

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI

REFERATY PROBLEMOWE

Zeszyt 12

Lech Stasiński

WYŁADOWANIA ŁUKOWE
WIELKIEJ CZĘSTOTLIWOŚCI
NA IZOLATORACH ODCIĄGÓW PIONOWYCH
ANTEN RADIOFONICZNYCH



Warszawa - październik 1978

Na prawach rękopisu

REFERATY PROBLEMOWE

Zeszyt 12

Lech Stasiński

WYŁADOWANIA ŁUKOWE WIELKIEJ CZĘSTOTLIWOŚCI
NA IZOLATORACH ODCIĄGÓW PIONOWYCH
ANTEN RADIOFONICZNYCH

Warszawa - sierpień 1978

5-8372

BIBLIOTEKA
Instytutu Łączności
Nr. 5-8372

Opracował:

dr inż. Lech Stasiński

Instytut Łączności - Oddział Wrocław /Z-15/

51-622 Wrocław, ul. Mikołaja Kopernika 11, tel. 48-42-41

Uzupełnienie do sprawozdania z realizacji pracy nr 133.04.Y.01 i 02

Opiniował: doc. mgr inż. Henryk Kalita

Maszynopis dostarczono dnia 20 kwietnia 1978 r.

W referacie przedstawiono wyniki pomiarów własności fizycznych łuku elektrycznego w zakresie 1-20 MHz. Omówiono także przyczyny powstawania wyładowań łukowych wielkiej częstotliwości na izolatorach odciągów pionowych anten radiofonicznych.

Redaktor: J. Borkowska

Montaż tekstu: B. Drabik

Wpłynęło do Działu Wydawniczego Instytutu Łączności
dnia 27.05.1978 r.
Nakład 70 egz.

SPIS TREŚCI

	Str.
1. Wstęp	1
2. Oporność łuku wielkiej częstotliwości i warunków jego trwałości	1
3. Przyczyny powstawania wyładowania łukowego na izolatorach odciągów anten	3
4. Wnioski	6
5. Wykaz literatury	8

1. WSTĘP

Łuk elektryczny w urządzeniach nadawczych jest zjawiskiem szkodliwym. Szczególnie niebezpieczne są wyładowania łukowe pojawiające się na izolatorach odciągów podtrzymujących pionowe radiofoniczne anteny unipolowe, stosowane w zakresie fal średnich i długich.

Łuk elektryczny jest zjawiskiem złożonym. Jego istnienie w danej sieci odciągów jest zależne od mocy P_F doprowadzonej do anteny, a jego pojawienie się - od fizycznego stanu atmosfery. Wynika to z faktu, że łuków nie ma

- przy niewielkich mocach $P_F/P_F \leq 250-500$ kW/, bez względu na właściwości atmosfery,
- przy dużych mocach $P_F/P_F > 500$ kW/, w przypadku atmosfery spokojnej.

Jest więc oczywiste, że wyładowania łukowe są inicjowane wyładowaniami iskrowymi elektryczności atmosferycznej na izolatorach odciągów. Pojawiają się tutaj dwa zagadnienia:

- 1^o Jaka jest dopuszczalna wartość mocy P_F , przy której - w danej sieci odciągów - łuk nie utrzymuje się w trwałym stanie?
- 2^o Co jest powodem wyładowań iskrowych na izolatorach odciągów i czy istnieją techniczne możliwości ich uniknięcia?

Dla rozwiązania pierwszego problemu niezbędne jest wyznaczenie własności fizycznych łuku w.cz. i znalezienie relacji między mocą w nim zawartą i mocą P_F . Drugi problem wymaga określenia rozkładu gradientu potencjału na przewodnikach odciągów.

2. OPORNOŚĆ ŁUKU WIELKIEJ CZĘSTOTLIWOŚCI

I WARUNEK JEGO TRWAŁOŚCI

Badania właściwości łuku elektrycznego w.cz., których wyniki będą

dą przedstawione, były przeprowadzone z czysto praktycznego, technicznego punktu widzenia. Nie miały one charakteru dociekań teoretycznych. Celem badań było określenie, w zakresie częstotliwości 1 - 20 MHz:

- oporności $R_A = R_A(I_A)$ łuku względem prądu I_A łuku,
- warunku trwałości łuku.

