpieczenie nadprądowe zwłoczne jest zwane często zabezpieczeniem rezerwowym, ponieważ stanowi rezerwę nie tylko dla zabezpieczeń podstawowych transformatora, lecz także dla pól odpływowych zasilanej stacji. Transformatory redukcyjne, które zasilają rozdzielnie w normalnych warunkach nie zasilane z innych źródeł energii elektrycznej, wystarczy wyposażyć w powyższe zabezpieczenie po stronie zasilania. Często ze względów dokładniejszej lokalizacji miejsca uszkodzenia stosuje się zabezpieczenie nadprądowe zwłoczne po wszystkich stronach transformatora. Transformatory pracujące w stacjach, w których istnieje możliwość obustronnego zasilania powinny być wyposażone w zabezpieczenie nadprądowe zwłoczne osobne dla każdego uzwojenia transformatora lub w jedno zabezpieczenie od strony większej mocy zwarciowej działające:

- jednocześnie na obustronne wyłączenie wyłączników;
- kaskadowo tzn. najpierw na wyłączenie wyłącznika od strony mniejszej mocy zwarciowej, a następnie po odpowiedniej zwłoce czasowej na wyłączenie drugiego wyłącznika.

Najczęściej transformatory dwu i trójuzwojeniowe zaopatruje się w dwa lub trzy niezależne komplety zabezpieczeń, przy czym zabezpieczenie strony DN i SN działają tylko na wyłączenie przynależnego do tej strony wyłącznika, a zabezpieczenie strony GN działa na wyłączenie wszystkich wyłączników w polu transformatora. Każdy z przełączników nadprądowo - zwłocznych zainstalowanych po stronie GN, SN, DN transformatora zasilany jest z osobnego obwodu napięcia sterowniczego. Ponadto wykorzystując fakt, że wyłączniki strony SN i DN transformatora posiadają dwie niezależne cewki wyłączające, przeznacza się pierwszą cewkę wyłączającą do współpracy z zabezpieczeniem strony DN lub SN transformatora. Drugą cewkę w obu wyłącznikach stosuje się do współpracy z zabezpieczeniami strony GN transformatora. Dzięki temu zwiększa się niezawodność działania zabezpieczeń i skuteczność wyłączania zwarc zewnętrzných.

Omawiane zabezpieczenie nadprądowe realizuje się w zasadzie jako trójfazowe przy wykorzystaniu trzech przekładników prądowych połączonych w układ pełnej gwiazdy. Jedynie dla transformatorów o mocy poniżej 5 MVA dopuszcza się wykonanie tego zabezpieczenia w układzie dwufazowym, o ile zapewni ono właściwą czułość zabezpieczenia przy wszystkich rodzajach zwarc zewnętrzných, zwłaszcza w przypadku transformatorów o grupie połączeń Dy.

Prąd rozruchowy zabezpieczenia dobiera się na podstawie poniższego wzoru

$$I_r \geq (k_b k_r k_s I_{\max}) / k_p \vartheta_i \quad (3.2)$$

gdzie:

$k_b$  - współczynnik bezpieczeństwa (1,2);

$k_r$  - współczynnik krotności rozruchu silników (2÷6);

$k_s$  - współczynnik schematu uzależniony od sposobu połączenia przekładników prądowych (1 lub  $\sqrt{3}$ );

$k_p$  - współczynnik powrotu przekaźnika (0,85÷0,98);

$I_{\max}$  - maksymalna dopuszczalna wartość prądu obciążenia;

$\vartheta_i$  - przekładnia przekładników prądowych.

Zwłokę czasową zabezpieczenia przyjmuje się możliwie najkrótszą, tak jednak, aby zapewnić wybiórczą pracę tego zabezpieczenia w stosunku do zabezpieczeń zainstalowanych w polach odpływowych rozdzielni zasilanej przez transformator. Jednocześnie nie należy przekraczać określonego dla transformatora przez producenta dopuszczalnego czasu przepływu prądów zwarcia. Czułość zabezpieczenia nadprądowego zwłocznego transformatora sprawdza się porównując wartość współczynnika czułości wyliczoną ze wzoru z wymaganą przez przepisy.

$$k_c \geq I_{zmin} / I_r \quad (3.3)$$

gdzie:

$I_{zmin}$  - najmniejsza wartość prądu zwarcia;

$k_c$  - współczynnik czułości zabezpieczenia nie powinien być mniejszy od:

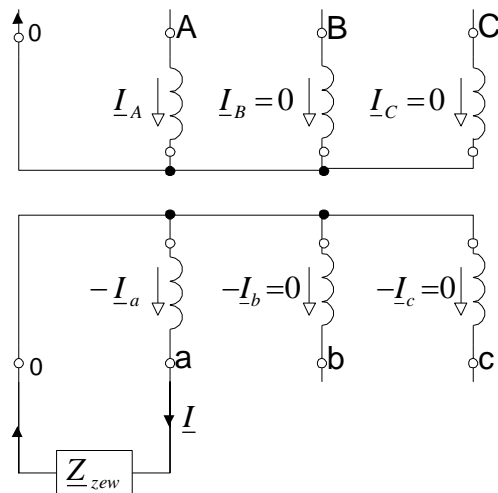
1,5 - dla zabezpieczeń podstawowych;

1,2 - dla zabezpieczenia rezerwowego.

Wartość  $I_{zmin}$  nie jest wartością stałą dla wszystkich transformatorów, lecz jest uzależniona od sposobu połączenia uzwojeń transformatora oraz od sposobu jego zainstalowania w sieci elektroenergetycznej (uzależnione jest od wyprowadzenia punktu zerowego uzwojenia).

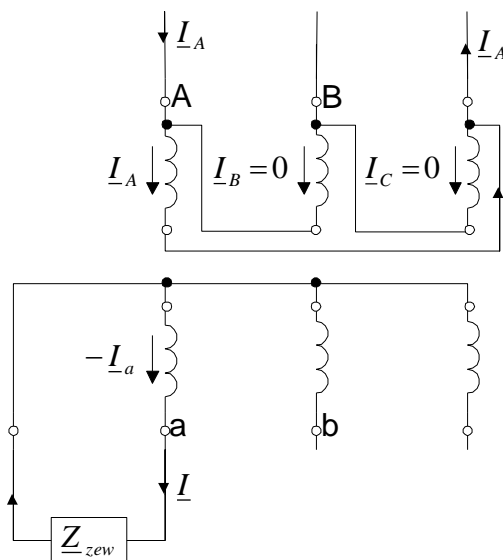
Dla transformatorów z wyprowadzonym punktem zerowym po stronie wtórnej:

- przy układzie połączeń gwiazda – gwiazda:



$$I_{Z \min} \approx 4,5 I_n ; \quad (4.4)$$

- przy układzie połączeń trójkąt – gwiazda:

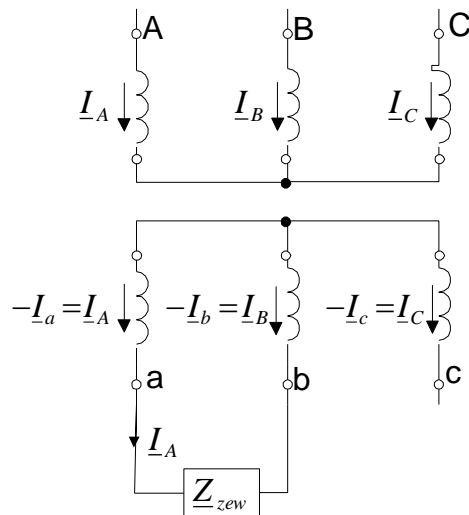


$$I_{Z \min} = \frac{100}{u_z} I_n \quad (4.5)$$

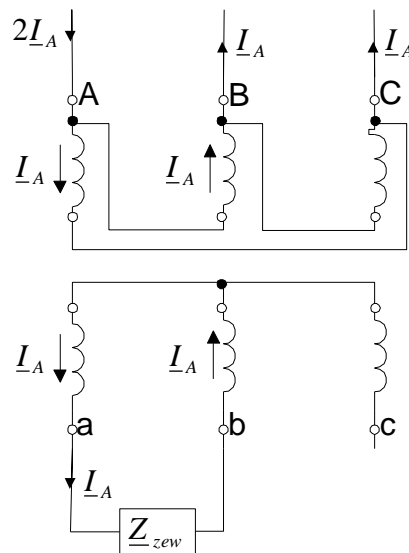
gdzie:  $u_z$  - procentowe napięcie zwarcia.

Dla transformatorów bez wyprowadzonego punktu zerowego po stronie wtórnej:

- przy układzie połączeń gwiazda – gwiazda:

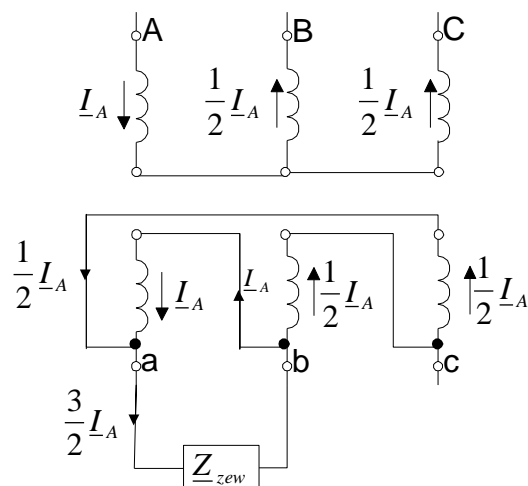


oraz przy układzie połączeń trójkąt – gwiazda:



$$I_{Z \min} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_n \frac{100}{u_z}; \quad (4.6)$$

- przy układzie połączeń gwiazda – trójkąt:



$$I_{Z \min} = \frac{100}{u_z} I_n. \quad (4.7)$$

### 3.2.2 Zabezpieczenie nadprądowe zwłoczne z blokadą napięciową

Aby zapobiec przypadkowemu działaniu zabezpieczenia nadprądowego zwłocznego transformatora na przykład w przypadku chwilowych znacznych przeciążeń ruchowych, jak również w celu zwiększenia zasięgu działania, poprawy czułości i wybiórczości dokłada się do niego blokadę napięciową. Wykorzystuje się tu fakt, że nawet przy znacznych przeciążeniach ruchowych napięcie nie obniża się znacznie, tak jak podczas zwarc.

