

TADEUSZ STĘPNIEWSKI, EWELINA LITWINOWICZ

Katedra Technologii i Metrologii Elektrycznej

OCENA SKUTECZNOŚCI DZIAŁANIA OSPRZĘTU ŁUKOCHRONNEGO  
IZOLATORÓW DŁUGOPNIOWYCH NA PODSTAWIE PRÓB ZWARCIOWYCH

Streszczenie. Omówiono zagrożenie izolatorów długopniowych działaniem termicznym łuku elektrycznego. Podano teoretyczne zasady wykorzystania sił magnetycznych od prądu zwarciovego na sterowanie położenia łuku. Przedstawiono zastosowaną metodykę badań zwarciovych, wyniki tych badań na izolatorach długopniowych z nowymi typami osprzętu łukochronnego i wnioski dotyczące konstrukcji osprzętu. Nowe konstrukcje osprzętu, w postaci rożków pierścieniowych z nasadkami rurowymi opracowane w Katedrze Wysokich Napięć zapewniają lepszą ochronę.

## 1. W s t ę p

W krajowych liniach elektroenergetycznych na napięcia 110, 220 i 400 kV stosowane są obecnie prawie wyłącznie izolatory nieprzebijalne, długopniowe w wykonaniu normalnym i przeciwzabrudzeniowym. Duże prądy zwarciovowe w sieciach z uziemionym punktem zerowym, dochodzące do kilkudziesięciu kA przy czasie trwania do 0,8 s, stwarzają duże zagrożenie dla ceramicznych izolatorów, na skutek termicznego działania łuku. Łuk zwarciovowy powstaje w następstwie przeskoku przy przepięciach atmosferycznych lub wewnętrznych, ale szczególnie niebezpieczny jest łuk

rozwijający się z wylądowań powierzchniowych przy przeskoku zabrudzeniowym.

Uszkodzenia termiczne powodują odłamania kloszy i pęknięcia pnia izolatorów, topienie okuć i spoiwa oraz uszkodzenia szkłwa przez złuszczenie lub zametalizowanie. Obniżeniu ulega wytrzymałość elektryczna, a uszkodzenia mechaniczne mogą spowodować pęknięcia izolatora i opadnięcie przewodu.

W celu ochrony izolatorów od działania łuku stosuje się osprzęt łukochronny, który powinien zapewniać szybkie przejęcie stóp łuku z kołpaków i ich odrzucenie w ustabilizowane położenie na końcach elektrod, co równocześnie odsuwa nasady i kolumnę łuku od powierzchni izolatora. Osprzęt łukochronny powinien również wyrównywać rozkład napięcia wzdłuż łańcucha, zmniejszać wpływ biegunowości na napięcie udarowe przeskoku oraz podwyższać napięcie początkowe przy 50 Hz celem ograniczenia zakłóceń radio-elektrycznych.

## 2. Formy konstrukcyjne osprzętu łukochronnego

Jako osprzęt ochronny stosowane są od kilku lat rozki tzw. spiralne, wykonane z pręta stalowego o średnicy 16 lub 20 mm, otaczające część ceramiczną w pobliżu kołpaków. W przypadku przeskoku zabrudzeniowego stopy łuku zostają przejęte z krawędzi kołpaków na rozki i pod wpływem sił elektrodynamicznych od prądu zwarciovego, działających na nasady łuku, odprowadzone na końce elektrod. W przypadku przepięć przeskoku następuje od razu na drodze między rozkami, krótszej od drogi przeskoku między okuciami izolatora.

W przypadku łańcuchów 220 i 400 kV, składających się z szeregowo połączonych 2 wzgl. 3 ogniw, rozki spiralne stosowane są na górnym końcu łańcuchów oraz na okuciach pośrednich, natomiast na dolnym końcu łańcucha, połączonym z przewodem roboczym, sto-

suje się pierścień otwarty z blachy o dużej powierzchni, posiadający przekrój poprzeczny w kształcie litery C z dużymi promieniami zaokrągleń, celem uzyskania wysokiego napięcia początkowego wyładowań niezupełnych.

Osprzęt spiralny został zaprojektowany w Katedrze Wysokich Napięć w roku 1962 dla linii 400 kV i produkowany jest dotychczas przez Zakłady Wytwórcze Sprzętu Sieciowego "BELOS" w Białymostku-Białej dla łańcuchów 110, 220 i 400 kV.

Dla spełnienia zadań łukochronnych rozwiązania konstrukcyjne osprzętu powinny uwzględniać siły działające na łuk od:

- a) prądu zwarciovego przepływającego przez przewód roboczy, poprzecznik i słup,
- b) ruchu rozgrzanych gazów,
- c) parcia wiatru.