Oporność R_A wyznaczono metodą techniczną, poprzez pomiary spadku napięcia U_A na drodze łuku i prądu I_A przenoszonego przez łuk. Odpowiednie układy pomiarowe są przedstawione na rys. 1a i b^{x/}.

Pomiary wykonano w następujących warunkach:

- dla różnych odstępów d między elektrodami /rys. 1/,
- dla częstotliwości 1, 3, 6, 9, 12, 15, 20 MHz,
- przy elektrodach kulistych, półkulistych i stożkowych.

Łuk inicjowano przez krótkotrwałe zwarcie elektrod, zsynchronizowane z włączeniem mocy do układu, i ich rozsuniecie na odległość d .

Dla każdego odstepu d między elektrodami, dla każdej częstotliwości i dla każdej wielkości mocy doprowadzonej do układu - wyznaczano ciągi $\{U_{Ai}\}$, $\{I_{Ai}\}$, $\{R_{Ai}\}$, $i = 1, 2, \dots, N \geq 20$. Jako wartość R_A i I_A przyjęto wartości średnie $R_A = (\sum_i R_{Ai}) / N$, $I_A = (\sum_i I_{Ai}) / N$.

W celu znalezienia relacji opisującej funkcję $R_A = R_A(I_A)$, wyniki pomiarów przeanalizowano za pomocą konwencjonalnych metod statystycznych. Przykład uzyskanych wyników eksperymentów - dla częstotliwości $f = 3$ MHz - jest przedstawiony na rys. 2.

Uzyskane rezultaty można sformułować następująco:

1. Oporność łuku w zakresie częstotliwości 1-20 MHz można przedstawić za pomocą empirycznej formuły $R_A = a I_A^b$, $[R_A] = 1 \Omega$, $[I_A] = 1$ A, przy czym współczynniki a i b są zależne od długości drogi d łuku, $a = a(d)$, $b = b(d) < 0$. Wykresy funkcji $a(d)$ i $b(d)$ są

^{x/} Rysunki są zamieszczone na końcu referatu.

przedstawione na rys. 3. Zależność współczynników a , b od częstotliwości w zakresie 1 - 20 MHz, od kształtu elektrod, od temperatury i wilgotności powietrza - jest drugorzędna.

2. O trwałości łuku w.cz. decyduje moc P_u wydzielona w jednostce drogi łuku: Jeżeli moc P_u , przypadająca na 1 cm długości drogi łuku, jest większa niż 130-140 watów - łuk utrzymuje się w sposób trwały. W przeciwnym przypadku, łuk po jego zainicjowaniu natychmiast przerywa się i gaśnie.
3. Zbadano także zjawisko inicjowania łuku w.cz. za pomocą wyładowań iskrowych napięcia stałego. Prawie każde wyładowanie iskrowe było kontynuowane przez wyładowanie łukowe, jeżeli był spełniony warunek trwałości łuku.

Ogólny wniosek wynikający z tych badań jest następujący: dla uniknięcia wyładowania łukowego w sieciach odciągów anten należy te sieci tak zaprojektować, aby moc wydzielona w jednostce drogi łuku, mogącego się pojawić, była mniejsza niż $P_u = 140$ watów/cm.

3. PRZYCZYNY POWSTAWANIA WYŁADOWANIA ŁUKOWEGO NA IZOLATORACH ODCIĄGÓW ANTEN

Nad powierzchnią ziemi istnieje zawsze pewne pole elektrostatyczne \vec{E}_C , którego źródłem jest atmosfera otaczająca ziemię. Pole E_C ma następujące właściwości [1]:

- wektor \vec{E}_C ma na ogół kierunek pionowy względem powierzchni ziemi,
- zmiany wektora \vec{E}_C w czasie są znacznie powolniejsze, niż zmiany w czasie wektorów pól o częstotliwości radiowej,
- natężenie pola $|\vec{E}_C|$ jest zależne od stanu fizycznego atmosfery i waha się w granicach od około 100 V/m - dla spokojnej atmosfery, do około 1000 V/m - przy silnych wiatrach i intensywnych opadach śniegu, i do około 5000 V/m w sąsiedztwie wyładowania piorunowego.

Sieć odciągów nadawczych anten unipolowych jest zanurzona w polu elektromagnetycznym \vec{E}_G , będącym superpozycją wolnozmiennego pola \vec{E}_C i szybkozmiennego pola \vec{E}_R o częstotliwości radiowej.