Jeśli więc pobudzenie przekaźnika czasowego opóźniającego wyłączenie transformatora zostanie zrealizowane poprzez szeregowo połączone zestyki przekaźnika nadprądowego i podnapięciowego, to zabezpieczenie będzie działać tylko przy jednoczesnym wzroście prądu i obniżeniu się napięcia, czyli przy zakłóceniach zwarciovych. Dzięki temu prąd rozruchowy zabezpieczenia można dobrać wychodząc z prądu znamionowego transformatora, bez uwzględniania prądów przeciążenia, co przedstawia poniższy wzór.

$$I_r \geq I_n (k_s k_b / k_p \vartheta_i) \quad (3.8)$$

gdzie:

- $k_b$  - współczynnik bezpieczeństwa (1,1);
- $k_s$  - współczynnik schematowy (1,0);
- $k_p$  - współczynnik powrotu przekaźnika (0,85÷0,98);
- $\vartheta_i$  - przekładnia przekładników prądowych;
- $I_n$  - prąd znamionowy transformatora.

Napięcie rozruchowe przekładników podnapięciowych pracujących w układzie zabezpieczenia nadprądowego zwłocznego z blokadą napięciową dobiera się z zależności

$$(k_c U_p / n_u) \leq U_r \leq U_{\min} / k_p k_b n_u \quad (3.9)$$

gdzie:

- $k_c$  - współczynnik czułości (1,3÷1,4);
- $k_b$  - współczynnik bezpieczeństwa (1,1);
- $k_p$  - współczynnik powrotu przekaźnika podnapięciowego 1,2;

$U_{\min}$  - minimalne dopuszczalne napięcie  $(0,90 \div 0,95) U_N$ ;

$U_p$  - wartość napięcia na pętli zwarcia pomiędzy punktem zainstalowania zabezpieczenia, a końcem odcinka o największej impedancji;

$n_u$  - przekładnia przekładnika napięciowego.

### 3.2.3 Zabezpieczenia odległościowe

W przypadku transformatorów o górnym napięciu 220kV i wyższym oraz mocach większych niż 80 MV·A stosuje się jako ochronę dwukierunkowe zabezpieczenie odległościowe. Zabezpieczenie to jest instalowane po obu stronach transformatora. Kontroluje ono kierunek przepływu prądu zwarcia od szyn zbiorczych do transformatora. Przy takim kierunku prądów zwarcia przekaźniki mają trójstopniową charakterystykę roboczą, a tym samym trzy strefy ochronne.

Przyjmując pewne uproszczenia, pomijając rezystancję transformatora oraz zakładając, że nie występuje równoległa praca dwóch krótkich linii, charakterystykę zabezpieczenia oraz zasięg stref możemy przedstawić następująco:

- strefa pierwsza - stanowi szybką rezerwę zabezpieczeń transformatora od zwarć wewnętrznych, jej impedancja wynosi  $0,75 Z_{Tr}$ , czas działania zabezpieczenia w tej strefie równy jest 0,1 s;
- strefa druga - chroni transformator, szyny zbiorcze oraz niewielki fragment linii przyłączonych do szyn zasilanych przez ten transformator, jej impedancja wynosi  $1,25 Z_{Tr}$ , czas działania zabezpieczenia w tej strefie jest sumą czasu z pierwszej strefy i stopnia czasowego, który jest określony wzorem:

$$\Delta t \geq t_{ow} + t_d \quad (3.10)$$

gdzie:

$t_{ow}$  - czas otwierania się styków prądowych wyłącznika  $(0,20 \div 0,40 \text{ s})$ ;

$t_d$  - uchyb dokładności przekaźnika czasowego  $(0,05 \div 0,15 \text{ s})$ ;

- strefa trzecia stanowi rezerwę zwłoczną zabezpieczeń zainstalowanych w polach odpływowych; impedancja wynosi  $1,5 Z_{Tr}$ , czas działania jest sumą czasu z drugiej strefy i stopnia czasowego  $\Delta t$ .

Impedancję rozruchową zabezpieczenia odległościowego można obliczyć korzystając ze wzorów na impedancję pierwotną oraz przeliczoną na stronę wtórną:

$$Z_{Tr} = k_u U_N / k_p k_n \sqrt{3} (I_{\max} + I_w) \quad (3.11)$$

gdzie:

- $k_u$  - współczynnik charakteryzujący obniżenie napięcia w czasie normalnej pracy transformatora (0,85);
- $k_p$  - współczynnik powrotu członów rozruchowych (1,1);
- $k_n$  - współczynnik uwzględniający podziałkę członów rozruchowych wyrażoną w  $\Omega$  (2);
- $I_{max}$  - maksymalny prąd transformatora;
- $I_w$  - prąd wyrównawczy płynący w fazach nie objętych zakłóceniem przy jednofazowych zwarcia z ziemią;
- $U_N$  - napięcie znamionowe sieci.

Powyższe zabezpieczenie posiada również dwustopniową charakterystykę roboczą w kierunku sieci zasilającej transformator. Obejmuje ona swoim zasięgiem szyny zbiorcze, do których przyłączony jest transformator oraz fragment linii zasilających, rezerwując działanie zabezpieczeń odległościowych tych linii.

### 3.2.4 Zabezpieczenie ziemnozwarciowe

Zabezpieczenie ziemnozwarciowe chroniące transformator od zewnętrznych zwarc doziemnych może być realizowane jako:

- nadnapięciowe zwłoczne, uruchamiane składową zerową napięcia (zwane zabezpieczeniem zerowo-napięciowym);
- nadprądowe zwłoczne, uruchamiane składową zerową prądu (zwane zabezpieczeniem zerowo-prądowym);
- nadprądowe zwłoczne, kierunkowe reagujące na wartość i kierunek przepływu składowej zerowej prądu (zwane zabezpieczeniem zerowo-mocowym).

Zabezpieczenia zerowo-napięciowe zasilane z filtrów składowej zerowej napięcia stosuje się do ochrony:

- uzwojeń transformatorów o mocy 10 MVA i wyższej, podwyższających napięcie, połączonych w gwiazdę i pracujących na sieć ze skutecznie uziemionym punktem zerowym, jeżeli punkt gwiazdowy tego uzwojenia może być nieuziemiony;
- połączonych w trójkąt lub gwiazdę z nieuziemionym punktem gwiazdowym uzwojeń wyrównawczych autotransformatorów o mocy 160 MVA i wyższej.

Zabezpieczenie zerowo-prądowe zasilane z przekładnika prądowego, włączonego w obwód uziemienia punktu gwiazdowego zabezpieczanego transformatora stosuje się dla:

- podwyższających napięcie transformatorów o mocy 10MVA i wyższej, jeżeli uzwojenie połączone w gwiazdę z uziemionym punktem gwiazdowym pracuje na sieć ze skutecznie uziemionym punktem zerowym,
- obniżających napięcie transformatorów o górnym napięciu 110 kV w stacjach uproszczonych, powiązanych ze słabym źródłem zasilania po stronie dolnego napięcia, dla odcięcia tego źródła w przypadku zwarcia w sieci zasilającej.

Jeżeli sposób pracy punktu gwiazdowego transformatora w warunkach ruchowych może ulegać zmianie, stosuje się jednocześnie zabezpieczenie zerowo-prądowe i zerowo-napięciowe.

Zabezpieczenie zerowo-mocowe stosuje się do ochrony transformatorów i autotransformatorów o mocy 160 MVA i wyższej. Instaluje się je po stronie górnego napięcia zasilając z przekładników prądowych połączonych w układ Holmgreen'a oraz z drugiego uzwojenia przekładników napięciowych połączonych w układ otwartego trójkąta. Zabezpieczenie to działa na wyłączenie wyłącznika po stronie górnego napięcia przy przepływie składowej zerowej prądu od transformatora w kierunku sieci zasilającej.

### **3.3 Zabezpieczenia od zwarć i uszkodzeń wewnętrznych**

Zwarcia wewnątrz kadzi transformatora powstają w wyniku uszkodzeń izolacji uzwojeń pod wpływem przepięć, działania dynamicznego prądu, przeciążeń cieplnych oraz na skutek starzenia się izolacji. Przyczyną zwarć mogą być również substancje powstałe w wyniku starzenia się i rozkładu oleju. Zwarcia wewnątrz transformatora są szczególnie niebezpieczne, gdyż charakteryzują się przepływem dużych prądów, którym często towarzyszy łuk elektryczny. Duża objętość oleju w transformatorze w wypadku wystąpienia łuku elektrycznego może spowodować wydostanie się go na zewnątrz przez specjalną rurę przeciwwybuchową lub w gorszym przypadku rozerwanie kadzi, co zawsze jest groźne dla środowiska, ludzi i innych urządzeń znajdujących się w pobliżu. Innym rodzajem zwarć w transformatorze są zwarcia na wyprowadzeniach i wypustach. Przyczyną

tych zwarć są wady izolatorów, wpływ warunków atmosferycznych na własności izolatorów, zmniejszenie wymaganej przerwy izolacyjnej np. przez ptaki i drobne ssaki. W celu ochrony przed wyżej wymienionymi zakłóceniami stosuje się zabezpieczenia:

- nadprądowe bezzwłoczne;
- różnicowo - prądowe;
- gazowo - przepływowe.

Ogólnie możemy powiedzieć, że od tych zabezpieczeń wymagane jest działanie z bardzo krótkim czasem (praktycznie bezzwłocznie).