Jak wspomiano już wyżej należy uwzględnić również wymagania wysokonapięciowe oraz łatwość technologiczną wykonania, trwałość ok. 20-letnią, łatwość montażu i niską cenę.

Z sił działających na łuk parcie wiatru jest przypadkowe i odgrywa rolę tylko przy małych wartościach sił magnetycznych przy prądach zwarciovych poniżej 2 kA. W sieciach z punktem zerowym uziemionym prądy są znacznie większe, a więc działanie parcia wiatru jest pomijalne.

Podmuch od rozgrzanych gazów powoduje unoszenie się łuku do góry i ma duże znaczenie w przypadku łańcuchów zawieszonych poziomo lub ukośnie. W przypadku łańcuchów odciągowych prawie poziome położenie łańcuchów powoduje istotne zmniejszenie oddziaływania magnetycznego na łuk od prądu w przewodzie przęsła oraz w słupie. Jeżeli dopływ prądu następuje przez mostek przewodowy, to wówczas działanie elektrodynamiczne od prądu w mostku jest zgodne co do kierunku z działaniem termicznym unosze-

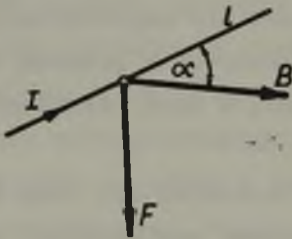
nia łuku do góry. Kierunki występujących sił, naturalnie występujących w przypadku zwarcia, są korzystne ze względu na ochronę izolatorów, a rozwiązania konstrukcyjne osprzętu uwzględniają skierowanie końcówek rożków zawsze ku górze.

Największy wpływ na położenie i ruch łuku mają siły pola magnetycznego, spowodowane przepływem prądu w przewodzie, słupie i poprzeczniku, w przypadku łańcucha przelotowego, zawieszonego pionowo.

### 3. Sterowanie położenia łuku na łańcuchach przelotowych

Celem odrzucenia łuku od powierzchni izolatora wykorzystuje się działania elektrodynamiczne pola magnetycznego, wywołanego prądem zwarciovym na sam łuk, w szczególności na jego nasady. Siła  $F$  działająca na łuk o długość  $l$  w polu magnetycznym od prądu  $I$ , przepływającego przez części metalowe obwodu (przewód, osprzęt, poprzecznik, słup) wyraża się zależnością

$$F = I B \cdot l \sin \alpha \quad (1)$$



Rys. 1. Kierunek siły  $F$  działającej na kolumnę łuku  $l$  w polu magnetycznym o indukcji  $B$

gdzie  $\alpha$  jest kątem między kierunkiem kanału łuku  $l$  a wektorem indukcji magnetycznej  $B$  (rys. 1)

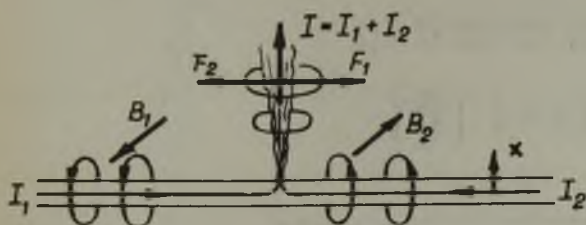
$$B = \mu_0 H_x = \mu_0 \frac{1}{4\pi x} (I_1 - I_2) \quad (2)$$

gdzie przenikalność magnetyczna bezwzględna

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \left[ \frac{\text{H}}{\text{m}} \right]$$

$x$  - odległość elementu łuku od przewodu z prądem,

$I_1$  i  $I_2$  - prądy dopływające do łuku z dwóch stron przewodu.



Rys. 2. Działanie sił pola magnetycznego na nasadę łuku przy dwustronnym dopływie prądu

Siła działająca na nasadę łuku jest największa wówczas gdy  $I_2 = 0$ , tzn. gdy dopływ prądu do łuku następuje tylko jednostronnie.

Wówczas, dla  $\alpha = 90^\circ$ , siła

$$F = \frac{\mu_0}{4\pi x} I^2 = \frac{I^2}{x} \cdot 10^{-7} \text{ [N]} \quad (3)$$

gdzie

$$I \text{ [A]}, l \text{ oraz } x \text{ w [m]}$$

Dla celów obliczeniowych dogodnie jest operować siłą jednostkową odniesioną do jednostki długości łuku dla prądu zwarciovego  $I = 1 \text{ kA}$ . Na jednostkę długości łuku w odległości  $x \text{ [cm]}$  działa siła

$$f = \frac{F}{lI^2} = \frac{10}{x} \left[ \frac{\text{N}}{\text{mkA}^2} \right] \quad (4)$$

lub

$$f \cong \frac{0,01}{x} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{cmkA}^2} \right] \quad (5)$$

