



POLITECHNIKA
LUBELSKA
WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI
I INFORMATYKI



WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI
I INFORMATYKI

KATEDRA URZĄDZEŃ ELEKTRYCZNYCH
I TECHNIKI WYSOKICH NAPIĘĆ

LABORATORIUM

Stacje elektroenergetyczne

Ćwiczenie nr 8

**Badanie napięcia powrotnego
przy wyłączaniu zwarć pobliskich**

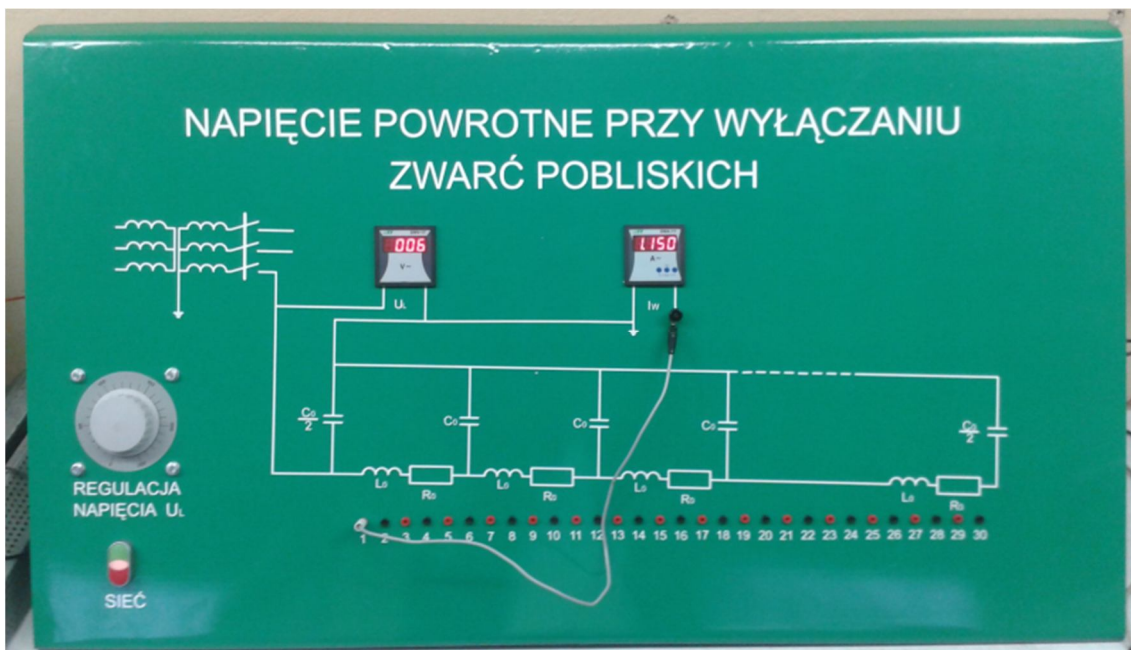
1. Cel ćwiczenia

Zapoznanie się ze zjawiskami występującymi podczas wyłączania zwarć pobliskich.

2. Opis stanowiska laboratoryjnego

Stanowisko służące do badania napięcia powrotnego przy wyłączaniu zwarć pobliskich jest modelem linii napowietrznej jednotorowej wysokiego napięcia. Widok płyty czołowej stanowiska przedstawia rysunek 1.

Stanowisko załączamy i wyłączamy przez przyciśnięcie przycisku sterowniczego typu „załłącz/wyłącz” z lampką kontrolną oznaczonego na tablicy symbolem Sieć.



Rys. 1. Widok płyty czołowej stanowiska do badania napięcia powrotnego przy wyłączaniu zwarć pobliskich.

3. Wiadomości teoretyczne

3.1 Zwarcia pobliskie

Zwarcie pobliskie jest to zwarcie pojawiające się w linii wysokiego napięcia w pewnej odległości od wyłącznika (od kilkuset metrów do kilku kilometrów). Tego typu zwarcia, pomimo tego, że prąd zwarcia jest mniejszy niż w przypadku zwarcia bezpośrednio za wyłącznikiem, mogą powodować powstanie trudniejszych warunków wyłączeniowych ze względu na obecność napięcia powrotnego.

Napięcie powrotne jest to napięcie narastające na przerwie między zaciskowej wyłącznika po ustaniu przepływu prądu wyłączeniowego. Przebieg tego napięcia charakteryzuje się dużą stromością początkową.