### 3.3.1 Zabezpieczenie nadprądowe bezzwłoczne

Zabezpieczenie nadprądowe bezzwłoczne stosuje się dla transformatorów o mocy mniejszej niż 5 MV·A. Zasila się je z przekładników prądowych zainstalowanych po stronie zasilania lub po stronie większej mocy zwarciowej dla dwustronnego zasilania. Wykonuje się je jako dwufazowe i trójfazowe. Powyższe zabezpieczenie nie jest wymagane, jeśli zwarcia są wyłączane z czasem  $\leq 0,7$  s przez zabezpieczenie nadprądowe od zwarć zewnętrznych. Prąd rozruchowy zabezpieczenia należy tak dobrać, aby zabezpieczenie nie reagowało na zwarcia poza transformatorem. Wyznacza się go ze wzorów:

$$I_r \geq k_s k_b I_{Zmax} / \mathcal{G}_i \quad (3.12)$$

gdzie:

$k_s$  - współczynnik schematowy (1);

$k_b$  - współczynnik bezpieczeństwa (1,3÷1,6);

$\mathcal{G}_i$  - przekładnia przekładników prądowych;

$I_{Zmax}$  - największa spodziewana wartość prądu zwarcia na szynach zbiorczych po dolnej stronie transformatora, przeliczona na stronę górnego napięcia.

Po wyliczeniu prądu rozruchowego zabezpieczenia oprócz odstrojenia się od prądu zwarć poza transformatorem trzeba jeszcze uwzględnić wpływ udarowego prądu magnesującego, który występuje przy załączaniu transformatora na stan jałowy.

$$I_r \geq k_b I_n / \mathcal{G}_i \quad (3.13)$$

gdzie:

- $k_b$  -  $(2\div 4)$  zależy od spodziewanej krotności udaru prądu magnesującego i od czasu własnego przekaźnika;
- $I_n$  - prąd znamionowy transformatora

Wybiórczość zabezpieczenia nadprądowego bezzwłocznego będzie zapewniona, jeśli wartość rozruchowa nastawiona na przekaźniku będzie większa od wartości rozruchowych wyliczonych ze wzorów (3.12) i (3.13).

Z zasady działania zabezpieczenia wynika, że nie może ono objąć swym zasięgiem całości uzwojeń zabezpieczonego transformatora, jak również wyprowadzeń od strony odbiorczej transformatora. Reaguje ono na zwarcia na przewodach łączących transformator z przekładnikami prądowymi, do których przyłączony jest przekaźnik i na wyprowadzeniach uzwojenia pierwotnego oraz przy zwarciach wewnątrz transformatora w strefie objętej około 70 % jego uzwojeń.

### 3.3.2 Zabezpieczenie różnicowo - prądowe wzdłużne

Zabezpieczenie tego typu składa się z przekładników prądowych włączonych po obydwu stronach transformatora oraz czułego przekaźnika nadprądowego włączonego w obwody wtórne przekładników, połączonych w układzie różnicowym. W normalnych warunkach pracy oraz przy zwarciach poza strefą chronioną prądy płynące w obwodach wtórnych przekładników prądowych znoszą się, gdyż posiadają przeciwne zwroty. Teoretycznie nie popłynie więc żaden prąd<sup>1</sup>. Przekaźnik nadprądowy nie zadziała, ponieważ kontroluje on różnicę prądów w obwodach wtórnych przekładników prądowych. W strefie ochronnej tego zabezpieczenia znajdują się:

- transformator;
- odgromniki strony WN, SN, DN;
- iskierniki;
- przekładniki napięciowe;
- izolatory przepustowe i wsporcze;
- odłączniki transformatorowe.

---

<sup>1</sup> Pomijając prąd wynikający z błędów przekładników i niedopasowania charakterystyk magnesowania

Pomimo tak prostej idei działania tego zabezpieczenia jego zastosowanie i zapewnienie odpowiedniej czułości i szybkości działania stwarza wiele problemów natury technicznej. Problemy te to:

- występowanie prądów magnesujących przy załączaniu transformatora nieobciążonego;
- trudności w idealnym dopasowaniu przekładni przekładników prądowych do przekładni transformatora;
- niedokładność przekładników prądowych (znaczące obciążenie przekładników po stronie wtórnej, lub mała liczba przetężeńiowa powoduje niezachowywanie znamionowej przekładni podczas przenoszenia prądów zwarcia);
- przesunięcia fazowe prądów strony wtórnej względem strony pierwotnej szczególnie przy transformatorach o grupie połączeń mieszanych Dy, Yd;
- występowaniem różnych przekładni transformatora podczas regulacji napięcia.

W celu poprawnego działania zabezpieczenia należy:

- zasilić obwody prądowe zabezpieczeń z przekładników o największym współczynniku granicznym;
- nie włączać innych aparatów pomiarowych, regulacyjnych ani zabezpieczeniowych do zabezpieczenia różnicowego;
- wyrównać fazy prądów w gałęziach wzdłużnych zabezpieczenia przez odpowiednie połączenie przekładników głównych tj. dla transformatora o grupie połączeń Yd stosować po stronie gwiazdy połączenia przekładników prądowych w trójkąt, a dla grupy D - przekładniki prądowe łączyć w gwiazdę;
- przekładniki prądowe główne połączyć w trójkąt, gdy transformator pracuje z punktem gwiazdowym uziemionym;
- wyrównać moduły prądów gałęziowych, jeśli prąd niezrównoważenia przy przekładni znamionowej przekracza 5% wartości prądów wzdłużnych;
- dla transformatorów trójzwojowych zasilanych jednostronnie stosować zabezpieczenia w układzie jak dla transformatorów dwuzwojowych przy wyrównaniu i sumowaniu prądów gałęziowych stron odbiorczych;

- uwzględnienie zmienności przekładni transformatora przez stosowanie wielozaczepowego przekładnika wyrównawczego.

Zadziałanie zabezpieczenia różnicowo - prądowego wzdłużnego powoduje wyłączenie wyłączników po wszystkich stronach zabezpieczanego transformatora. W przypadku zadziałania tego zabezpieczenia transformator można załączyć po wcześniejszym wyjaśnieniu przyczyn zadziałania zabezpieczenia lub wykonaniu pomiarów stwierdzających sprawność transformatora i układu zabezpieczeń.

Prąd rozruchowy zabezpieczenia różnicowo - prądowego wzdłużnego określony jest wzorem:

$$I_r \leq 0, \quad (3.14)$$

W niektórych przekąźnikach istnieje możliwość nastawiania jeszcze jednego parametru, współczynnika hamowania.

Więcej na temat stabilizacji zabezpieczenia różnicowo – prądowego wzdłużnego znajduje się w rozdziale 4.2.

### **3.3.3 Zabezpieczenie gazowo - przepływowe kadzi (Buchholza)**

Zabezpieczenie gazowo przepływowe kadzi stanowi przekąźnik gazowo - przepływowy Buchholza, który działa na zasadzie ciśnieniowej. Jest on połączony z kadzią transformatora i konserwatorem rurą, która umożliwia przepływ oleju w obydwie strony. Wewnątrz przekąźnika umieszczone są dwa pływaki, które mogą poruszać się w dół i w górę niezależnie od siebie. Każdy pływak zaopatrzony jest w styk rtęciowy lub współpracujący z kontraktronem magnes zamocowany do dźwigienki pływaka i porusza się wraz z nim. Dolny pływak przekąźnika gazowo - przepływowego ponadto wyposażony jest w płytkę podmuchową. Jest ona tak sprzężona z dolnym pływakiem, że niezależnie od jego położenia oddziałuje na styk. Wychylenie płytki podmuchowej powoduje jednocześnie zamknięcie styku. Ruch ten występuje przy gwałtownym przepływie oleju z kadzi transformatora do konserwatora lub intensywnym wydzielaniu się gazów. W czasie normalnych warunków pracy, kiedy wewnątrz przekąźnika wypełnione jest olejem obydwa pływaki są unoszone i znajdują się w górnej pozycji, co oznacza, że przepływ oleju jest niewielki, a styki przekąźnika są otwarte.

Zabezpieczenie Buchholza działa przy elektrycznym i mechanicznym uszkodzeniu wewnątrz kadzi transformatora, któremu towarzyszy [3]:

- wydzielanie się gazu jako produktu rozkładu oleju lub stałych materiałów izolacyjnych (przegrzanie się uzwojeń lub rdzenia);
- obniżenie się poziomu oleju (nieszczelność kadzi, niedostateczne napełnienie);
- gwałtowny przepływ oleju z kadzi transformatora do konserwatora (zwarcie wewnątrz kadzi).

Podczas powolnego wydzielania się gazów, co świadczy przeważnie o nieznacznym uszkodzeniu, a także w czasie uwalniania się powietrza zawartego wewnątrz transformatora lub przy nieznacznie obniżonym poziomie oleju, przekąźnik powinien uruchomić sygnalizację ostrzegawczą. Realizowanie tego odbywa się poprzez styk współdziałający z górnym pływakiem. Pływak obniży się również, jeśli w przekąźniku nagromadzi się od 100 do 200 cm<sup>3</sup> gazu. Przy gwałtownym przepływie oleju z kadzi do konserwatora lub gwałtownym wydzielaniu się gazów następuje zamknięcie styków sprzężonych z dolnym pływakiem i płytką, co powoduje otwarcie wszystkich wyłączników transformatora. Prędkość przepływu powodująca reakcję przekąźnika gazowo - przepływowego wynosi około 0,1 m/s.

Przekąźniki Buchholza wyposażane są również w okienko do sprawdzania poziomu oleju lub produktów jego rozkładu, a także kranik do pobierania próbek gazu, dzięki którym można określić uszkodzenie transformatora :

- gaz bezbarwny, bezwonny i niepalny - zawartość powietrza w oleju;
- gaz mleczno-biały o ostrej woni niepalny, powstaje po uszkodzeniu części papierowych;
- gaz żółty trudnopalny - uszkodzenie części konstrukcyjnych z drewna;
- gaz łatwopalny z czarnymi lub szarymi osadami - rozkład chemiczny oleju na skutek łuku elektrycznego.

W celu prawidłowego działania przekąźnika należy transformator ustawić w taki sposób, aby pokrywa transformatora miała nachylenie 1 ÷ 2 %, przewód olejowy 2 ÷ 4 %. Powoduje to ułatwienie przepływu gazów tworzących lub nagromadzonych w kadzi do konserwatora.