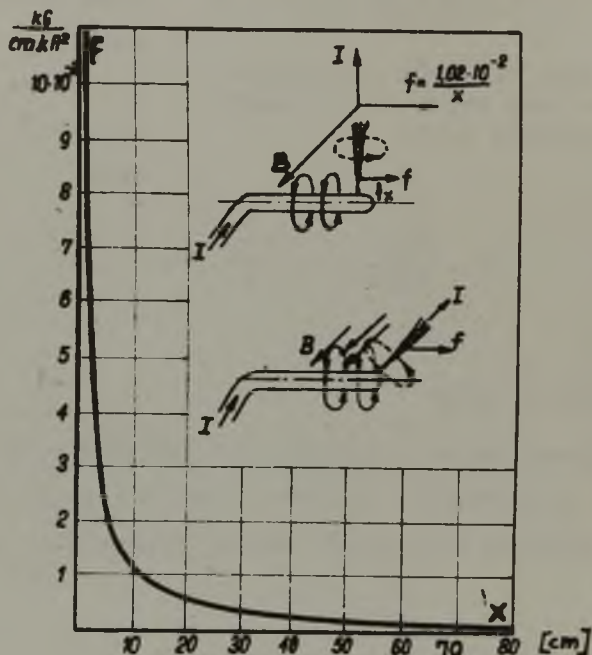
a w przypadku prądu  $I \text{ [kA]}$

$$F' = \frac{0,01I^2}{x} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{cm}} \right] \quad (6)$$

Przykładowo:

dla  $x = 10$  cm,  $I = 10$  kA otrzymuje się

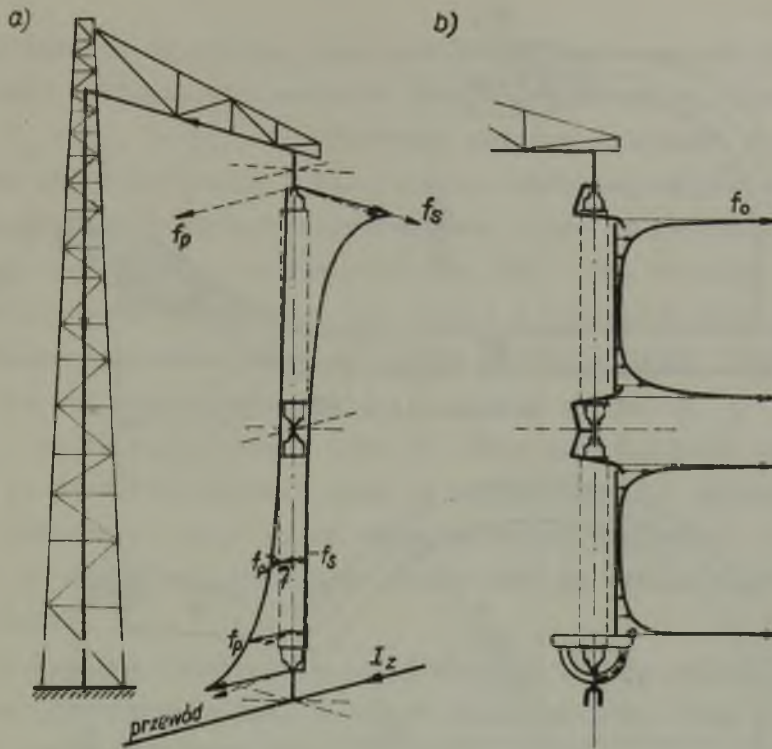
$$F' = 0,1 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{cm}} \right]$$



Rys. 3. Zależność siły jednostkowej działającej na element długości łuku w zależności od odległości od przewodu

Na rysunku 3 przedstawiono zależność siły jednostkowej  $f$  od odległości  $x$  wyrażoną wzorem (5).

