

C
Nr 20310.
Politechnika Warszawska

SKŁAD GŁÓWNY KOMISJI WYDAWNICZAJ
ul. Bratniej Pomocy Studentów Politechniki Warszawskiej

ELEKTROTECHNIKA PRĄDÓW SŁABYCH

OBLICZENIE LINJI TELEGRAFICZNEJ
OBLICZENIE LINJI TELEFONICZNEJ

INŻYNIER-ELEKTRYK
ROMAN TRECHCIŃSKI



Nr Wyd. 103a.

ROK 1921/22.

WARSZAWA

Skład Główny Komisji Wydawniczej: Politechnika — Polna 3. Telefon 88-60
Drukarnia i Litografia „SATURN” Marszałkowska 91.

POLITECHNIKA WARSZAWSKA.

2 **TELEGRAFJA**

OBLICZENIE LINIJ TELEGRAFICZNYCH

Inżynier Elektryk

1 **ROMAN TRECHCIŃSKI**



№ wyd. 103.

W A R S Z A W A

NAKŁADEM „KOMISJI WYDAWNICZEJ“ TOW. BR. POM. STUD. POL. WARSZ.

Drukarnia i Litografia SATURN Marszałkowska 91,

ROK AKAD. 1921/22.

i.z. 4528



~~9.310~~

C. 20310

TELEGRAFJA.

Obliczenie linii telegraficznych.

Aparaty telegraficzne posiadają pewne wartości oporu i samoindukcji, linje telegraficzne posiadają opór, samoindukcję, pojemność i wpływ. Wartości wspomniane wpływają wydatnie na prądy, wchodzące do aparatów odbiorczych, a więc na mechaniczne działanie tych prądów i, w rezultacie, na szybkość telegrafowania.

A. Załączamy na aparat telegraficzny o oporze r i samoindukcji l , prąd ze źródła o niezmiennym napięciu.

Oznaczmy napięcie źródła prądu stałego przez V i chwilową wartość prądu w obwodzie przez J .

Dla każdej chwili t , licząc od momentu zamknięcia obwodu, będziemy mieli zależność:

$$V = Jr + l \frac{dJ}{dt} \dots \dots \dots (1).$$

Ogólna całka tego równania będzie:

$$(V - Jr) \cdot K = e^{-\frac{r}{l}t} \dots \dots \dots (2)$$

gdzie K jest stałą, a e - podstawą logarytmów naturalnych.

Dla chwili zamknięcia obwodu, to jest dla $t = 0$

prąd J też będzie równy zeru i stała K określi się:

$$K = \frac{1}{V}$$

Wartość zaś prądu J otrzyma postać

$$J = \frac{V}{r} (1 - e^{-\frac{r}{L}t}) \dots \dots \dots (3)$$

Analizując wzór 3, zauważymy, że przy wzroście czasu, wielkość $e^{-\frac{r}{L}t}$ będzie coraz mniejszą i przy pewnych wartościach r i L , kiedy t osiągnie niekończące wielką wartość, $e^{-\frac{r}{L}t}$ będzie równe zeru.

Ponieważ wielkość $e^{-\frac{r}{L}t}$ odejmuje się od jedności, to wtedy wartość prądu osiągnie swą największą wielkość, mianowicie:

$$J = \frac{V}{r} \dots \dots \dots (4)$$

Wartość tę osiągnął by prąd momentalnie, gdyby samoindukcja aparatu L była równą zeru.

Podstawiając J_m z równania 4 do 3 otrzymamy

$$J = J_m (1 - e^{-\frac{r}{L}t}) \dots \dots \dots (5)$$

Określimy wartość J dla momentu, kiedy t będzie równem L/r

$$\begin{aligned} J &= J_m (1 - e^{-\frac{r}{L}t}) = J_m (1 - e^{-1}) = \\ &= J_m (1 - \frac{1}{e}) = 0,63 J_m \dots \dots \dots (6) \end{aligned}$$

Jeżeli aparat będzie tak wyregulowany, żeby reagował na prąd o wartości 0,63 prądu ostatecznego, to działanie aparatu zacznie się w momencie $t' = \frac{L}{r}$ od chwili zamknięcia obwodu.

Dla aparatu Morse $r = 600$ omów

$l = 15$ henry i $t = 15/600 = 0,025$ sekundy.

Dla aparatu Hughes $r = 1200$ omów

$l = 25$ henry i $t = 25/1200 = 0,021$ sekundy.