### **3.3.4 Zabezpieczenie gazowo - przepływowe przełącznika zaczepów**

W transformatorach przystosowanych do regulacji napięcia pod obciążeniem wewnątrz kadzi transformatora znajduje się wydzielona komora przełącznika zaczepów. Jest ona połączona z konserwatorem poprzez rurę, w którą wpięty jest przekąźnik gazowo - podmuchowy. Ma on za zadanie ochronę przełącznika zaczepów i transformatora w razie uszkodzenia urządzeń przełączających lub przełączania zbyt dużej wartości prądów, czemu towarzyszy bardzo silny łuk elektryczny.

W przekąźniku tym znajduje się jedna płytki podmuchowa z możliwością nastawienia działania na prędkość przepływu na drodze do konserwatora. Można spotkać przekąźniki z nastawianą płytką na prędkość przepływu  $0,9 \div 1,2 \div 1,5$  m/s lub  $1,5 \div 2,0 \div 2,5$  m/s. Zadziałanie przekąźnika przełącznika zaczepów powoduje otwarcie wszystkich wyłączników transformatora, ponadto po zadziałaniu przekąźnik zostaje zablokowany powodując niemożliwe załączenie transformatora bez stwierdzenia przyczyny zadziałania i skasowania przekąźnika.

## **3.4 Wymagania stawiane zabezpieczeniom transformatorów**

Zabezpieczeniom transformatorów można postawić następujące wymagania:

- wyłączanie z minimalnym opóźnieniem przy zwarcjach międzyfazowych i doziemnych wewnątrz kadzi, co zapewnia utrzymanie stabilności systemu oraz ogranicza stopień uszkodzeń, przede wszystkim nie dopuszczając do wybuchu kadzi;
- wyłączanie z minimalnym opóźnieniem przy zwarcjach zwojowych, co ogranicza stopień uszkodzeń i nie dopuszcza do wybuchu kadzi;
- wyłączenie z minimalnym opóźnieniem przy zwarcjach wielkoprądowych w polach transformatora (pomiędzy wyłącznikami a kadzią);
- niedopuszczenie do długotrwałego nadmiernego wzrostu temperatury uzwojeń, co mogłoby grozić zmniejszeniem trwałości użytkowej izolacji (można to uzyskać przez pomiar temperatury górnych warstw oleju oraz oszacowanie temperatury najgorętszego miejsca w uzwojeniach);
- niedopuszczenie do długotrwałego nadmiernego wzrostu strumienia w rdzeniu, co może grozić lokalnym przegrzaniem rdzenia i jego elementów konstrukcyjnych;

- niedopuszczenie do występowania prądów zwarć zewnętrznych, które mogłyby spowodować przekroczenie granic wytrzymałości cieplnej i dynamicznej, dopuszczalnych ze względu na warunki cieplne i ograniczenia mechaniczne;
- zapewnienie rezerwowania w przypadku zawodnego działania zabezpieczeń lub wyłączników;
- zapewnienie możliwości sprawdzenia zabezpieczeń bez konieczności wyłączenia transformatora;
- sygnalizowanie stanów zagrożenia, wynikających z osłabienia izolacji lub lokalnego przegrzania uzwojeń;
- niedopuszczenie do przedwczesnego wyłączania transformatora przy znacznych obciążeniach oraz zwarciach zewnętrznych.

W związku z tym, podstawowym zabezpieczeniom zwarciovym stawia się ostre wymagania dotyczące czułości (reagowania już przy zwarcu pojedynczego zwoju) oraz minimalnego opóźnienia w działaniu, nie przekraczającego czasu rzędu dziesiątych części sekundy.

## **4 Zabezpieczenie różnicowo-prądowe wzdłużne transformatorów – analiza szczegółowa**

### **4.1 Zastosowanie i zasada działania zabezpieczenia różnicowo-prądowego wzdłużnego transformatorów**

Zabezpieczenie różnicowe jest podstawowym zabezpieczeniem transformatorów średnich i dużych mocy oraz autotransformatorów. Według krajowych przepisów należy je stosować dla wszystkich jednostek o mocach znamionowych większych niż  $5\text{MV}\cdot\text{A}$  pracujących indywidualnie oraz transformatory o mocy od  $2\text{MV}\cdot\text{A}$  pracujące równolegle przy łącznej ich mocy od  $10\text{MV}\cdot\text{A}$ . W zabezpieczeniu tym wielkością pomiarową są różnice prądów wtórnych przekładników prądowych zainstalowanych w przewodach należących do tej samej fazy przed i za transformatorem. Jego zaletą jest to, że przy odpowiedniej czułości reaguje na wszystkie zwarcia w obszarze ograniczonym miejscem zainstalowania przekładników prądowych po obydwu stronach. Tak więc zabezpiecza ono nie tylko przy zwarciach międzyfazowych czy doziemnych, ale także przy zwarciach zwojowych. W strefie ochronnej tego zabezpieczenia znajdują się:

- transformator;
- odgromniki strony WN, SN, DN;
- iskierniki;
- przekładniki napięciowe;
- izolatory przepustowe i wsporcze;
- odłączniki transformatorowe.

Zaprojektowanie i wykonanie poprawnie działającego zabezpieczenia różnicowego o dużej czułości i szybkości działania stanowi poważny problem techniczny. Wynika on zarówno z właściwości zabezpieczanego transformatora, jak i właściwości przekładników prądowych zainstalowanych po obu stronach transformatora .

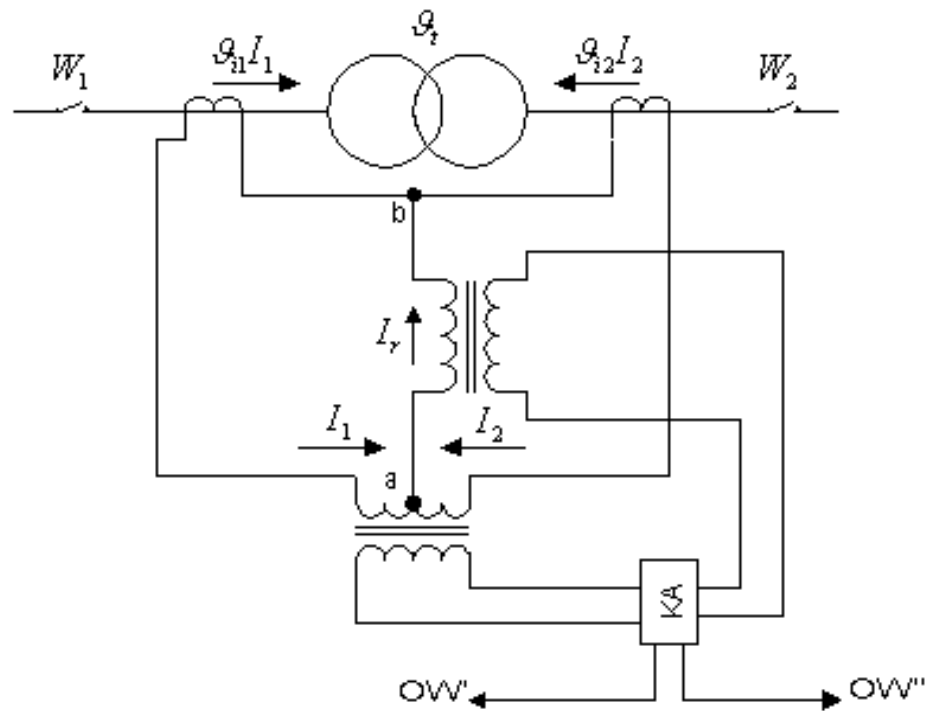
Zabezpieczenia różnicowe powinny spełniać następujące wymagania:

- powinny być odstrojone od udarów prądu magnesującego,
- nie powinny reagować na prądy wyrównawcze,

- powinny być odpowiednio czułe i szybko działać.

## 4.2 Stabilizacja zabezpieczenia różnicowo wzdłużnego transformatorów

Stabilizacja zabezpieczenia różnicowego ma na celu uzyskanie możliwie dużej jego czułości przy jednoczesnej niewrażliwości na prąd wyrównawczy, płynący w gałęzi różnicowej zabezpieczenia (między punktami a, b na rys. 4.1). W celu spełnienia tego wymagania należy odpowiednio wybrać przebieg charakterystyki rozruchowej zabezpieczenia (rys. 4.2), tzn. przebieg zależności prądu różnicowego rozruchowego  $I_r$  od prądu hamującego  $I_h$ .

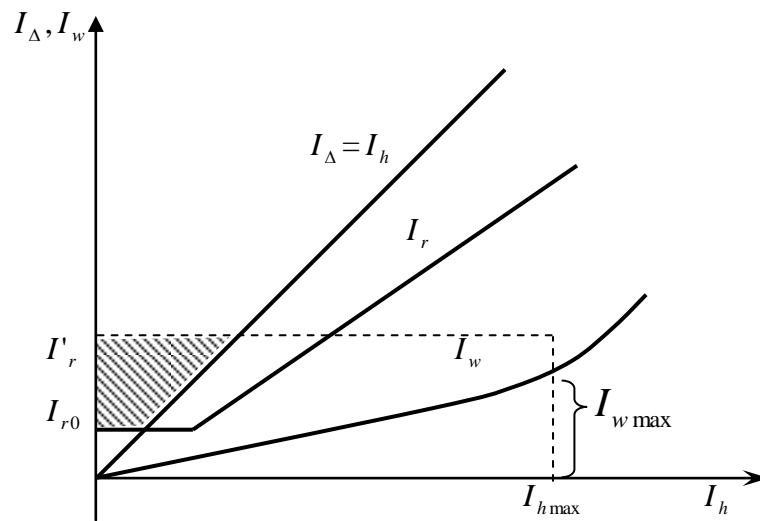


Rys. 4.1 Schemat ideowy jednokreskowy zabezpieczenia różnicowego dla transformatora dwuuzwojeniowego

Przy zwrotach prądów  $I'_1, I'_2$  jak na rys 4.1, prąd różnicowy  $I_\Delta$  oraz prąd hamujący  $I_h$  są zdefiniowane następującymi wzorami;

$$\begin{aligned} I_\Delta &= |\underline{I}'_1 + \underline{I}'_2| \\ I_h &= |\underline{I}'_1 - \underline{I}'_2| \end{aligned} \quad (4.1)$$

w których:  $I_1, I_2$  - prądy po stronie wtórnej przekładników prądowych, dopływające do gałęzi różnicowej zabezpieczenia.