Rozważmy jakikolwiek przewodnik W zanurzony w polu \vec{E}_G /rys.4a/. Pod wpływem pola \vec{E}_G w przewodniku W ustali się pewien rozkład ładunków $q = q/z$ i pewien rozkład potencjału $u = u/z$. W przypadku dwóch przewodników - W_1 i W_2 - oddzielonych od siebie izolatorem Q , na ich końcach przyległych do izolatora wystąpią na ogół różne potencjały U_1 i U_2 , mające oba składową stałą U_{kC} i składową zmienną U_{kR} , $k = 1, 2$ /rys. 4b/.

Jeżeli różnica $\Delta U = |U_1 - U_2|$ potencjałów U_1, U_2 przekroczy wytrzymałość izolacji na przebicie, to wystąpi wyładowanie iskrowe, które jest kontynuowane jako wyładowanie łukowe, trwałe lub nietrwałe.

Długości L przewodników odciągów nie przekraczają na ogół 100 metrów, a ich osi tworzą z kierunkiem pola \vec{E}_C kąt $\varphi \cong 45^\circ - 60^\circ$ /rys. 4b/. Różnica potencjałów skalarnych - w polu \vec{E}_C - punktów A_1, A_2 obszaru, w których znajdują się końce przewodnika o długości L , jest równa $\Delta U_0 = L / \overline{E_C} \cdot \cos \varphi$, gdy przewodnika nie ma w polu \vec{E}_C . Jest więc oczywiste, że dla dwóch przewodników - o długościach $L_1 = L_2 = L$ - różnica ΔU potencjałów skalarnych ich sąsiadujących z sobą końców musi być także w przybliżeniu równa ΔU_0 , bo powierzchnie przewodników są ekwipotencjalne w stałym polu \vec{E}_C . Przyjmując w skrajnym przypadku $L = 100$ m, $\varphi = 45^\circ$, $|\overline{E_C}| = 1$ kV/m otrzymujemy $\Delta U_0 \cong 70$ kV. Wytrzymałość na przebicie izolatorów stosowanych w sieciach odciągów anten unipolowych jest kilka razy większa od podanej wartości ΔU_0 . Mimo to jednak, wyładowania iskrowe na izolatorach są obserwowane - podczas niesprzyjających, ale nie - burzowych, warunków atmosferycznych - o każdej porze roku; również wtedy, gdy moc w.cz. nie jest doprowadzona do anteny. Efekty akustyczne wyładowań /trzaski/ są słyszalne w odległości kilkuset metrów od anteny.

Ponieważ różnica ΔU potencjałów skalarnych przewodników nie może być przyczyną wyładowań iskrowych na izolatorach, powstaje pytanie, dlaczego wyładowania powstają?

Odpowiedź na to pytanie daje analiza rozkładu gradientu ∇U potencjału na powierzchni przewodnika zanurzonego w obcym polu \vec{E}_C . Dla przewodnika, mającego kształt walca o średnicy $2r$ i o długości $2L$, taka analiza jest bardzo złożona i jej efekty są mało przydatne. Zagadnienie upraszcza się w istotnym stopniu, jeżeli - zamiast przewodnika walcowego - rozpatruje się przewodnik mający kształt wydłużonej elipsoidy obrotowej, którego przekrój osiowy jest elipsą o osiach równych $2R$ i $2L/r$ ys. 4c/. Można pokazać, że dla takiego przewodnika moduł gradientu $|\nabla U|$ potencjału na powierzchni S przewodnika wyraża się wzorem

$$|\nabla U| = \frac{|\vec{E}_C| \cos \varphi \sin \theta}{\sqrt{e^2 \cos^2 \theta + \sin^2 \theta}} \cdot \frac{e^2 (1-1/e^2)^{3/2}}{\ln(e + \sqrt{e^2 - 1}) - \sqrt{1-1/e^2}},$$

gdzie $e = L/R$.

Łatwo zauważyć, że moduł $|\nabla U|$ przyjmuje wartości maksymalne na końcach przewodnika $|\theta = \pi/2|$ i że dla $e \gg 1$ mamy

$$M = \frac{\text{Max } |\nabla U|}{|\vec{E}_C| \cdot \cos \varphi} = \frac{e^2}{\ln 2e - 1}$$

Wykresy funkcji $M = M/e$ są przedstawione na rys. 5 - dla zmiennej $e \in [10, 1000]$. Na rys. 5 jest także przedstawiony wykres funkcji $K = K/e = |\vec{E}_C| \cos \varphi$, opisującej wartości iloczynu $|\vec{E}_C| \cdot \cos \varphi$, dla których wartości $\text{Max } |\nabla U| = 30 \text{ kV/cm}$ [wytrzymałość powietrza na przebicie].