Na rys. 4a przedstawiono przykładowo działanie sił na łuk prostoliniowy, palący się tuż po przeskoku w osi izolatora bez osprzętu. Składowe siły jednostkowych od prądu w poprzeczniku i słupie są zgodne co do kierunku i oddziałują wspólnie jako siła  $f_s$  w płaszczyźnie słup - poprzecznik, odchylając łuk w



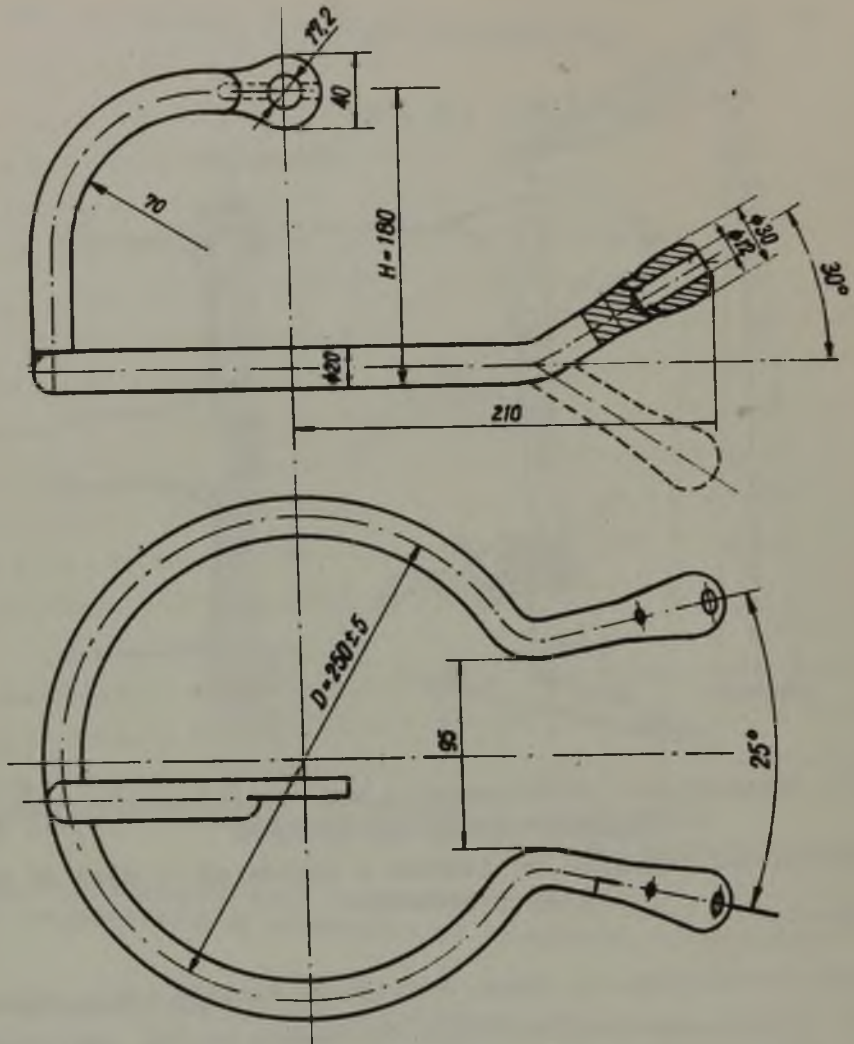
Rys. 4. Schematyczne przedstawienie sił elektromagnetycznych działających na łuk elektryczny

a) łańcuch bez osprzętu, b) łańcuch z osprzętem - siły od prądu w rożkach

kierunku zewnętrznym od słupa. Największa wartość siły występuje w pobliżu poprzecznika. Siła działająca na łuk od prądu w przewodzie  $f_p$  działa w płaszczyźnie przewodu, prostopadle do siły  $f_s$ . Kierunek siły  $f_p$  zależy od kierunku dopływu prądu z przęseł przewodu.

Największa wartość siły  $f_p$  występuje w pobliżu przewodu. Siła wypadkowa  $f$ , będąca sumą wektorów sił  $f_s$  i  $f_p$ , działa zawsze w kierunku od słupa.

. W przypadku zastosowania na łańcuchu osprzętu łukochronnego dochodzi dodatkowo silne oddziaływanie siły odchylającej  $f_0$



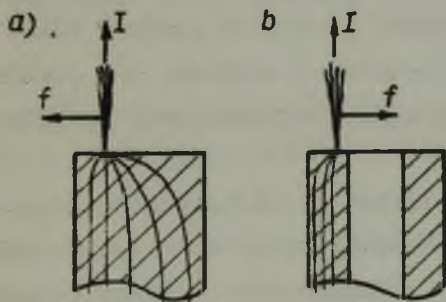
Rys. 5. Reżek pierścieniowy do łańcuchów z izolatorami długopniowymi z końcówkami rurowymi



pochodzące od przepływu prądu przez elementy osprzętu. Kierunek tej siły powinien być możliwie zgodny z kierunkiem wypadkowej sił  $f_s$  i  $f_p$ . Na rys. 4b wrysowano osprzęt ochronny w postaci rożków pierścieniowych i pierścienia ochronnego otwartego, posiadającego jednodrożne doprowadzenie prądu do końcówki opaleniowej. Jak widać z zestawienia rys. 4b z rys. 4a siła  $f_0$  posiada kierunek pokrywający się prawie z wypadkową siłą  $f$ .