Rys. 4.2 Charakterystyka rozruchowa zabezpieczenia różnicowego.

- $I_h$  - prąd hamujący,
- $I_\Delta$  - prąd różnicowy,
- $I_w$  - prąd wyrównawczy,
- $I_r$  - prąd rozruchowy,
- $I_{r0}$  - prąd rozruchowy początkowy,
- $I'_r$  - prąd rozruchowy zabezpieczenia różnicowego niestabilizowanego,
- $I_{w\max}$  - maksymalny prąd wyrównawczy

W przypadku zwarcia wewnętrznego zasilanego jednostronnie  $I'_1 = 0$  lub  $I'_2 = 0$ , wobec czego z równań (4.1) otrzymuje się  $I_\Delta = I_h$ . Zwarcia takiemu odpowiada na wykresie 4.2 dwusieczna kąta prostego między osiami współrzędnych  $I_h$  i  $I_\Delta$ . Zwarciom wewnętrznym zasilanym dwustronnie odpowiada obszar leżący ponad prostą  $I_\Delta = I_h$ .

W przypadku zwarcia zewnętrznego następuje zmiana znaków jednego z prądów  $I_1, I_2$ , a w gałęzi różnicowej pojawia się prąd wyrównawczy. Jest on spowodowany różnicami w błędach wskazowych przekładników prądowych oraz

niemożliwością dokładnego dopasowania znormalizowanych przekładni przekładników prądowych do znormalizowanej przekładni transformatora. Ponadto przekładnia transformatora może ulegać skokowym zmianom w granicach określonych zakresem regulacji napięcia za pomocą zaczepów. Prąd wyrównawczy jest proporcjonalny do prądu hamującego do pewnej granicy, po przekroczeniu której, wzrost prądu wyrównawczego staje się bardziej stromy (krzywa  $I_w$  na rys. 4.2), gdyż zwiększają się błędy przekładników prądowych wskutek przechodzenia ich w stan nasycenia magnetycznego.

Charakterystyka rozruchowa zabezpieczenia różnicowego stabilizowanego (krzywa  $I_\Delta$  na rys 4.2) powinna się znajdować pomiędzy krzywymi  $I_\Delta$  i  $I_w$ , jednak możliwie blisko krzywej  $I_\Delta$ , z uwzględnieniem współczynnika czułości  $k_c$ , np. równo 1,5 aby zapobiec przecinaniu się krzywych  $I_w$  i  $I_r$  w obszarze dużych prądów zwarciovych, przy których już występuje nasycenie rdzeni przekładników prądowych. Dla bardzo małych wartości prądu hamującego prąd rozruchowy jest ograniczony od dołu wartością  $I_{r0}$ , zwaną prądem rozruchowym początkowym. Gdyby nie stosować stabilizacji prądem hamującym, prąd rozruchowy zabezpieczenia należałoby wybierać z warunku

$$I'_r = k_b I_{w\max} \quad (4.2)$$

w którym:  $I_{w\max}$  - największa spodziewana wartość prądu wyrównawczego,

$k_b$  - współczynnik bezpieczeństwa, np. równy 1,2

Jak widać stabilizacja umożliwia czulsze nastawienie zabezpieczenia ( $I_{r0} < I'_r$ ),

a przy zwarciach zewnętrznych znacznie zwiększa zakres prądów zwarciovych, przy których nie występują jeszcze zbędne zadziałania pod wpływem prądu wyrównawczego.

### **4.3 Powstawanie oraz sposoby ograniczania prądów niezrównoważenia w obwodach zabezpieczenia różnicowego**

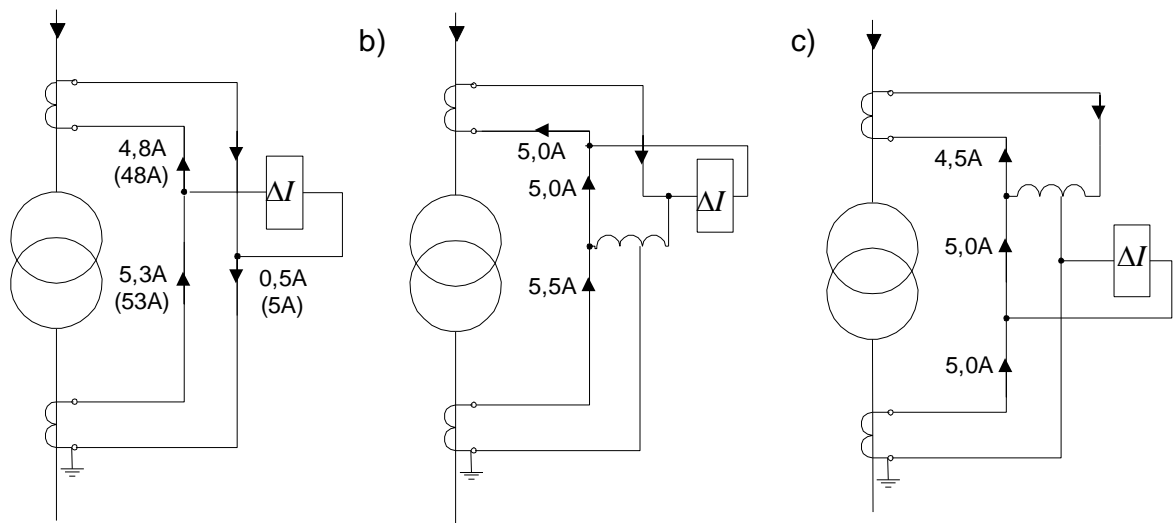
W rzeczywistych układach zabezpieczeń różnicowych wzdłużnych transformatorów prawie zawsze występują prądy niezrównoważenia w gałęziach różnicowych zabezpieczenia. Nawet idealne wyrównanie przekładni nie może spowodować tego, aby prądy różnicowe były równe zero. Źródłami uchybowych prądów różnicowych są:

- niemożliwość dokładnego dopasowania znormalizowanej przekładni przekładników prądowych do znormalizowanej przekładni transformatora;
- zmiana przekładni transformatora, dokonywana podczas regulacji napięcia przez zmianę położenia zaczepów;
- przesunięcie kątowe między takimi samymi prądami płynącymi w obwodach wtórnych przekładników prądowych w odpowiadających sobie przewodach fazowych po obu stronach transformatora, wymuszone grupą połączeń transformatora;
- występowanie udarowych prądów magnesowania przy załączaniu transformatora nieobciążonego;
- wzrost prądów magnesowania w warunkach stacjonarnych na skutek nadmiernego strumienia w rdzeniu

#### **4.3.1 Błędy spowodowane różnicą przekładni przekładników prądowych i transformatora**

Dużym problemem w zabezpieczeniach różnicowych transformatorów mocy staje się dobór przekładni przekładników prądowych, gdyż ich znormalizowane wartości odbiegają od wartości przekładni transformatorów. Przy doborze tych przekładni trzeba także wziąć pod uwagę zmienność przekładni transformatora podczas regulacji napięcia za pomocą przełącznika zaczepów. Różnice te spowodują przepływ prądu niezrównoważenia w gałęzi różnicowej. Jeżeli wartość tego prądu przekracza 5% większego z prądów, których jest różnicą, to stosuje się

przekładniki prądowe wyrównawcze lub autotransformatory wyrównawcze, które włączamy do obwodów wtórnych przekładników prądowych głównych.



Rys. 4.3 Jednobiegunowe schematy układów zabezpieczenia różnicowego:

a) rozływ prądów w obwodzie różnicowym, b) układ z autotransformatorem wyrównawczym obniżającym, c) układ z autotransformatorem wyrównawczym podwyższającym

Na rysunku 4.3a pokazany jest rozływ prądów w obwodzie różnicowym przy znamionowym obciążeniu transformatora. Prąd niezrównoważenia w tych warunkach wynosi 0,5A. Przy zwarcie zewnętrznym wartości wszystkich prądów wzrosną (podane w nawiasach wartości przy ich dziesięciokrotnym wzroście), co spowoduje popłynięcie prądu niezrównoważenia o wartości 5A i niepotrzebne zadziałanie zabezpieczenia. Na rysunku 4.3b, c pokazano sposób włączania autotransformatorów wyrównawczych w układach podwyższającym i obniżającym.

Przekładnik prądowy wyrównawczy może mieć stałą przekładnię lub może mieć kilka, np. osiem oddzielnych uzwojeń o różnych liczbach zwojów, co umożliwia dokładne dopasowanie przekładni przekładnika i transformatora przy dowolnych położeniach przełącznika zaczepek. Dla stałej przekładni, która może być dobrana orientacyjnie, zastosujemy wzór :

$$\mathcal{G}_w = \frac{I'_{ppw}}{I'_2} = \frac{\mathcal{G}_{i2} U_{2n}}{\mathcal{G}_{i1} U_{1n}} \quad (4.3)$$

w którym:  $I_{ppw}$  - prąd wtórny przekładnika wyrównawczego.

Przekładnię  $\mathcal{G}_w$  można dobrać bardziej precyzyjnie na podstawie wymagania, aby charakterystyki prądu wyrównawczego w funkcji prądu hamującego, od-

powiadające skrajnym położeniom przełącznika zaczeów na transformatorze, pokrywały się .