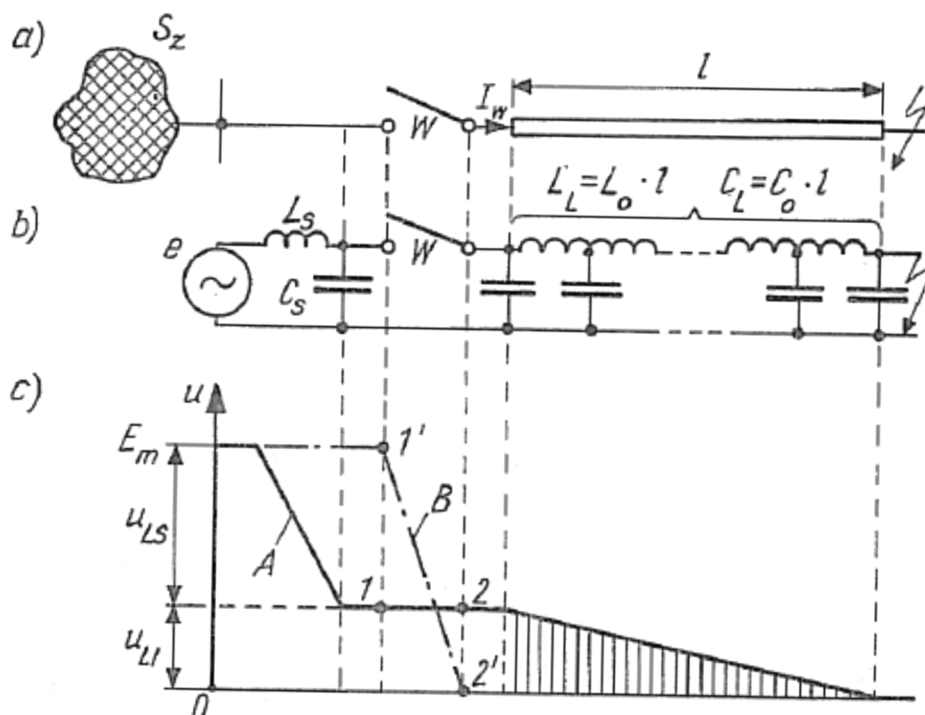
Założeniem przy budowie modelu do ćwiczenia było odwzorowanie przebiegów napięcia powrotnego przy zwarciu pobliskim, zbadanie wpływu odległości miejsca zwarcia od wyłącznika na wartość pierwszej amplitudy i początkowej stromości napięcia początkowego. Zjawiska te zostały przedstawione na przykładzie jednofazowego napięcia zwarcia doziemnego w linii napowietrznej 110 kV.

3.2 Wyłączanie zwarć pobliskich

Stwierdzono wiele przypadków nie zgaszenia przez wyłączniki najwyższego napięcia łuku w czasie wyłączania zwarć powstałych w linii nie bezpośrednio za wyłącznikiem, a w odległości kilkuset metrów lub kilkuset kilometrów.

Z rys.2 wynika, że po wyłączeniu zwarcia napięcie na biegunach wyłącznika od strony zasilania wzrasta od E_m do wartości E_e , podczas, gdy od strony zwarcia maleje od E_m do zera. W czasie przechodzenia z jednego stanu do drugiego muszą powstać przebiegi wyrównawcze.

W obwodzie zwarciovym $WN \cos\phi$ jest rzędu 0,2 dlatego można przyjąć, że w czasie prąd jest przesunięty o 90° względem E_m . Ponieważ zjawiska przebiegają szybko, można przyjąć, że wartość chwilowa SEM źródła jest stała. W miarę zmniejszania się wartości bezwzględnej prądu napięci łuku wzrasta zgodnie z jego charakterystyką dynamiczną, wobec czego prąd maleje szybciej niż to wynika z przebiegu sinusoidalnego. W chwili t_0 prąd przestaje płynąć a napięcie łuku wzrasta do wartości gaśnięcia U_g (rys.3). Napięcie w przerwie, które w chwili zgaśnięcia łuku osiągnęło wartość U_g , zmienia zwrot i wzrasta do wartości chwilowej SEM źródła, przechodząc w chwili t_1 przez zero. Ze względu na istnienie pojemności połączonej równolegle do przerwy (rys.2) zmiana ta nie następuje nagle, lecz w ciągu pewnego czasu, przy czym powstają silnie tłumione drgania nałożone na krzywą SEM źródła zasilającego (krzywa 3 na rys.3). W skutek wzrostu napięcia łuku przed jego zgaśnięciem, gdy prąd w obwodzie zbliża się do zera wzrasta napięcie na pojemności równoległej do wyłącznika przez co w obwodzie płynie prąd I_c ładujący tę pojemność. Przy przepływie dużego prądu, gdy napięcie łuku jest prawie stałe, prąd I jest bardzo mały.



Rys. 2. Schemat obwodu zwarciovego.