Przez odpowiednie ukształtowanie osprzętu można więc uzyskać znaczne wzmocnienie sił działających na nasadę i kolumnę łuku i szybkie odrzucenie łuku od izolatora. Szybkość wędrówki łuku po osprzęcie wynosić może od kilkunastu do przeszło 100 m/s. Pulsująca w takt zmian częstotliwości wypadkowa siła pozwala na szybkie przesunięcie stopy łuku na koniec elektrody opaleniowej.

Przykładowe rozwiązanie konstrukcyjne nowego rożka pierścieniowego przedstawia rys. 5. Część pierścieniowa służy do szybkiego przejścia stopy łuku z kołpaka. Rożki z jednodrożnym doprowadzeniem pozwalają na ukierunkowanie położenia nasady łuku. Zupełnie nowym elementem konstrukcyjnym, zgłoszonym do opatentowania (T. Stępniewski) jest ukształtowanie rurowe końcówek opaleniowych (rys. 6).



Rys. 6. Kierunki wędrówki stopy łuku na końcówce rożka

a - pełnej, b - rurowej

Działanie magnetyczne prądu płynącego w przekroju rurowym końcówki, powoduje przesunięcie stopy łuku do otworu końcówki. Uzyskuje się stabilne położenie stopy łuku, zwiększenie kierunkowego działania na nasadę, zmniejszenie opalenia końcówek i zametalizowanie powierzchni izolatora.

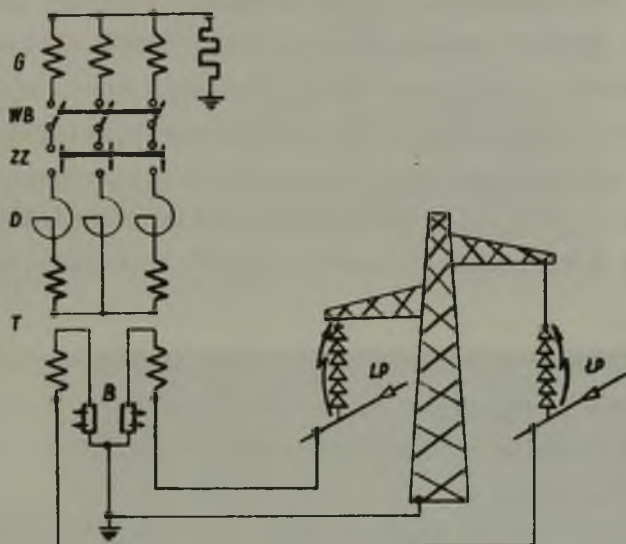
#### 4. Badania zwarciove

Zasady teoretyczne sterowania położenia łuku działaniem elektrodynamicznym prądu zwarciovego wykorzystuje się przy konstrukcji osprzętu i wyborze jego sposobu zamocowania na łańcuchach izolatorów. Sprawdzenie skuteczności działania różnych typów osprzętu może być jednak ocenione tylko na podstawie bezpośrednich prób zwarciovech. Zagadnieniu temu poświęca się dość dużo uwagi w literaturze krajów, stosujących powszechnie izolatory długopniowe. Kilka pozycji przytoczono w spisie literatury [1], [2], [3]. W kraju wykonano kilka opracowań i badań związanych z osprzętem dla izolatorów dla 110 kV [4] oraz osprzętem dla pierwszej krajowej linii 400 kV [5], [6]. Ponieważ skutecznie działający osprzęt ochronny decyduje o odporności izolatorów długopniowych na działanie łuku, a dotychczasowe badania prowadzone były w bardzo ograniczonym zakresie, zaszła konieczność szerszego przeprowadzenia prób. Zjednoczenie Energetyki zatwierdziło plan badań opracowany przez Katedrę Wysokich Napięć [7] na zlecenie i przy ścisłej współpracy Biura Projektów Energetycznych "Energoprojekt" w Krakowie. Celem badań przeprowadzanych w roku 1968 było stwierdzenie potrzeby stosowania osprzętu ochronnego oraz ocena dotychczasowych konstrukcji, dla ew. przeprowadzenia ich modernizacji.

Przy realizacji badań współpracowały również zakłady BELOS" w Bielsku w zakresie wykonania osprzętu i montażu w czasie prób. Badania zwarciove zostały wykonane w zwarciowni Instytutu Elektrotechniki w Międzylesiu.