Można to zapisać następująco:

$$\frac{I'_w}{I'_h} = \frac{I''_w}{I''_h} \quad (4.4)$$

Dla górnego położenia przełącznika zaczeów na transformatorze, scharakteryzowanego wzrostem napięcia znamionowego pierwotnego z wartości  $U_{1n}$  do wartości  $U_{1n}(1+\alpha)$ , związek między prądami  $I'_{ppw}$  i  $I'_1$  można zapisać w postaci

$$\frac{I'_{ppw}}{I'_1} = \frac{\mathcal{G}_w \mathcal{G}_{i1} U_{1n} (1+\alpha)}{\mathcal{G}_{i2} U_{2n}} \quad (4.5)$$

Podobnie dla dolnego położenia przełącznika zaczeów na transformatorze, scharakteryzowanego napięciem znamionowym górnym  $U_{1n}(1-\alpha)$ , otrzymuje się

$$\frac{I''_{ppw}}{I'_1} = \frac{\mathcal{G}_w \mathcal{G}_{i1} U_{1n} (1-\alpha)}{\mathcal{G}_{i2} U_{2n}} \quad (4.6)$$

Warunek (4.4) można zapisać następująco:

$$\frac{I'_{ppw} + I'_1}{I'_{ppw} - I'_1} = \frac{I'_1 + I''_{ppw}}{I'_1 - I''_{ppw}} \quad (4.7)$$

Ze związków (4.5) ÷ (4.7) otrzymuje się ostatecznie

$$\mathcal{G}_w = \frac{\mathcal{G}_{i2} U_{2n}}{\mathcal{G}_{i1} U_{1n} \sqrt{1-\alpha^2}} \quad (4.8)$$

Jeżeli przekładnik wyrównawczy ma mieć zmienną przekładnię dostosowaną do wszystkich położeni przełącznika zaczeów transformatora, to w przypadku nastawienia napięcia pierwotnego znamionowego na wartość górną  $U_{1n}(1+\alpha)$  przekładnia przekładnika wyrównawczego powinna wynosić :

$$\mathcal{G}'_w = \frac{\mathcal{G}_{i2} U_{2n}}{\mathcal{G}_{i1} U_{1n} (1+\alpha)} \quad (4.9)$$

natomiast w przypadku nastawienia tego napięcia na wartość dolną

$$g_w'' = \frac{g_{i2} U_{2n}}{g_{i1} U_{1n} (1 - \alpha)} \quad (4.10)$$

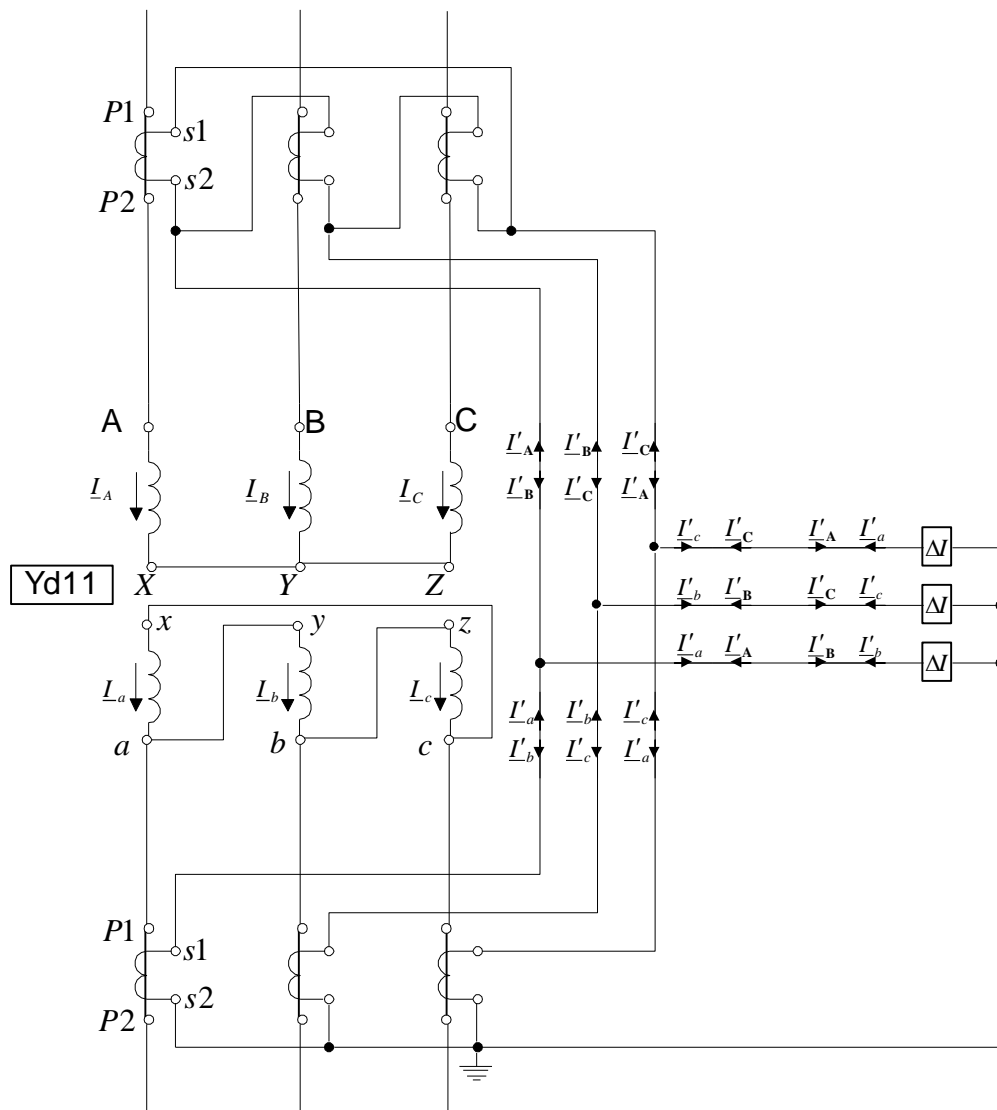
Stąd średnia wartość przekładni przekładnika wyrównawczego

$$g_w = \frac{1}{2} (g_w' + g_w'') = \frac{g_{i2} U_{2n}}{g_{i1} U_{1n} (1 - \alpha^2)} \quad (4.11)$$

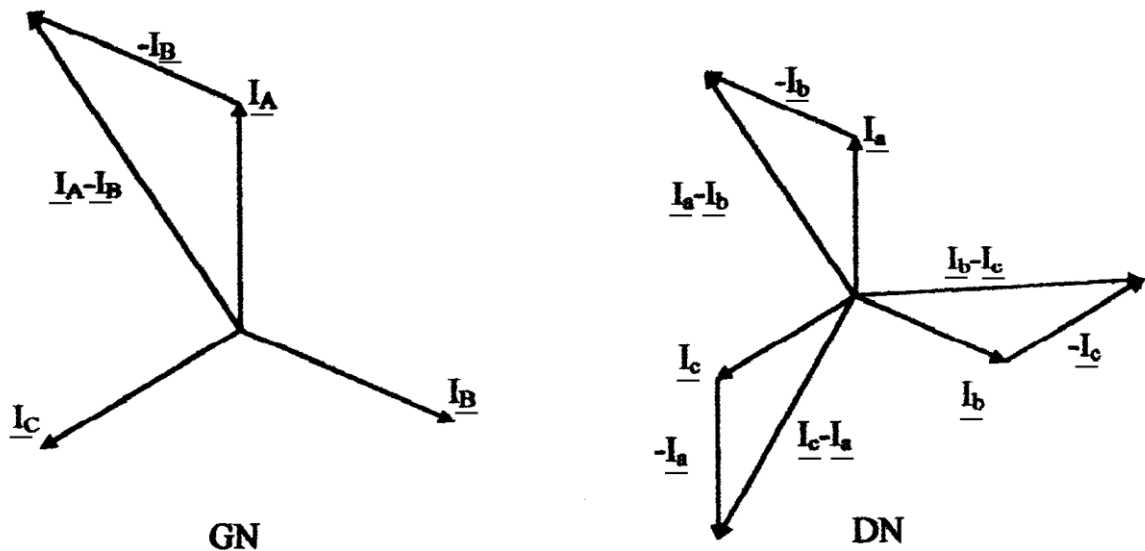
#### 4.3.2 Błędy spowodowane grupą połączeń transformatora

W transformatorach mocy, uzwojenia fazowe po stronie górnego i dolnego napięcia mogą być połączone w gwiazdę, trójkąt lub zygzak. Niektóre układy połączeń uzwojeń transformatora wymuszają przesunięcie kątowe między napięciami tych samych faz po obu stronach transformatora. Przesunięcie kątowe jest przyczyną pojawienia się prądu niezrównoważenia w gałęzi różnicowej i może być powodem zbędnego pobudzenia i zadziałania zabezpieczenia różnicowego. Likwidację kąta przesunięcia można uzyskać na drodze odpowiedniego kojarzenia uzwojeń wtórnych przekładników prądowych po obu stronach transformatora i poprawnego ich połączenia z przekątnymi znajdującymi się w gałęziach różnicowych zabezpieczenia. Dlatego po stronie uzwojeń transformatora łączonych w gwiazdę przekładniki łączy się w trójkąt, po stronie uzwojeń łączonych w trójkąt - przekładniki łączy się w gwiazdę. Typowy schemat układu zabezpieczenia różnicowego wzdłużnego transformatora o grupie połączeń Yd11 oraz rozptył prądów w tym układzie a także wykresy wektorowe prądów przedstawia rysunek 5.4. Ponadto przekładnie przekładników należy tak dobrać, aby przy normalnym obciążeniu transformatora i przy zwarcia zewnętrżnych prądy wzdłużne po obydwu stronach członów różnicowych były równe co do wartości, a prądy różnicowe były bliskie zeru. Taki dobór głównych przekładników prądowych rzadko bywa możliwy, gdyż na ogół nie odpowiada typowym przekładniom. Wówczas stosuje się przekładniki pomocnicze wyrównawcze (lub autotransformatory). Więcej na temat doboru i sposobu połączenia przekładników wyrównawczych opisano w rozdziale 5.3.1. Przekładniki te stosuje się nie tylko w celu dokładnego wyrównania przekładni, lecz także kompensacji przesunięcia fazowego prądów po obydwu stronach zabezpieczanego transformatora. W takim przypadku przekładniki prądowe po obydwu stronach łączy się w gwiazdę, przekładnik wyrównawczy zaś, w ukła-