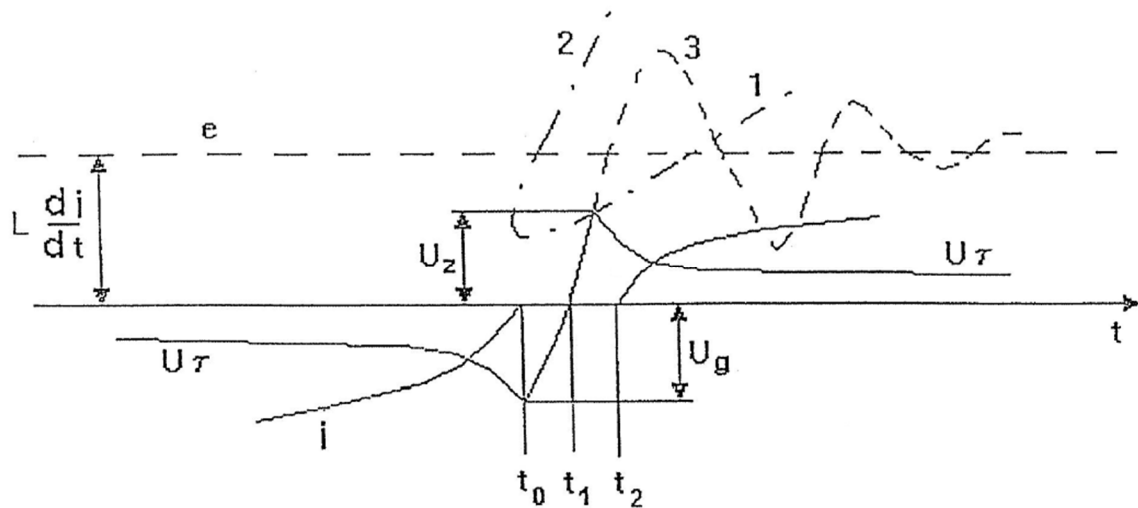
a) Układ zastępczy zwarcia jednofazowego powstałego w pewnej odległości od wyłącznika „W” w sieci 3-fazowej z uziemionym punktem zerowania;

L_0 – jednostkowa indukcyjność linii,
 C_0 – jednostkowa pojemność linii,
 L – długość linii.

b) Rozkład napięcia w obwodzie zwarciovym:

----- – przebieg napięcia po wyłączeniu zwarcia,
 ————— – przebieg napięcia w czasie trwania zwarcia.

Prąd ten płynie również po zgaśnięciu łuku aż do chwili zaniku fali napięcia powrotnego. Ze względu, że w pierwszej chwili po zgaśnięciu łuku przerwa jest jeszcze przewodzącą, płynie przez nią w dalszym ciągu prąd, który zanika dopiero po całkowitym zdejonizowaniu kolumny połukowej. Jeżeli wzrost odporności elektrycznej przerwy przebiega wzdłuż krzywej 1 (rys.3) to w chwili t_2 różnica napięć na elektrodach przekroczy wartość napięcia potrzebną do ponownego przeskoku i łuk ponownie się zapala. Jeżeli odporność przerwy będzie przebiegała według krzywej 2 (rys.3), tak szybko że nigdy nie przetnie się z krzywą 3 (napięcia powrotnego) to przeskok nie powstanie i łuk nie zapali się ponownie. W rzeczywistej linii WN opisane zjawisko ma charakter falowy.



Rys. 3. Przebieg prądu i napięcia w chwili bliskiej przechodzenia prądu przez zero.

- 1, 2 - krzywe wzrostu odporności elektrycznej przerwy,
- 3 - napięcia powrotne,
- t_0 - chwila zgaśnięcia łuku,
- t_1 - chwila przejścia napięcia powrotnego przez zero,
- U_τ - napięcie łuku,
- U_g - napięcie gaśnięcia łuku,
- U_z - napięcie zapłonu.

Wartość napięcia powrotnego możemy wyznaczyć z zależności:

$$u_p = 2\sqrt{2}I_w x_0 l = 1,7I_w l \quad (1)$$

gdzie:

- I_w – prąd wyłączany [A],
- l – długość linii napowietrznej za wyłącznikiem [km],
- x_0 – reaktancja indukcyjna linii [Ω].

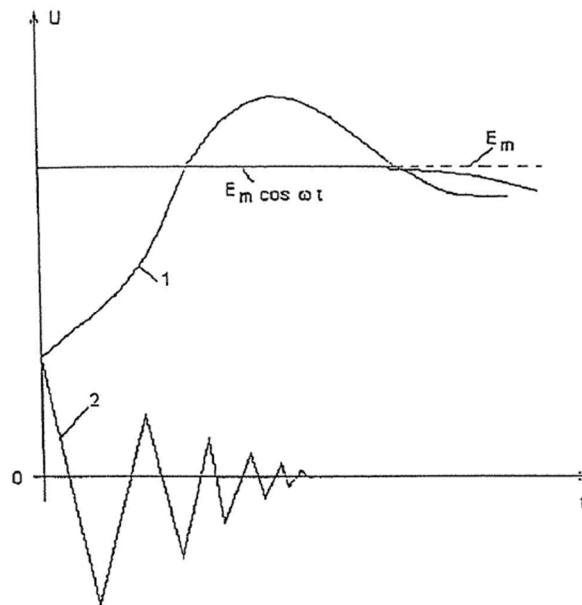
Początkowa stromość napięcia powrotnego w V/s jest równa:

$$\frac{du_c}{dt} = \sqrt{2}cI_w x_0 10^{-6} = \sqrt{2}z_c \omega I_w 10^{-6} = 0,22I_w \quad (2)$$

gdzie:

c – prędkość rozchodzenia się fali elektromagnetycznej w linii,

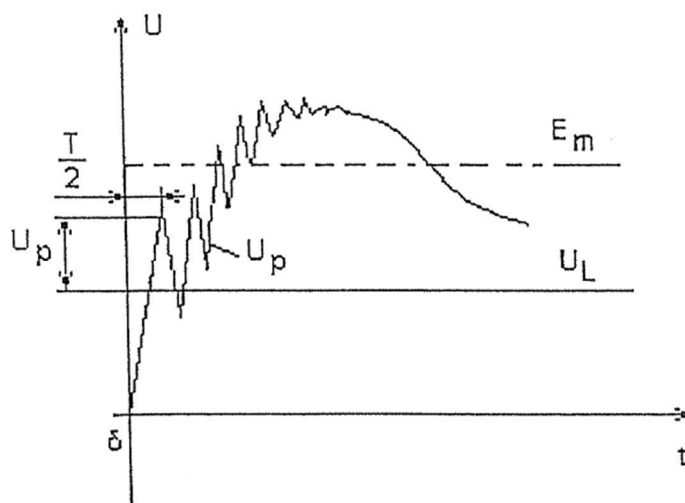
z_c – impedancja falowa linii.



Rys. 4. Składowe napięcia powrotnego.

1 – napięcie przed wyłącznikiem,

2 – napięcie za wyłącznikiem.



Rys. 5. Napięcie pojawiającego się między stykami wyłącznika (napięcie powrotne).

W przypadku zwarcia blisko wyłącznika prąd zwarciový i początková stromość napięcia powrotnego są duże (na podstawie wzoru 2), natomiast pierwsza amplituda napięcia bardzo mała (na podstawie wzoru 1), gdyż odległość od miejsca zwarcia jest niewielka. Przy zwarciach odległych stromość napięcia powrotnego jest mała, natomiast amplituda znaczna.

3.3 Wpływ różnych czynników na napięcie powrotne

Na początkową stromość i wartość pierwszej amplitudy napięcia powrotnego wpływa wiele czynników. Należą do nich:

- wielkość napięcia roboczego,
- rodzaj zwarcia,
- rodzaj linii,
- liczba linii dołączonych do wspólnych szyn od strony zasilania,
- charakter uziemienia punktu zerowego
- kolejność wyłączania biegunów wyłącznika,
- napięcie łuku
- przewodność kolumny połukowej,
- tłumienie w linii.

3.4 Strefa niebezpieczna przy zwarcu pobliskim

Z analizy wzorów (1) i (2) wynika, że istnieje pewien zakres odległości miejsca zwarcia w linii od wyłącznika w którym powstają najbardziej niekorzystne warunki pracy wyłącznika – stosunkowo duży prąd wyłączany oraz znaczna wartość amplitudy napięcia powrotnego i stromość jego wzrostu.

Ponieważ wartość włączanego prądu zwarciovego zależy od długości zwartego odcinka linii

$$I_w = \frac{U}{x_s + x_d} \quad (3)$$

stąd pierwsza amplituda napięcia powrotnego:

$$U_p \left(\frac{T}{2} \right) = 2E_m - 2\sqrt{2}x_s I_w \quad (4)$$

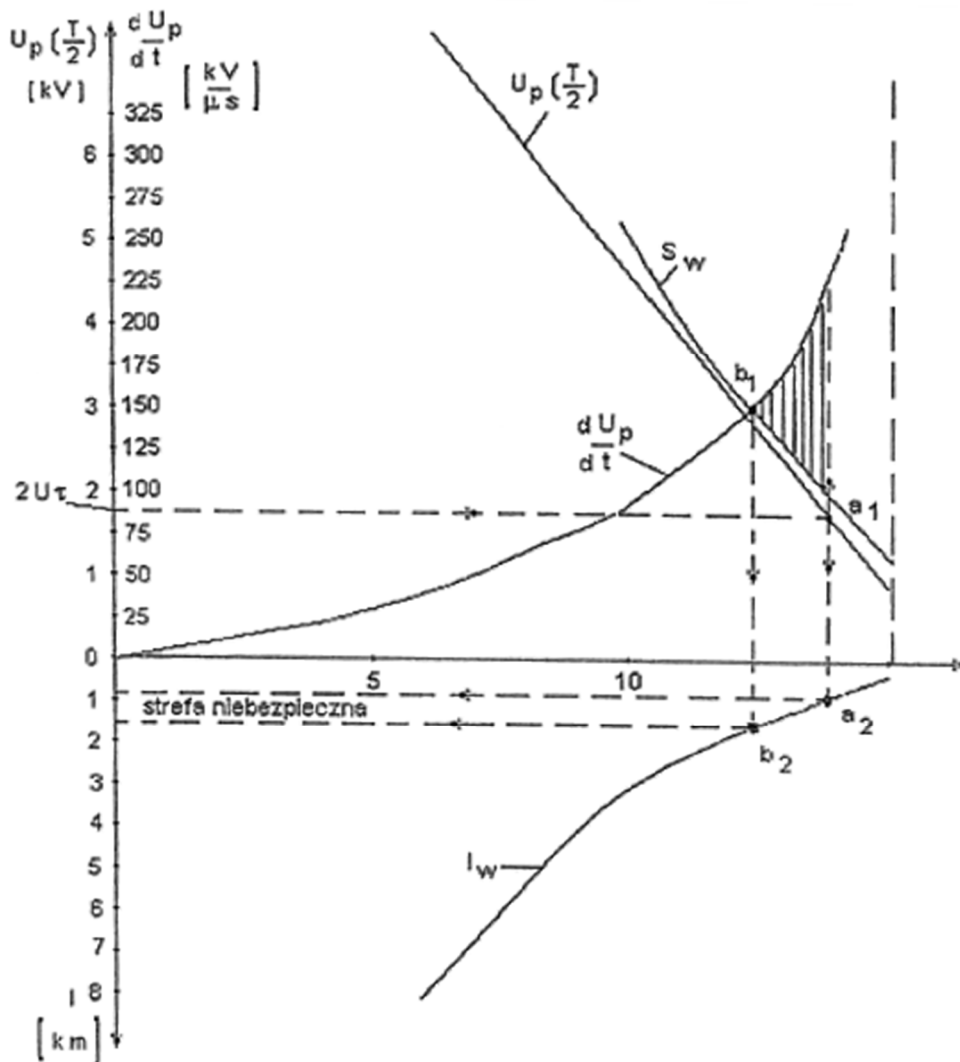
Początková wartość napięcia powrotnego:

$$\frac{dU_p}{dt} = \frac{E_m \omega z_0}{x_s + x_d} \quad (5)$$

3.5. Wyznaczanie strefy niebezpiecznej

Każdej wartości prądu zwarciego inna krzywa wzrostu wytrzymałości dielektrycznej przerwy połukowej. Każdej z tych krzywych odpowiada graniczna stromość napięcia powrotnego przy której krzywa napięcia powrotnego jest styczna do krzywej $U_T = f(t)$ i jeszcze nie wystąpi ponowny zapłon łuku.

$$S_w = \left(\frac{dU_p}{dt} \right)_{max} \quad (6)$$



Rys. 6. Wyznaczanie strefy niebezpiecznej przy wyłączaniu zwarć pobliskich.

Wobec tego właściwości wyłącznika przy wyłączaniu różnych prądów mogą być scharakteryzowane krzywą $S_w = f(I_w)$. Krzywa ta może być dla danego typu wyłącznika

określana na podstawie badań lub podawana przez producenta. Jej znajomość jest potrzebna do wyznaczenia strefy niebezpiecznej (rys. 6).

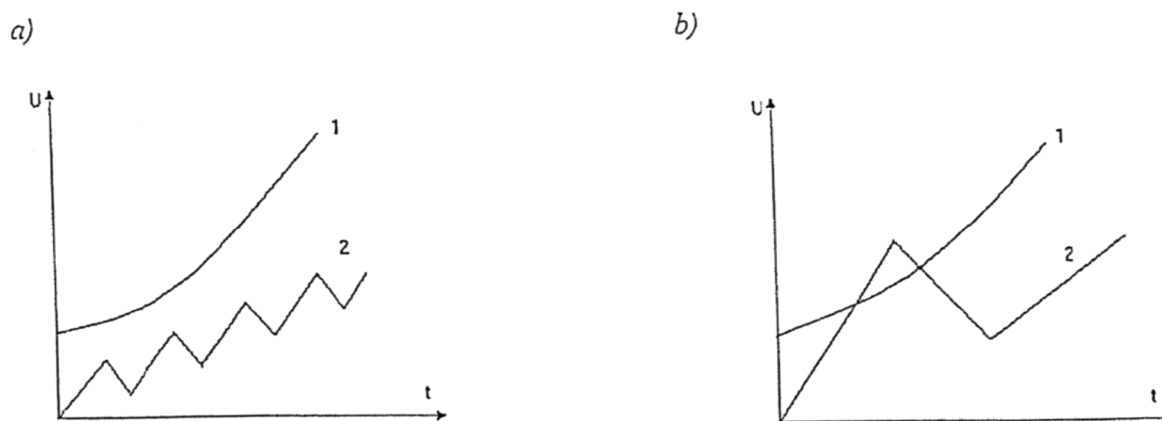
Wynika stąd, że dla stromości większych od S_w (leżących powyżej tej krzywej) może wystąpić powtórny zapłon łuku, o ile pierwsza amplituda napięcia powrotnego będzie miała wartość większą od początkowej wartości wytrzymałości powrotnej $U_z(0)$, która nigdy nie jest mniejsza od wartości napięcia łuku $u_i(0)$.