Badania przeprowadzono na łańcuchach przelotowych, jednorzędowych, na napięciu 110 kV (26 łańcuchów) oraz na łańcuchach na napięciu 220 kV (8 łańcuchów) z izolatorów długopniowych LP75/12 produkcji Zakładów Porcelany w Boguchwale. Badania wykonano na łańcuchach bez osprzętu, z osprzętem aktualnie pro-

dukowanym i nowymi konstrukcjami prototypowymi, zaprojektowanymi w Katedrze Wysokich Napięć. W badaniach uwzględniono różne zestawy osprzętu w zakresie typów i położenia w stosunku do przewodu.

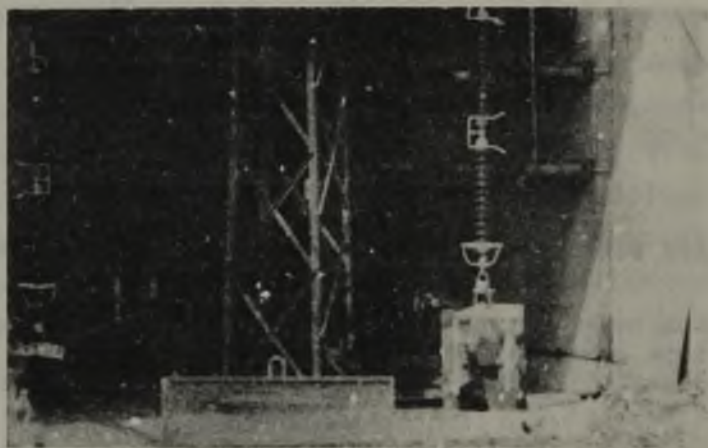


Rys. 7. Układ połączeń do prób zwarciovych łańcuchów izolatorów

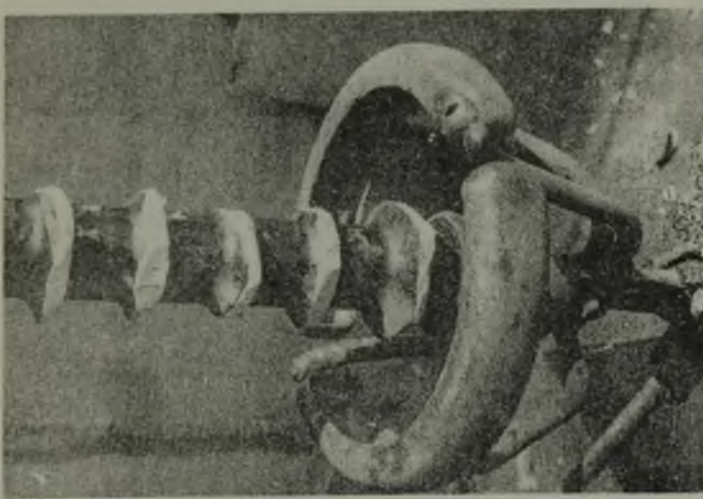
G - generator zwarciovyy TI-100, WB - wyłącznik bezpieczeństwa, ZZ - załącznik zwarciovyy, D - dławiki wysokonapięciowyy, T - transformator 10/15 kV, B - boczniki prądowyy, LP - badane łańcuchy

Próby zwarciovyy wykonywano w układzie wg rys. 7, równocześnie na dwóch łańcuchach, zasilanych w otwartym trójkącie przy napięciu ok. 13,5 kV. Dla możliwyy dokładnogo odtworzenia rzeczywistyy warunków pracy w linii, do zawieszenia łańcuchów użyto wierzchołek słupa linii 110 kV z dwoma poprzecznikami. Jako przewody zastosowano rury aluminiowyy  $\varnothing$  20 mm, dla 110 kV i  $\varnothing$  30 mm dla 220 kV, łańcuchy obciążono odpowiednio ciężarami

ok. 170 kG oraz 300 kG. Próby przeprowadzono przy prądzie zwarciowym ok. 15; 24 i 30 kA oraz czasach około 0,3; 0,6 i 0,8 s. obejmując zakresem pomiarowym iloczyn  $I_z t_z$  od ok. 5 do 24 kAs. Zapłon łuku inicjowano przy pomocy drutu z kantalu ( $\varnothing$  0,2 mm) lub miedzi ( $\varnothing$  0,35 mm). Przebiegi prądu i napięcia na łuku rejestrowano oscylografem, a samo zjawisko palenia się łuku filmowano przy użyciu kamery szybkobieżnej (1500 klatek na sekundę). Dla każdej próby sporządzony był dokładny protokół, zawierający oprócz parametrów próby zdjęcia fotograficzne łańcuchów przed i po próbie oraz opis uszkodzeń izolatorów i osprzętu, spowodowanych działaniem termicznym prądu zwarciowego. Rys. 8, 9 i 10 podają przykładowe fragmenty zdjęć fotograficznych.