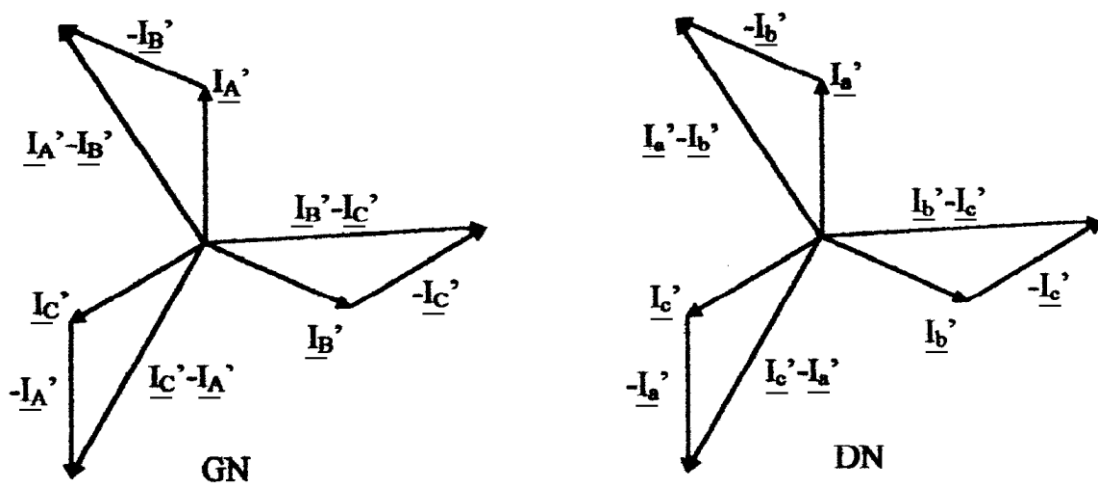
dzie gwiazda/trójkąt i jeśli ma właściwie dobraną przekładnię, to wyrównuje zarówno przesunięcia fazowe prądów, jak i ich moduły.



Rys. 4.4 Schemat układu zabezpieczenia różnicowego wzdłużnego transformatora o grupie połączeń Yd11 – rozptyw prądów.



Rys.4.5. Wykres wektorowy prądów w uzwojeniach transformatora i przewodach fazowych



Rys.4. 6. Wykres wektorowy prądów w uzwojeniach wtórnych przekładników i obwodach wtórnych

#### 4.3.3 Błędy spowodowane udarowym prądem magnesującym

Maksymalna wartość udarowego prądu magnesowania zależy od własności magnetycznych blach transformatorowych użytych do wyrobu rdzeni transformatorów, od mocy znamionowej transformatora i od odległości uzwojenia magnesującego od rdzenia.

W pierwszym momencie załączenia transformatora udar prądu magnesującego może się wahać od 2,5 do 10 krotności prądu znamionowego transformatora, jednakże szybko zanika do wartości ustalonego prądu stanu jałowego, która wynosi

zaledwie od 2 do 5% znamionowego prądu transformatora. Prąd rozruchowy zabezpieczenia różnicowo prądowego dobiera się spełniając warunek 4.12.

$$I_{rp} \leq 0,5 I_{NTr} \quad (4.12)$$

gdzie:

$I_{rp}$  - pierwotny prąd rozruchowy zabezpieczenia,

$I_{NTr}$  - znamionowy prąd zabezpieczanego transformatora.

Udarowe prądy magnesowania wywołują prądy różnicowe o bardzo znacznych wartościach. Obecnie dla odstrojenia od nich w zabezpieczeniach stosuje się powszechnie zasadę stabilizacji drugą harmoniczną (w prądzie magnesującym zawartość drugiej harmonicznej jest stosunkowo znaczna, natomiast w prądzie zwarciovym zawartość tej harmonicznej jest niewielka); tzn., jeśli druga harmoniczna w prądzie różnicowym przekroczy wartość przyjmowaną przeważnie na poziomie 0,2 harmonicznej podstawowej, działanie zabezpieczenia nie następuje. Metoda ta skutecznie odstrajająca od prądów udarowych ma jednak pewną wadę, gdyż w stanie przejściowym przy zwarciu wewnętrznym wywołującym nasycenie rdzeni przekładników, w prądzie różnicowym, który powinien spowodować niezwłoczne zadziałanie zabezpieczenia, pojawia się także druga harmoniczna. Maże to być przyczyną opóźnienia zadziałania zabezpieczenia o kilkadziesiąt, a niekiedy nawet kilkaset milisekund. Tak więc prawidłową pracę zabezpieczenia różnicowego niewrażliwego na udary prądu magnesującego można zapewnić jedną z następujących metod realizowanych przez :

- zastosowanie zwłoki czasowej rzędu  $0,5 \div 0,6$  s,
- zastosowanie mało czułego nastawienia zabezpieczenia różnicowego (wartość prądu różnicowego rzędu  $2 \div 3 I_N$ ),
- zastosowanie blokowania działania zabezpieczenia drugą harmoniczną występującą w prądzie magnesującym;
- zastosowanie przekładników szybko nasycających się, które ograniczają wartość prądu w uzwojeniu wtórnym przy udarach prądu magnesującego, dzięki temu, że składowa bezokresowa prądu magnesującego w uzwojeniu pierwotnym tylko w nieznacznym stopniu (nie powodującym zadziałania zabezpieczenia) wskutek szybkiego nasycenia się przekładników transformuje się na stronę wtórną.

#### **4.3.4 Błędy spowodowane nadmiernym strumieniem w rdzeniu**

W warunkach stacjonarnych prąd magnesowania przy nadmiernym strumieniu w rdzeniu jest traktowany przez zabezpieczenie jako prąd różnicowy, który może przekroczyć poziom zadziałania przekaźnika. W celu odstrojenia zabezpieczenia stosuje się niekiedy stabilizację piątą harmoniczną, której wartość w prądach magnesowania nie zmniejsza się poniżej 0,3 wartości harmonicznej podstawowej. Choć sposób ten jest skuteczny, ma jednak poważną wadę, gdyż w prądzie różnicowym przy zwarcich wewnętrznych i nasyceniu przekładników prądowych jest też znaczna zawartość piątej harmonicznej, która mogłaby zablokować działanie zabezpieczenia właśnie wówczas, że prąd różnicowy przy nadmiernym strumieniu w rdzeniu nie przekracza połowy krotności prądu znamionowego, można zastosować układ, który wyłącza stabilizację piątą harmoniczną, gdy prąd różnicowy jest większy niż  $0,7 \div 1,0$  wartości prądu znamionowego. Podczas zwarć wewnętrznych występujących na zaciskach, których prądy doprowadzają do nasycenia rdzeni przekładników, prądy różnicowe są znacznie większe od tej granicy.

## 5 Ćwiczenie laboratoryjne

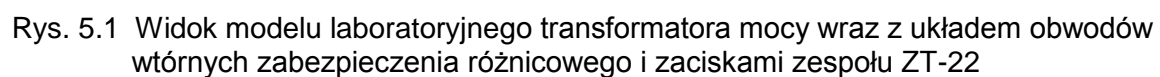
### 5.1 Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z praktycznymi sposobami zrównoważenia prądów w obwodach zabezpieczenia różnicowego wzdłużnego transformatora obniżającego dwuuzwojeniowego oraz sprawdzenie zadziałania zespołu zabezpieczeń transformatorów mocy ZT-22.

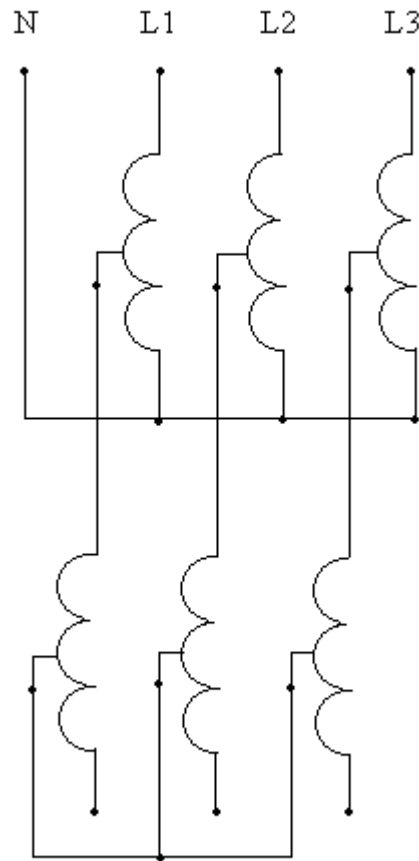
### 5.2 Opis stanowiska laboratoryjnego

Stanowisko laboratoryjne którego ogólny widok przedstawia rys.5.1 składa się z :

- fizycznego modelu transformatora mocy obniżającego,
- torów prądowych po obu stronach transformatora, w których zamontowane są przekładniki prądowe,
- układu obwodów prądowych zabezpieczenia różnicowego,
- zespołu zabezpieczeń transformatorów typu ZT-22,
- urządzenia obciążającego.



Rys. 5.1 Widok modelu laboratoryjnego transformatora mocy wraz z układem obwodów wtórnych zabezpieczenia różnicowego i zaciskami zespołu ZT-22



Rys 5.2 Schemat połączeń urządzenia obciążającego

Zależnie od grupy połączeń transformatora, uzwojenia wtórne przekładników prądowych kojarzy się odpowiednio i łączy w układ obwodów prądowych zabezpieczenia różnicowego.

Poprawne wykonanie połączeń uzwojeń wtórnych przekładników prądowych po obu stronach transformatora gwarantuje likwidację przesunięcia kontowego między takimi samymi prądami. Amperomierze  $A''$  w gałęziach różnicowych układu powinny wskazywać różnicę arytmetyczną prądów pomierzonych amperomierzami  $A$  i  $A'$ . Prądy niezrównoważenia w gałęziach różnicowych można skutecznie ograniczyć przez zastosowanie autotransformatorów wyrównawczych włączonych w układzie podwyższającym.