Z zachowania się funkcji M/e wynika, że dla wartości stosunku $e = L/R > 100$, wartości stosunku $M = [\text{Max } |\nabla U|] : [|\vec{E}_C| \cdot \cos \varphi] > 2000$.

To oznacza, że wartości gradientu potencjału U na końcach przewodnika mogą osiągać miliony woltów na metr !

Z przebiegu funkcji $K/e/$ wynika z kolei, że dla spełnienia warunku $Max / \nabla U / \leq 30$ kV/cm należałoby zachować stosunek $L/R \leq 100$. Na przykład przy długości $L = 50$ m, promień R musiałby być większy niż 0,5 m.

Można wykazać, że przy spełnieniu nierówności $L/R > 100$, ładunki indukowane na izolowanym przewodniku, zanurzone w polu \vec{E}_C , są praktycznie skupione na obu końcach przewodnika. To jest właśnie przyczyną występowania tak dużych [> 1 MV/m] wartości gradientu potencjału na końcach przewodników.

Przedstawione relacje dotyczą przewodników elipsoidalnych, zanurzonych w zewnętrznym polu \vec{E}_C . Odciągi są przewodnikami walcowymi i rozkłady $/ \nabla U /$ na ich powierzchni będą opisane innymi relacjami. Jednakże zjawiska fizyczne na nich zachodzące muszą mieć charakter podobny, jak dla przewodników elipsoidalnych zarówno pod względem jakościowym, jak i ilościowym.

4. WNIOSKI

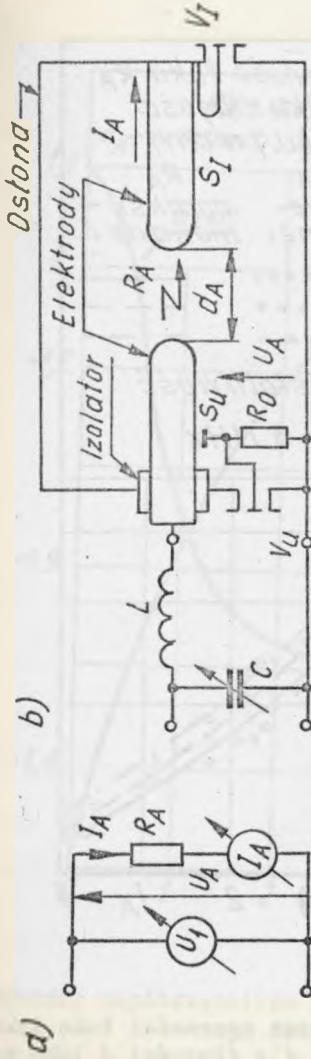
Sieć odciągów anteny pionowej jest zanurzona w polu \vec{E}_C pochodzenia atmosferycznego i w polu \vec{E}_R , którego źródłem jest antena. Zjawiska fizyczne występujące w tej sieci mają następujący charakter:

1. Pole elektrostatyczne \vec{E}_C wywołuje przemieszczenie się ładunków na izolowanych od siebie przewodnikach odciągów. Jakkolwiek powierzchnia każdego przewodnika jest w polu \vec{E}_C ekwipotencjalna, to gradient ∇U potencjału na powierzchni zmienia się od punktu do punktu. Moduł $/ \nabla U /$ przyjmuje wartości maksymalne $/ \nabla U /_{Max}$ na końcach przewodnika, co jest przyczyną wyładowań iskrowych. Ze względu na bardzo duże wartości $/ \nabla U /_{Max}$ nie ma technicznej możliwości uniknięcia wyładowań iskrowych na izolatorach odciągów w konwencjonalnych sieciach odciągów wysokich anten pionowych.