Po pewnym czasie prąd J osiągnie wartość b , bliską do J_m , tak, że z wystarczającą dokładnością można go uważać za ustalony. Zakładając, że napięcie V momentalnie przyjęło wartość zera, przyczem opór na odcinku, gdzie zachodziło napięcie V , jest równy zero, otrzymamy ze wzoru 2

$$-JrK = e^{-\frac{r}{L}t} \dots \dots \dots (7)$$

Dla chwili początku /zanikania/ to jest dla $t = 0$ mamy

$$J = J_m = \frac{V}{r} \quad \text{skąd} \quad K = -\frac{1}{L} \quad \text{i}$$

$$J = \frac{V}{r} e^{-\frac{r}{L}t} = J_m e^{-\frac{r}{L}t} \dots \dots \dots (8)$$

Prąd zanika według krzywej odwrotnej do krzywej powstania /p.rys.1/, i dla chwili $t = \frac{L}{r}$

będzie równy $J = 0,37 J_m \dots \dots \dots (9)$

Gdybyśmy obwód prądu probowali przerwać momentalnie, to zanikanie prądu nie mogło by mieć miejsca według wzoru 8; jednakże szybki spadek wartości prądu wywołał by znaczną siłę elektromotoryczną, która ujawniła by się jako iskra w kontakcie rozłączającym.

B. Prąd ustalony w linii.

Założymy, że dana linja została przyłączona do źródła prądu stałego o niezmiennej wartości napięcia V_0 przyczem po upływie pewnego czasu od chwili włączenia, wpływ samoindukcji i pojemności linji praktycznie zanikł, tak, że mamy do czynienia z ustalonymi wartościami prądu wzdłuż linji.

Oznaczmy dla jedno-przewodowej linji

- r — opór w omach na kilometr
- l — samoindukcja w henry. na kilometr
- c — pojemność w faradach na kilometr
- w — opór izolacji względem ziemi w omach na klm.
- $a = \frac{z}{\omega}$ wpływ do ziemi w siemensach na klm.

Prąd wzdłuż linji tem prędzej osiągnie swą ostateczną wartość, im mniejsze będą l i c ; zakładając, że te wielkości równe są zeru, otrzymamy ostateczne wartości prądu wzdłuż linji.

Przy takim założeniu możemy zastosować rozwiązania i wzory, wyprowadzone w dziele: "Obliczenie

linji telefonicznych i ich pupinizacja".

Wzory 1 i 2 na stronnicy 4 będą w danym wypadku

$$-dV = Jr ds \dots \dots \dots (10)$$

$$-dJ = aV ds \dots \dots \dots (11)$$

Ze wzoru 10 mamy

$$dJ = -\frac{1}{r} \frac{d^2V}{ds^2} ds \dots \dots \dots (12)$$

Co z uwzględnieniem równania 11 daje

$$\frac{d^2V}{ds^2} = arV \dots \dots \dots (13)$$

Ogólna całka tego równania będzie

$$V = K_1 e^{ps} + K_2 e^{-ps} \dots \dots \dots (14)$$

przyczem $p = \sqrt{ar}$.

Na podstawie równania 10 mamy

$$J = -\frac{1}{r} \frac{dV}{ds} \dots \dots \dots (15)$$

Różniczkując równanie 14 otrzymamy

$$\frac{dV}{ds} = K_1 p e^{ps} - K_2 p e^{-ps} \dots \dots \dots (16)$$

$$J = -\frac{p}{r} (K_1 e^{ps} - K_2 e^{-ps}) \dots \dots \dots (17)$$

$$J = -\sqrt{\frac{a}{r}} (K_1 e^{ps} - K_2 e^{-ps}) \dots \dots \dots (18)$$

W pewnych wypadkach dogodnym jest stałe K_1 i K_2 mieć w funkcji napięcia i prądu początku linii. Oznacząc wartości napięcia i prądu na początku linii przez V_0 i J_0 dla $s=0$ to jest dla początku linii, otrzymamy na podstawie wzorów 14 i 18

$$V_0 = K_1 + K_2 \quad ; \quad J_0 = -\sqrt{\frac{a}{r}} (K_1 + K_2)$$

Określając z tych równań K_1 i K_2 i podstawiając do równań 14 i 18 otrzymamy

$$V = V_0 \frac{e^{ps} - e^{-ps}}{2} - J_0 \sqrt{\frac{r}{a}} \cdot \frac{e^{ps} - e^{-ps}}{2} \quad \dots (19)$$

$$J = J_0 \frac{e^{ps} + e^{-ps}}{2} - V_0 \sqrt{\frac{a}{r}} \cdot \frac{e^{ps} - e^{-ps}}{2} \quad \dots (20)$$

Normalnie koniec linii przyłączony jest do aparatu odbiorczego; przy pomiarach jednakże dogodnym jest mierzenie kombinowanego oporu linii w dwóch krańcowych wypadkach, a mianowicie: 1/ kiedy koniec linii jest uziemiony, 2/ kiedy na końcu linii oba przewody są wzajemnie izolowane/ stan jałowy/. Oznaczając opór pozorny, mierzony w pierwszym wypadku przez u_0 i w drugim przez u_∞ , będziemy mieli w pierwszym wypadku napięcie końcowe $V_s = 0$ a w drugim prąd końcowy $J_s = 0$.