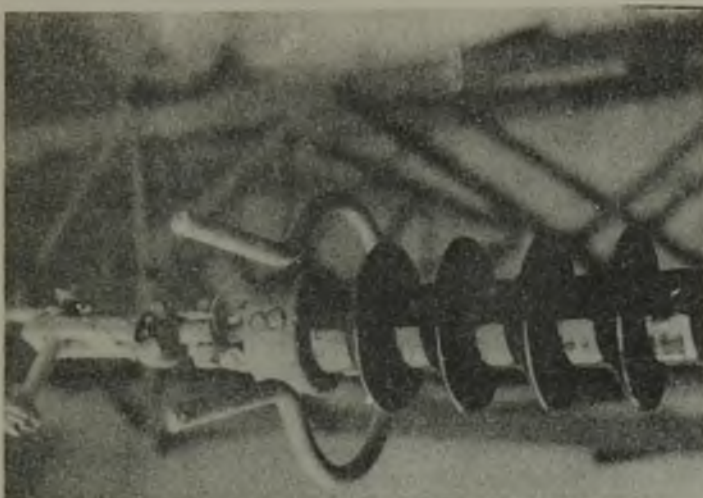


Rys. 8. Ogólny widok komory zwarciowej z łańcuchami izolatorów dla 220 kV przygotowanymi do próby zwarciowej



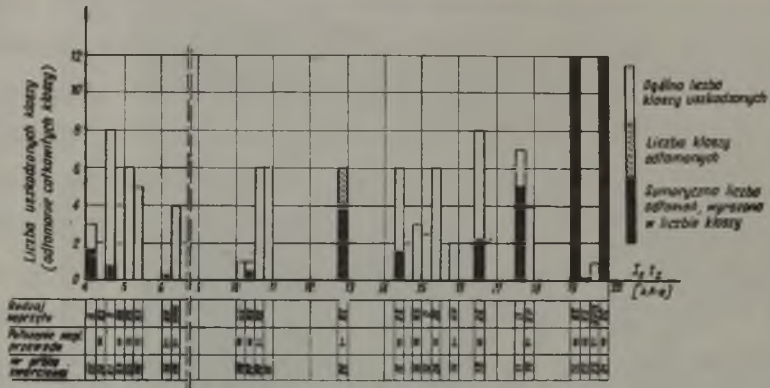
Rys. 9. Dolny koniec łańcucha 220 kV po próbie zwarciowej.

(PZ-32)  $I_{zw} = 27 \text{ kA}$ ,  $t_{zw} = 0,8 \text{ sek}$



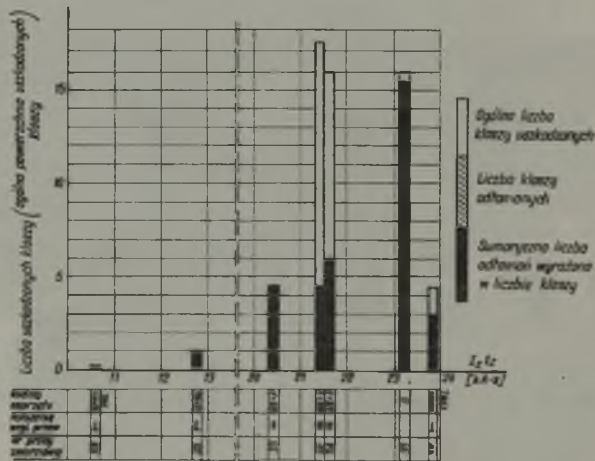
Rys. 10. Górna część izolatora LP 75/12 z różkami pierścieniowymi po próbie zwarciowej (PZ-18)

$I_{zw} = 18,5 \text{ kA}$ ,  $t_{zw} = 0,32 \text{ sek}$



Rys. 11. Zestawienie wyników prób zwarciovych na łańcuchach przelotowych LP na 110 kV

O - bez osprzętu, RS - rożki spiralne, RP - rożki pierścieniowe, RPN - rożki pierścieniowe z nasadkami, P - pierścień  $\varnothing$  450  
 PAL - pierścień AL  $\varnothing$  420 z nasadkami



Rys. 12. Zestawienie wyników prób zwarciovych na łańcuchach przelotowych LP na 220 kV

O - bez osprzętu, RS - rożki spiralne, RP - rożki pierścieniowe, RPN - rożki pierścieniowe z nasadkami, P - pierścień  $\varnothing$  450  
 PAL - pierścień AL  $\varnothing$  420 z nasadką

### 5. Ocena wyników i wnioski

Końcowe wyniki prób zwarciovych dla łańcuchów 110 kV zestawione są na rys. 11, a na rys. 12 dla łańcuchów 220 kV. Jako miarę oceny skuteczności działania osprzętu przyjęto liczbę uszkodzonych kloszy, a jako miarę zagrożenia termicznego ładunek wyrażony iloczynem prądu zwarciovego i czasu (kAs).