2. Zmieniające się okresowo pole \vec{E}_R , którego rozkład w otoczeniu pionowej anteny jest opisany znanymi relacjami [2], wymusza prądy i napięcia na elementach sieci odciągów - przewodnikach i izolatorach. Każdy izolator w sieci można traktować jako dwójnik dołączony do pewnego źródła o SEM-iej równej V_i i o impedancji wewnętrznej równej Z_i . Gdy jest zadana sieć odciągów i gdy jest znana moc P_F doprowadzona do anteny, można obliczyć wielkości V_i i Z_i dla każdego izolatora w sieci z osobna. Wymaga to opracowania odpowiedniego aparatu matematycznego, opartego na równaniach opisujących rozkład pola wokół anteny [3]. Dysponując takim aparatem można wyznaczyć prąd I i napięcie U dla każdego izolatora, gdy znane są jego parametry techniczne. Dotyczy to także prądu i napięcia w łuku w.c.z., który może pojawić się na izolatorze. Wykorzystując omówiony warunek trwałości łuku można dokonać teoretycznej oceny podatności całej sieci odciągów na wyładowania łukowe i znaleźć te podatne izolatory, na których łuk może się utrzymać w sposób trwały. Jest oczywiste, że nietrwałość łuku na podatnym izolatorze można zapewnić poprzez odpowiednie zmniejszenie mocy P_A doprowadzonej do łuku. Można to osiągnąć, zmniejszając siłę elektromotoryczną V_i oraz zwiększając impedancję wewnętrzną Z_i źródła, z którego łuk jest zasilany. Obydwie relacje równocześnie uzyskuje się przez skrócenie odcinków odciągu skojarzonych z podatnym izolatorem, tj. przez wtrącenie w sieć odciągów dodatkowych izolatorów. Dla tak zmodyfikowanej sieci można ponownie dokonać oceny podatności na wyładowania łukowe. Przedstawiony sposób można kontynuować tak długo, aż uzyska się taki stan sieci odciągów, przy którym ewentualne łuki w.c.z. na wszystkich izolatorach odciągów będą w stanie nietrwałym.

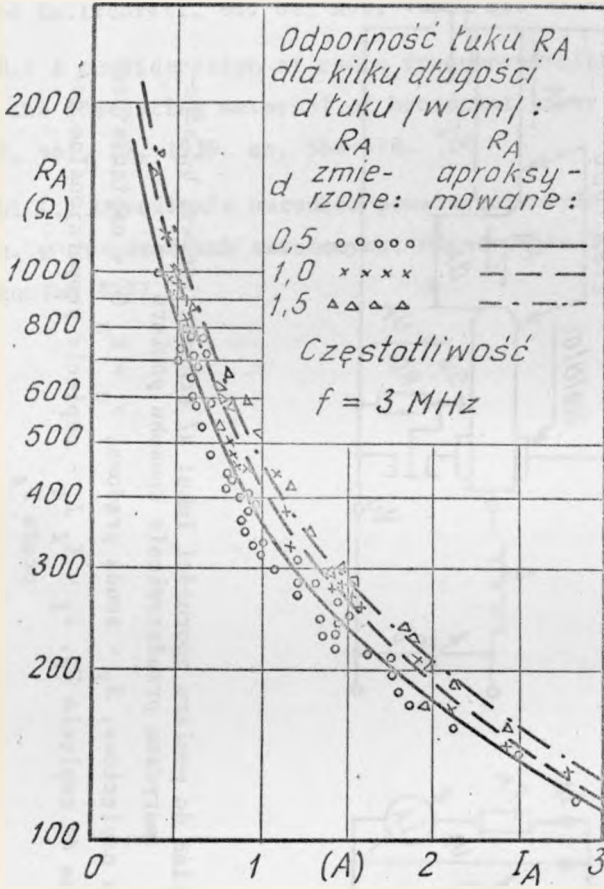
5. WYKAZ LITERATURY

1. Mueller - Hillebrand D.: Zur Physik der Blitzentladung. Elektrotechnische Zeitschrift, Bd. 82, H.8, 1961. ss. 232-248.
2. Brown G.H.: A consideration of radio frequency voltages encountered by the insulating material of broadcast tower antennas. Proc. IRE, vol. 27, 1939, ss. 566-578.
3. Stasiński L.: Określenie warunków powstawania wyładowań łukowych w.cz. w urządzeniach antenowych. Opracowanie Instytutu Łączności, Wrocław 1977.