ponieważ opór pozorny linii wogóle będzie to na podstawie równań 19 i 20 otrzymamy

$$u_0 = \sqrt{\frac{r}{a}} \frac{e^{p\beta} - e^{-p\beta}}{e^{p\beta} + e^{-p\beta}} \quad (21)$$

$$u_{\infty} = \sqrt{\frac{r}{a}} \frac{e^{p\beta} + e^{-p\beta}}{e^{p\beta} - e^{-p\beta}} \quad (22)$$

Mnożąc jedno przez drugie równania 21 i 22 otrzymamy

$$u_0 + u_{\infty} = \frac{r}{a} = r\omega \quad (23)$$

to jest iloczyn pozornych oporów linii równa się iloczynowi oporu na 1 km. linii przez opór izolacji na 1 km. linii.

Dzieląc równanie 21 przez 22 otrzymamy

$$\frac{u_0}{u_{\infty}} = \left(\frac{e^{p\beta} - e^{-p\beta}}{e^{p\beta} + e^{-p\beta}} \right)^2$$

skąd

$$e^{2p\beta} = \frac{1 + \sqrt{\frac{u_0}{u_{\infty}}}}{1 - \sqrt{\frac{u_0}{u_{\infty}}}}$$

$$p\beta = \frac{1}{2} \lg \text{nat} \frac{1 + \sqrt{\frac{u_0}{u_{\infty}}}}{1 - \sqrt{\frac{u_0}{u_{\infty}}}} = \frac{r\beta}{\sqrt{u_0 u_{\infty}}}$$

$$p = \frac{r}{\sqrt{u_0 u_{\infty}}}$$

Rzeczywisty całkowity opór linii

$$r_s = \frac{1}{2} \sqrt{u_0 u_\infty} \cdot \text{Cof nat} \frac{1 + \sqrt{\frac{u_0}{u_\infty}}}{1 - \sqrt{\frac{u_0}{u_\infty}}} \quad (24)$$

Rzeczywisty całkowity opór izolacji całej linii

$$\frac{\omega}{s} = \frac{2 \sqrt{u_0 u_\infty}}{\text{Cof nat} \frac{1 + \sqrt{\frac{u_0}{u_\infty}}}{1 - \sqrt{\frac{u_0}{u_\infty}}}} \dots \dots \dots (25)$$

Jeżeli linja będzie na końcu przyłączona do aparatu odbiorczego o oporze u_a to prąd wchodzący otrzymamy na zasadzie wzoru

$$I_s = I_0 \frac{\sqrt{1 - \frac{u_0}{u_\infty}}}{1 + \frac{u_a}{u_\infty}} \dots \dots \dots (26)$$

Przy obliczeniach technicznych można stosować wzory przybliżone.

Jeżeli stosunek $\frac{r}{\omega}$ jest, jak to bywa w praktyce nie większy od 0,3, to rzeczywisty całkowity opór linii i rzeczywisty całkowity opór izolacji można obliczać według wzorów

$$r_s = u_0 + \frac{u_0^2}{3 u_\infty} \dots \dots \dots (27)$$

$$\frac{\omega}{s} = u_\infty - \frac{u_0}{3} \dots \dots \dots (28)$$

Dla linii krótko zwartej, a więc we wzorze 26 dla $u_{\infty} = 0$ otrzymamy następującą tablicę dla stosunku I_1 do I_0 w zależności od stosunku

u_0	do	u_{∞}
$\frac{u_0}{u_{\infty}}$		$\frac{I_1}{I_0}$
0,01		0,99
0,10		0,95
0,20		0,89
0,30		0,84
0,50		0,70
0,70		0,55
0,90		0,32

C. Prąd w linii o małej samoindukcji i upływie ilości elektryczności $I dt$, która wchodzi do nieskończone krótkiego odcinka linii ds dzieli się na trzy części. Pierwsza przechodzi do dalszego odcinka i jest równą $I + dI / dt$. Druga część, jako upływ, płynie do ziemi i jest równą $\frac{V}{\omega} ds dt$ jeżeli V ozn. napięcie rozważanego odcinka względem ziemi. Trzecia część ładuje odcinek i ma wartość

$c ds \frac{dV}{dt} dt$ W rezultacie mamy

$I dt = (I + dI) dt + \frac{V}{\omega} ds dt + c ds \frac{dV}{dt} dt$

(23)

W samym odcinku, na zasadzie prawa Ohma wartość prądu będzie $J = - \frac{dV}{r \cdot d\ell} \dots \dots \dots (30)$