Pierwsza amplituda napięcia powrotnego powinna być określona zależnością (7), która pozwala wyznaczyć strefę niebezpieczną w sposób pokazany na rys.6.

$$U_p\left(\frac{T}{2}\right) \leq 2u_i(0) \quad (7)$$

Znając wartość napięcia łuku w chwili dojścia prądu zwarciovego do zera i przyjmując warunek (7), z krzywej $U_p\left(\frac{T}{2}\right) = f(I)$ określa się dla $2u_l$ ($2u_l = 0,1E_m$) prąd, a dla tego prądu z krzywej $I_w = f(l)$ - początek strefy niebezpiecznej (punkty $a_1 - a_2$ rys.7). Dla amplitud większych, położonych na lewo od prostej a_1-a_2 , może wystąpić powtórny zapłon łuku. Stromość $\frac{dU_p}{dt}$ większe, od S_w , na prawo od prostej b_1-b_2 wyznaczającej koniec strefy niebezpiecznej.

W zakreskowanym obszarze (rys. 6) spełnione są równocześnie obydwie warunki powtórnego zapłonu - przekroczona jest graniczna stromość napięcia powrotnego i jego dopuszczalna amplituda. Wobec czego napięcie powrotne musi przeciąć się z krzywą wytrzymałości i spowodować powtórny zapłon łuku.



Rys. 7. Napięcie powrotne (2) i wytrzymałość powrotna (1) przy wyłączaniu zwarć pobliskich.

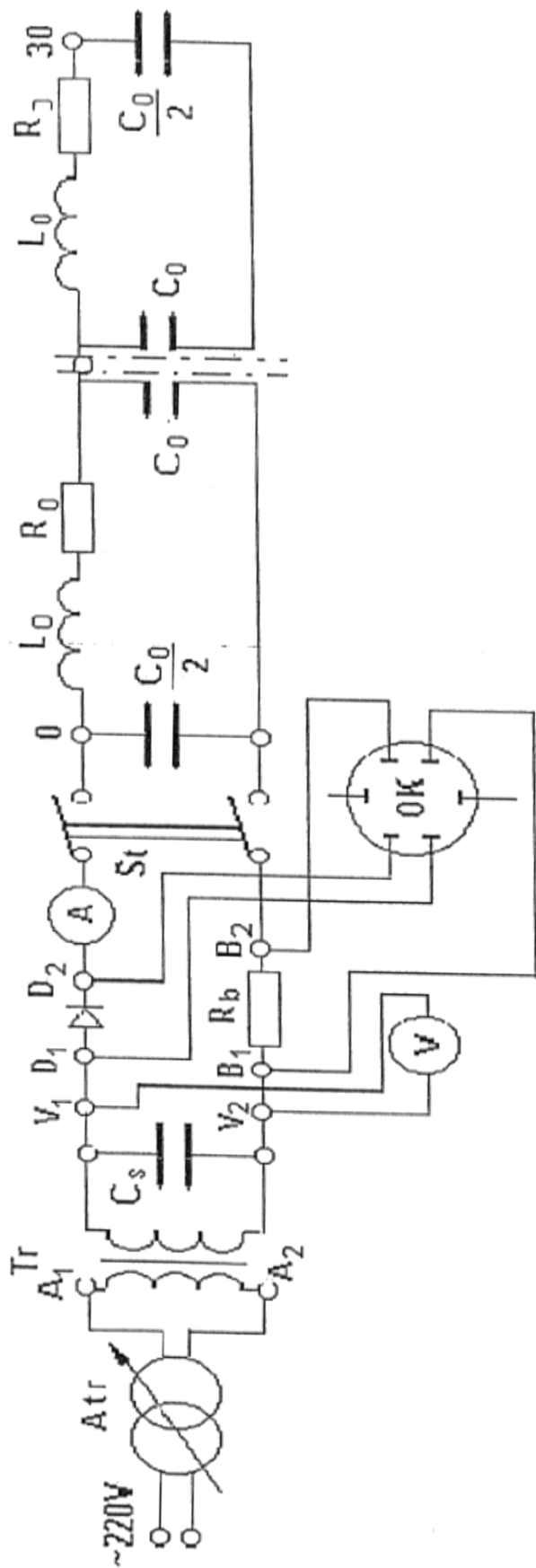
a - krzywe 1 i 2 nie przecinają się - powtórny zapłon nie wystąpi,
b - krzywe 1 i 2 przecinają się - występuje powtórny zapłon.