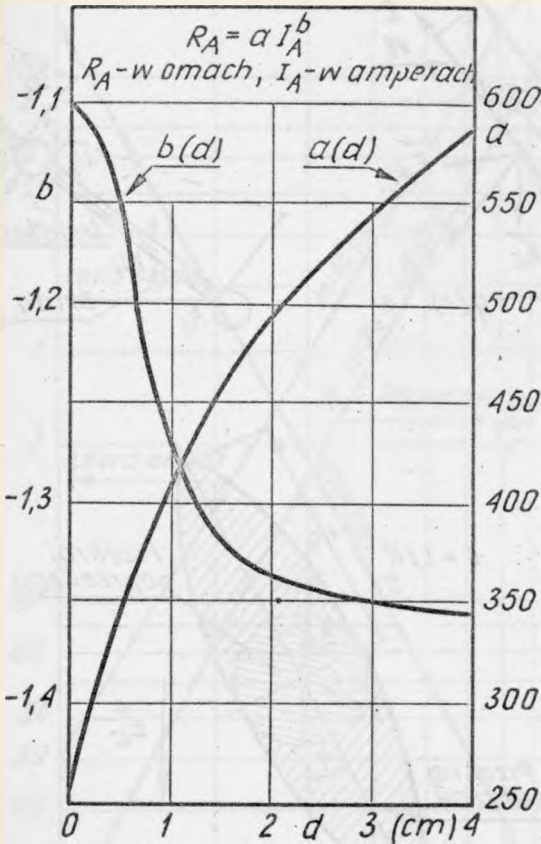


Rys. 1. Układ do pomiaru oporności łuku: a/ schemat ideowy, b/ schematyczne przedstawienie sposobu pomiaru

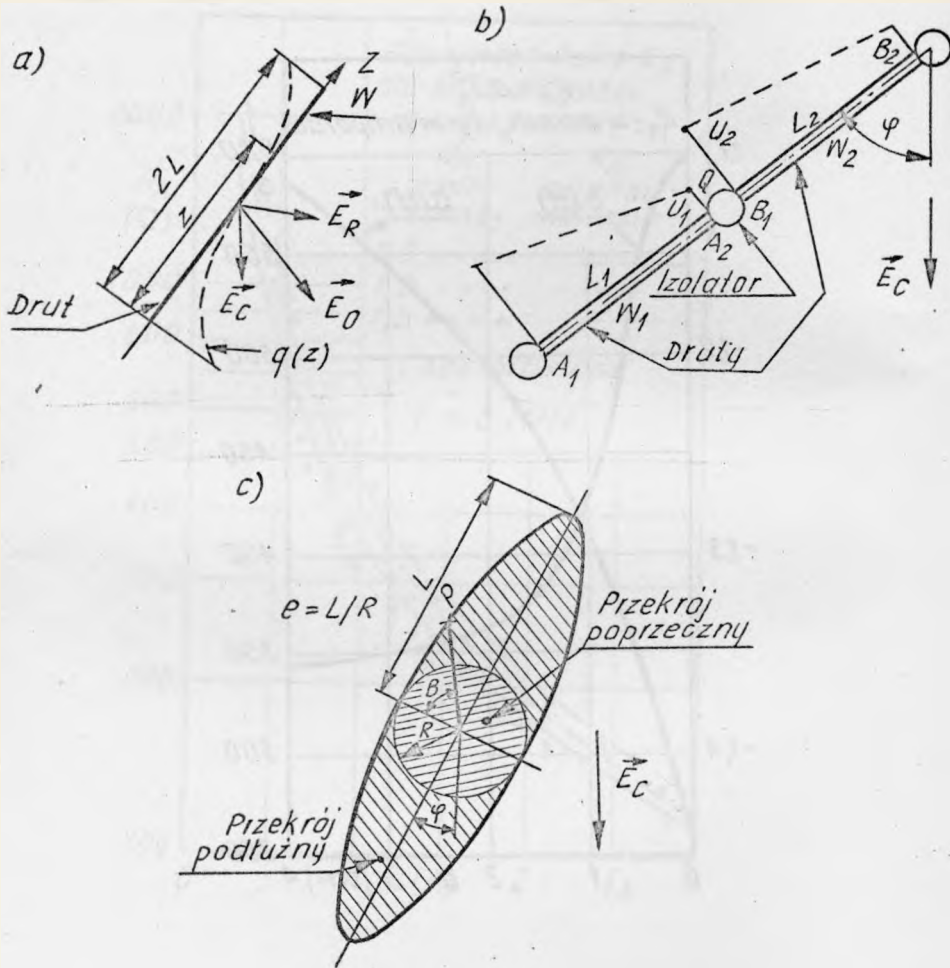
S_u - sonda napięciowa, S_I - sonda prądowa, $V_u = K_u U_A$ - napięcie proporcjonalne do napięcia U_A , $V_I = K_I I_A$ - napięcie proporcjonalne do prądu I_A