Urządzenie obciążające wykonane zostało z trzech autotransformatorów których elementy ruchome umocowane są na wspólnej osi (które stanowią regula-

cję zgrubną obciążenia) i trzech rezystorów laboratoryjnych pracujących niezależnie (które stanowią regulację dokładną).

### 5.3 Przebieg ćwiczenia

Prowadzący określa zakres ćwiczenia , podaje grupę połączeń transformatora oraz inne podstawowe dane znamionowe , podaje dane znamionowe przekładników.

#### *Likwidowanie przesunięcia kąтового*

Po narysowaniu schematu układu połączeń uzwojeń transformatora zaznacza się kierunek prądów fazowych w tych uzwojeniach i rysuje się wykresy wektorowe prądów fazowych oraz prądów w przewodach fazowych przyłączonych do zacisków izolatorów przepustowych po obu stronach transformatora. Ustala się grupę połączeń uzwojeń transformatora. Następnie zaznacza się kierunki prądów w uzwojeniach wtórnych przekładników prądowych po obu stronach transformatora i sporządza się wykresy wektorowe tych prądów. Przy łączeniu uzwojeń wtórnych przekładników przestrzega się zasady kojarzenia w gwiazdę po stronie trójkąta i trójkąta po stronie gwiazdy.

Wykresy wektorowe prądów w obwodach pierwotnych i wtórnych przekładników prądowych po stronie górnego i dolnego napięcia transformatora są podstawą do wykonania połączeń obwodów wtórnych przekładników z gałęziami różnicowymi zabezpieczenia. Po wykonaniu połączeń obwodów wtórnych przeprowadza się pomiary prądów w układzie zabezpieczenia różnicowego wzdłużnego transformatora. Regulację prądu płynącego przez uzwojenia transformatora przeprowadza się za pomocą autotransformatora regulacyjnego 3-fazowego. Zwiększając wartość prądu płynącego przez uzwojenia transformatora obserwuje się wskazania amperomierzy. Po wskazaniu przez A' względnie A wartości 5A , odczytuje się wskazania pozostałych amperomierzy i odnotowuje się w tablicy.



Tablica 3 Zestawienie połączeń do zaczepów auto transformatora prądowego wyrównawczego typu Tw , przy prądzie wtórnym równym 5A

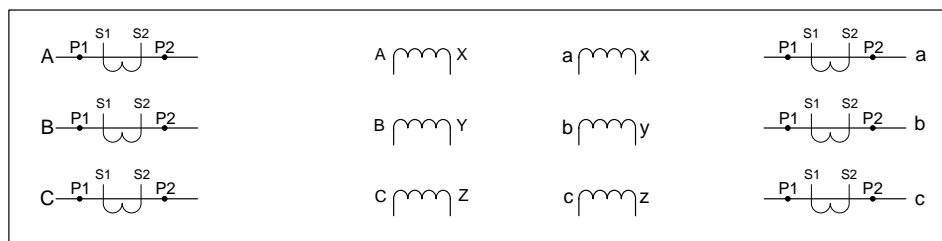
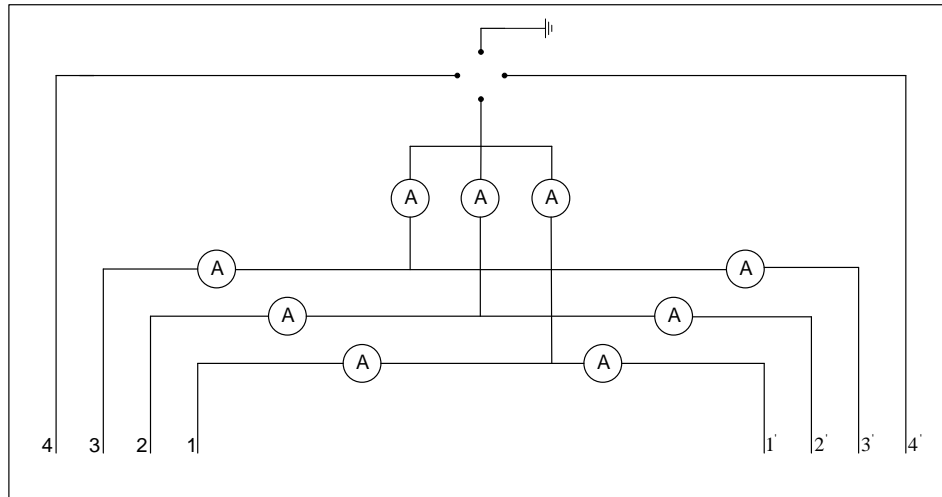
| Prąd w uzwojeniu pierwotnym | Numery zacisków do przyłączenia przekładników prądowych | Numery zacisków do przyłączenia przekąźnika |
|-----------------------------|---|---|
| 8,13                        | 1-11  | 1-2   |
| 8,00                        | 1-11  | 1-3   |
| 7,93                        | 1-10  | 1-2   |
| 7,80                        | 1-10  | 1-3   |
| 7,63                        | 1-9   | 1-2   |
| 7,50                        | 1-9   | 1-3   |
| 7,35                        | 1-8   | 1-2   |
| 7,23                        | 1-8   | 1-3   |
| 7,05                        | 1-7   | 1-2   |
| 6,95                        | 1-7   | 1-3   |
| 3,65                        | 1-2   | 1-6   |
| 3,60                        | 1-3   | 1-7   |
| 3,55                        | 1-2   | 1-7   |
| 3,46                        | 1-3   | 1-8   |
| 3,40                        | 1-2   | 1-8   |
| 3,33                        | 1-3   | 1-9   |
| 3,28                        | 1-2   | 1-9   |
| 3,21                        | 1-3   | 1-10  |
| 3,15                        | 1-2   | 1-10  |
| 3,12                        | 1-3   | 1-11  |
| 3,07                        | 1-2   | 1-11  |

## Wnioski.

### 6. Pytania kontrolne.

1. Wymienić zabezpieczenia służące do ochrony transformatorów przed zwarciami wewnętrznymi, omówić zabezpieczenie nadprądowe bezzwłoczne(podać schematy obwodów pomiarowych i sterowniczych, oraz omówić dobór nastaw zabezpieczeń).
2. Wymienić zabezpieczenia służące do ochrony transformatorów przed zwarciami wewnętrznymi, omówić zabezpieczenie gazowo – przepływowe, oraz gazowo-przepływowego przełącznika zaczepów.
3. Wymienić zabezpieczenia służące do ochrony transformatorów przed zwarciami wewnętrznymi, omówić zabezpieczenie różnicowo prądowe (zasada działania, stabilizacja zabezpieczenia, oraz wyznaczanie wartości prądu rozruchowego).
4. Wymienić zabezpieczenia służące do ochrony transformatorów przed zwarciami zewnętrznymi, omówić zabezpieczenie nadprądowe zwłoczne(podać schematy obwodów pomiarowych i sterowniczych, oraz omówić dobór nastaw zabezpieczeń).
5. Wymienić zabezpieczenia służące do ochrony transformatorów przed zwarciami zewnętrznymi, omówić zabezpieczenie nadprądowe zwłoczne z blokadą napięciową(podać schematy obwodów pomiarowych i sterowniczych, oraz omówić dobór nastaw zabezpieczeń).
6. Wymienić zabezpieczenia służące do ochrony transformatorów przed zwarciami zewnętrznymi, omówić zabezpieczenie odległościowe(podać schematy obwodów pomiarowych i sterowniczych, oraz omówić dobór nastaw zabezpieczeń).
7. Wymienić zabezpieczenia służące do ochrony transformatorów przed zwarciami zewnętrznymi, omówić zabezpieczenie ziemnozwarciowe.
8. Wymienić zabezpieczenia służące do ochrony transformatorów od przeciążeń ruchowych, omówić zabezpieczenie nadprądowe niezależne zwłoczne(podać schematy obwodów pomiarowych i sterowniczych, oraz omówić dobór nastaw zabezpieczeń).
9. Wymienić zabezpieczenia służące do ochrony transformatorów od przeciążeń ruchowych, omówić zabezpieczenie nadprądowe zwłoczne zależne.
10. Wymienić zabezpieczenia służące do ochrony transformatorów od przeciążeń ruchowych, omówić zabezpieczenie termometryczne, oraz maksymalnej temperatury typu „Bewag”.
11. Wymienić zabezpieczenia służące do ochrony transformatorów od przeciążeń ruchowych, omówić zabezpieczenie za pomocą modelu cieplnego.

12. Narysować schemat układu zabezpieczenia różnicowego wzdłużnego transformatora o grupie połączeń ...., oraz rozptyw prądów w uzwojeniach transformatora i obwodach wtórnych przekładników. Narysować wykresy wektorowe prądów płynących w uzwojeniach transformatora i w uzwojeniach wtórnych przekładników.



13. Dla transformatora grupie połączeń Yd11, 5 oraz Dy11, 5 dobrać połączenia przekładników prądowych w układzie różnicowym i narysować rozptyw prądów zwarciovych w transformatorze i układzie różnicowym przekładników prądowych przy zwarcu dwufazowym zewnętrznym po stronie trójkąta transformatora oraz jednofazowym zwarcu wewnętrznym po stronie gwiazdy transformatora..
14. Narysować i omówić charakterystykę stabilizacji przekładnika różnicowego. Napisać wzór na współczynnik stabilizacji. Wymienić przekładniki różnicowe stabilizowane.
15. Narysować układ połączeń przekładników prądowych zabezpieczenia różnicowego transformatora o grupie połączeń, dobrać przekładniki prądowe i autotransformatory wyrównawcze. Dane transformatora 10 MVA, 6/110  $\pm$  5% kV.
16. W jaki sposób można zabezpieczać od zwarć wewnętrznych transformatory trójzwojeniowe?