4. MODEL UKŁADU

Obiektem badawczym użytym do ćwiczenia jest niskonapięciowy model układu elektroenergetycznego o następujących parametrach:

- linia napowietrzna jednotorowa, wykonanej przewodem AFL-6 120 o przekroju rzeczywistym $122,6 \text{ mm}^2$, całkowitym $143,5 \text{ mm}^2$, w układzie płaskim,
- odległość przewodów $b = 2900 \text{ mm}$, promień przewodów $r = 6,18 \text{ mm}$, długość linii $l = 8 \text{ km}$,
- sieć zasilająca o mocy zwarciowej $S_z = 300 \text{ MVA}$, napięcie znamionowe $U_n = 110 \text{ kV}$.
- skala zmniejszenia $k_u = k_i = 1:10\ 000$,

Model odwzorowuje jednofazowe zwarcie doziemne. Linia odwzorowana jest za pomocą 30 czwórników typu π wg rys.8.



Rys. 8. Schemat ideowy do pomiaru napięć powrotnych przy zwarciach pobliskich.

- Atr – autotransformator
- A1, A2 – zaciski laboratoryjne
- D – dioda półprzewodnikowa
- St – stycznik
- 0-30, D₁, D₂, B₁, B₂ – gniazda

4.1 Opis budowy stanowiska laboratoryjnego

Na płycie czołowej (rys.9) umieszczone są:

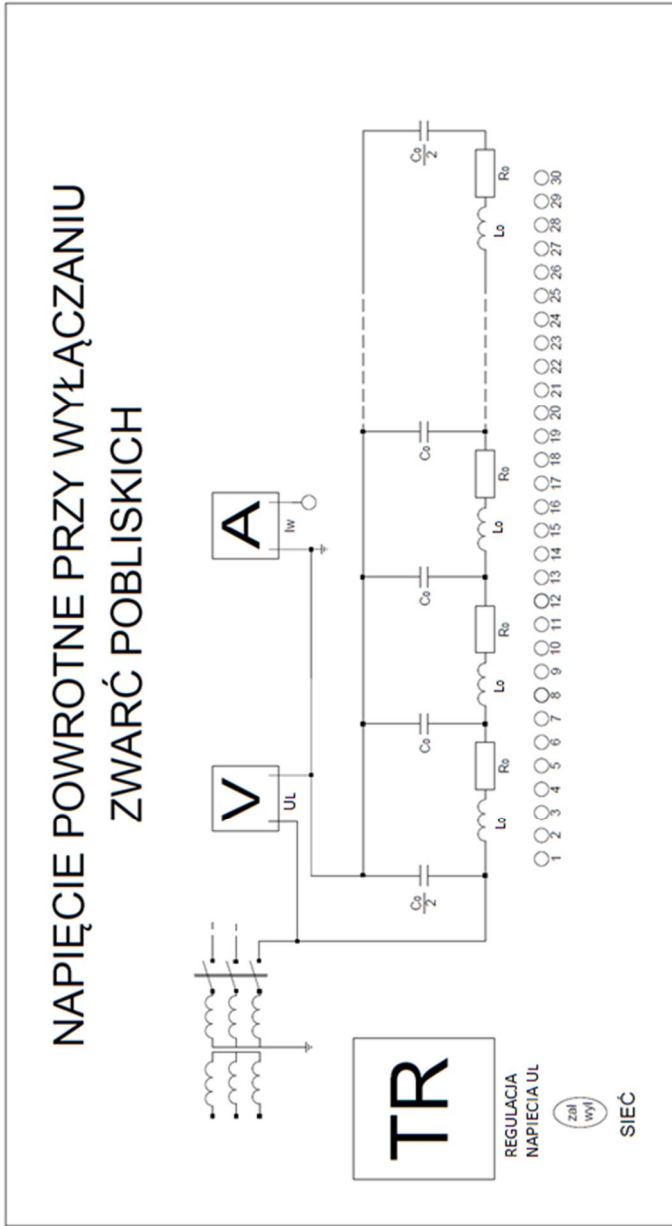
- przycisk „Sieć” typu załącz – wyłącz służy do włączania i wyłączania stanowiska,
- do regulacji napięcia zasilania używamy autotransformatora,
- amperomierz służy do pomiaru prądu zwarcia,
- woltomierza mierzy wartość napięcia zasilającego,
- gniazda D_1 , D_2 i B_1 , B_2 pozwalające łączyć stanowisko laboratoryjne z oscyloskopem dwustrumieniowym, który umożliwia obserwację:
 - składowej wymuszonej (od strony sieci) napięcia powrotnego,
 - składowej swobodnej (od strony linii) napięcia powrotnego,
 - napięcia powrotnego będącego złożeniem obu składowych,
 - przebiegu prądu między zaciskami B_1 B_2 ,
- gniazda oznaczone cyframi 0-30 stanowią wyprowadzenia poszczególnych czwórników typu π .