Z przeprowadzonych badań nasuwają się następujące wnioski:

- a) Izolatory bez osprzętu ochronnego wykazują duże uszkodzenia kloszy, pnia, spoiwa, szkliwa, już przy  $I_z t_z = 5$  kAs, a więc przy stosunkowo małych wartościach prądu zwarciovego.
- b) Rożki spiralne w obecnym wykonaniu spełniają zadania łukochronne w ograniczonym zakresie, a powyżej  $I_z t_z = 20$  kAs uszkodzenia są już bardzo duże.
- c) Próby zwarciovie z nowymi prototypami rożków pierścieniowych z końcówkami rurowymi dały lepsze wyniki w stosunku do działania ochronnego rożków spiralnych.
- d) Izolatory długopniowe stosowane w łańcuchach dla napięć 110, 220 i 400 kV, wymagają osprzętu łukochronnego. Konieczne są dalsze próby zwarciovie celem wyboru optymalnego wiązania konstrukcyjnego, spełniającego zadania zwarciovie i napięciowe.
- e) Opracowana metoda przeprowadzania prób i ocena wyników wymaga uzupełnienia określeń wytrzymałości mechanicznej na zrywanie izolatorów po próbie, lepszego przygotowania zdjęć filmowych kamerą szybkobieżną, objęcia zakresu badań iloczynu  $I_z t_z$  do ok. 40 kAs, przeprowadzenia prób również na łańcuchach odciągowych (ŁO) w układzie ŁPV oraz w układzie gwiazdowym (ŁPY).

## LITERATURA

- [1] Hilgarth G.: Lichtbogenversuche an 220 kV Hängeketten mit Schutzarmaturen" ETZ-A, H. 1/1962.
- [2] Klay H.: Der Kurzschlusslichtbogen an Hängeketten mit Schutzarmaturen. ETZ-A, H. 26/1963.
- [3] Bernhardt H.: Neue Erkenntnisse zur Frage der Notwendigkeit von Lichtbogenschutzarmaturen für 220 kV-Systeme. Energietechnik, Nr 5/1966.
- [4] Stępniewski T., Wieczorek J.: Próby zwarciove izolatorów długopniowych Przegląd Elektrotechniczny. Nr 4/1966
- [5] Stępniewski T.: Program, metody badań i wyniki prób prototypowych i odbiorczych łańcuchów izolatorów linii 400 kV. Ekspertyza SEP dla Zakładów Budowy Sieci Elektrycznych. 1963 (maszynopis).
- [6] Stępniewski T.: Izolacja linii 400 kV. Wymagania i wyniki badań. Biul. Inform, BPE Energoprojekt Kraków Nr 1/1963.
- [7] Stępniewski T., Litwinowicz E.: Studia, badania i modernizacja osprzętu ochronnego do izolatorów linii 110, 220 i 400 kV. Maszynopis dokumentacji technicznej wykonanej dla Energoprojektu - Kraków, Gliwice 1968.



ОБ УСПЕШНОСТИ ДЕЙСТВИЯ ДУГОЗАЩИТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ СТЕРЖНЕВЫХ  
ИЗОЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ ИСПЫТАНИЙ НА КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ

## Р е з ю м е

Рассмотрена опасность стержневых изоляторов от термического влияния электродуги. Указаны теоретические основы использования магнитных сил тока короткого замыкания для управления расположением дуги. Представлены примененная методика испытаний на короткое замыкание, результаты этих испытаний на стержневых изоляторах с новыми типами дугозащитного оборудования и выводы касающиеся конструкции оборудования. Новые конструкции оборудования в виде кольцевых рожков с трубчатыми насадками, разработанные на Кафедре Высоких Напряжений обеспечивают лучшую защиту.

ESTIMATION OF QUALITY OF THE ARC-PROTECTIVE FITTINGS FOR  
LONG ROD INSULATOR ON THE BASIS OF SHORT-CIRCUIT TEST

## S u m m a r y

The article concerns with a problem of thermic danger of electric arc, in the case of long rod insulators. The theoretical rules which have been given, show the way of usage of magnetic forces for the control of the position of the electric arc.

There has been shown a method of short-circuit tests used and their results on new types of arc-protective fittings for long rod insulators and conclusions on their construction have been given.

The new construction of fittings in form of ringed conics with pipe caps, elaborated at the Department of High Voltage, ensure the better protection.