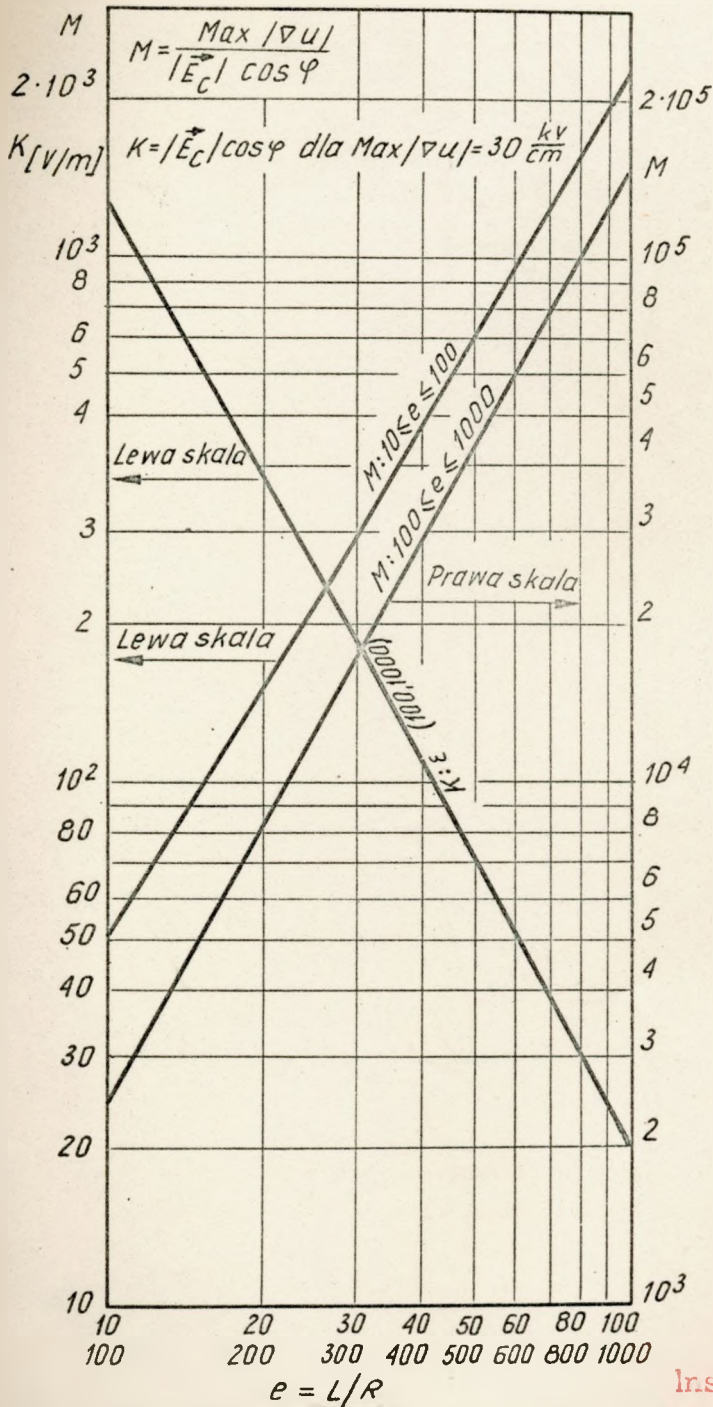
Rys. 2. Zmierzone i aproksymowane oporności łuku jako funkcje prądu I_A płynącego w łuku, dla długości d jako parametru



Rys. 3. Wykresy współczynników $a = a(d)$, $b = b(d)$ jako funkcje długości d łuku



Rys. 4. Izolowane przewody zanurzone w polach zewnętrznych \vec{E}_R - pole wielkiej częstotliwości, \vec{E}_C - pole elektrostatyczne

Rys. 5. Wielkości M i K jako funkcje stosunku $e = L/R$.

Biblioteka

IL

S-8372