Długość zwartego odcinka linii zmienia się poprzez zwieranie za pomocą przewodu dowolnego gniazda 1-30 z zaciskiem amperomierza A_1 . Zmiana położenia przewodu o jedno gniazdo odpowiada zmianie miejsca zwarcia o 266 m. W układzie zastosowano bocznik szeregowy R_b (zaciski B_1 B_2) o $k_i = 0,8045$ A/mV.

3.2. Przygotowanie stanowiska do przeprowadzenia pomiarów

W celu wykonanie pomiarów należy wykonać następujące czynności:

- załączyć stanowisko,
- ustawić odpowiednie napięcie na autotransformatorze,
- do zacisków D_1 D_2 i B_1 B_2 przyłączyć oscyloskop dwustrumieniowy (w przypadku tego ćwiczenia zamiast oscyloskopu będziemy używali komputera, który posiada wbudowaną specjalną kartą oscyloskopową PCI),
- do gniazda amperomierza włączyć jeden koniec przewodu „p” a drugi pozostawić wolny,
- przy pomocy autotransformatora ustawić napięcie na zamontowanym na tablicy czołowej woltomierzu na poziomie 7V, w czasie pomiarów nie korygować napięcia,
- wolny koniec przewodu „p” połączyć z gniazdem 1-30, odczytać wskazania mierników i oscyloskopu,
- pomiary zapisywać w tabelach pomiarowych przygotowanych na podstawie tabel zamieszczonych w instrukcji.



Rys. 9. Płyta czobowa stanowiska do pomiaru napięcia powrotnego.

5. WYKONANIE POMIARÓW

5.1 Wyznaczenie charakterystyki prądu zwarcia I_w oraz napięcia linii U_l w funkcji l od miejsca zwarcia

W układzie jak rys.8 wyznaczyć charakterystyki $I_w = f(l)$, $U_l = f(l)$ dla przypadku „z diodą” i „diodą zwartą”. Prąd i napięcie odczytać na amperomierzu i woltomierzu. Porównać ze wskazaniami oscyloskopu. Dla przypadku „dioda zwarta” należy zewrzeć zaciski D_1 oraz D_2 . Wyniki zestawić w tabeli 1 oraz przedstawić graficznie na wykresie.

Pomiary przeprowadzić przesuwając punkt zwarcia w kierunku wyłącznika, tj. od zacisku 30 do 1.

Tabela 1. Wyznaczenie charakterystyki prądu zwarcia I_w oraz napięcia linii U_l w funkcji l od miejsca zwarcia.

Nr odczepu	Odległość miejsca zwarcia od wyłącznika	z diodą		dioda zwarta	
		I_w	U_l	I_w	U_l
-	[m]	[A]	[V]	[A]	[V]
30					
29					
28					
27					
26					
25					
-					
-					
-					
-					
-					
5					
4					
3					
2					
1					

5.2 Wyznaczenie wpływu odległości miejsca zwarcia na wartość napięcia powrotnego

Pomiary przeprowadzamy w układzie jak na rys.8 i w sposób analogiczny jak w punkcie poprzednim. Wyniki zamieścić w tabeli 2. Wartość amplitudy napięcia powrotnego $U_p(T/2)$ i $T/2$ odczytujemy z oscyloskopu. Na tej podstawie wyliczyć, dla każdego punktu stromość początkową:

$$\frac{du}{dt} = \frac{2U_p\left(\frac{T}{2}\right)}{T} \quad (8)$$

Na podstawie otrzymanych wyników wykonać charakterystyki: $\frac{dU_p}{dt} = f(I_w)$,

$U_p \left(\frac{T}{2} \right) = f(I_w), l = f(I_w)$, na wspólnym wykresie, jak na rys.6.

Wyznaczyć początek strefy niebezpiecznej (przy założeniu, że $u_l = 0,1E_m$), określić jaka musi być dla tej odległości najmniejsza wartość granicznej stromości napięcia powrotnego, aby nie istniała strefa niebezpieczna.

Tabela 2. Wyznaczenie wpływu odległości miejsca zwarcia na wartość napięcia powrotnego.

Nr odczepu	Odległość miejsca zwarcia od wyłącznika	U_p	$\frac{T}{2}$	I_w	$\frac{dU_p}{dt}$
-	[m]	[V]	[μ s]	[A]	[V/ μ s]
30					
29					
28					
27					
26					
25					
-					
-					
-					
-					
-					
5					
4					
3					
2					
1					

5. Literatura

1. Markiewicz H., *Urządzenia elektroenergetyczne*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2005.
2. Beldowski T., Markiewicz H., *Stacje i urządzenia elektroenergetyczne*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1980.