Skąd $dJ = - \frac{1}{r} \frac{d^2V}{d\ell^2} dt.$

Podstawiając do równania 29 otrzymujemy

$$0 = - \frac{1}{r} \frac{d^2V}{d\ell^2} d\ell dt + \frac{V}{\omega} d\ell dt + c \frac{dV}{dt} d\ell dt. (31)$$

Krzywa prądu nadawanego przy stałym początkowym napięciu V_0 pokazaną jest na rys. 2. Opór pozorny dla amplitudy włączenia może być otrzymany przybliżenie dla linii stosowanych w praktyce według wzoru

$$\frac{1}{2,7 \log. nat. (\beta + 1)} \sqrt{\frac{r}{c}}.$$

Krzywa prądu wchodzącego do ziemi na drugim końcu linii pokazaną jest na figurze 3. Na figurze 3 skala czasu na osi odciętych wyrażoną jest w wielkości τ / τ_{AU} , która to wielkość, przy założeniu, że $\frac{r}{\omega} = 0$ otrzymaną być może z równania 31 w postaci przybliżonego wzoru

$$\tau = 0,029 cr \ell^2 \dots \dots \dots (32)$$

Jak widzimy z figury 3 po upływie chwili $\tau (\tau_{AU})$ od zamknięcia prądu na stacji nadawczej, stacja odbiorcza praktycznie prądu jeszcze nie otrzyma; dopiero po tym okresie prąd zacznie warastać,

zblizając się do wartości ustalonego. Zgodnie z powyższem przerwa prądu na stacji nadawczej praktycznie nie będzie zauważoną w ciągu trwania chwili τ po przerwie prądu i dopiero po tym momencie wpływ przerywania prądu da się odczuć podług krzywej, którą można otrzymać z krzywej zamknięcia, odejmując wartości według tej samej krzywej, przesuniętej odpowiednio na osi odciętych, jak to jest pokazane na rys. 4 i 5.

Jeżeli przyjmiemy, że dla otrzymania sygnału konieczną jest wartość prądu, równa $0,63 \text{ Jm}\delta$ to czas nadawania trwał by nie mniej niż $4,5 \tau$. Jeżeli dla przerwy sygnału konieczną jest wartość prądu, równa $0,37 \text{ Jm}\delta$ to pełny czas trwania najkrótszego sygnału będzie nie mniej niż 9τ .

Przykład 1. Tysiącokilometrowa linja powietrzna z czteromilimetrowego drutu żelaznego z aparatami Morse.

Dla takiej linji $r = 10$ omów na kilometr $c = 0,006$ mfarady na kilometr, przy wysokości zawieszenia 4 metrów nad ziemią. τ według wzoru 32

$$\begin{aligned} \tau &= 0,029 \text{ c r } \delta^2 = 0,029 \cdot 0,006 \cdot 10^{-6} / 10 \cdot 1000^2 = \\ &= 0,00174 \text{ sekundy} \end{aligned}$$

$$4,5 \tau = 0,0078 \text{ s.}$$

Szybkość rozchodzenia się zjawisk elektrycznych jest równą 300000 km s^{-1} dla 1000 m. trzeba więc 0,0033 s. Ponieważ jednak, wskutek samoindukcji aparatu, działanie jego opóźni się 0,025 sekundy, więc faktycznie aparat da sygnał przybliżenie po upływie 0,03 sekundy. Przytoczone cyfry wskazują, że wspomniana linja czyni w zupełności zadość technicznym warunkom, ponieważ kropka na aparacie Morse jest nadawaną przez 0,1 sekundy, a kreska 0,3 sekundy i że sama linja pozwoliłaby na znacznie szybsze, a mianowicie $0,1:0,0078 = \infty$ 12-krotne nadawanie, co, jak wiadomo, było podstawą wprowadzenia maszynowych telegrafów typu Wheatstone i innych.

Przykład 2. Kabel morski 5000 kilometrów, $r = 5$ cmów na kilometr, $c = 0,28 \mu$ farad na kilometr.

$$\tau = 0,029 \times 0,28 \times 10^{-6} \times 6 \times 5000^2 \approx 1,35 \text{ sekundy}$$

$$4,5\tau = 6,1 \text{ sekundy.}$$

Odległość 5000 km. odpowiada mniej więcej odległości między Gdańskiem a New Yorkiem; jak widzimy w tym wypadku τ jest bardzo duże i $4,5\tau$ jest 60 razy większe, niż czas kropki aparatu Morse; żeby możliwie skrócić ten czas, jak wiadomo, na długich liniach kablowych pracują specjalne apa-

raty rytujące całą krzywą wchodzącego prądu, co daje możliwość odczytania sygnału przy $1,5\%$ i przez to szybkość telegrafowania wzrasta trzykrotnie w porównaniu z aparatem Morse. Żeby jeszcze zwiększyć szybkość telegrafowania i jednocześnie uniknąć prądów ziemnych, które przy dużych odległościach mogą osiągać znacznych wartości, stosowany jest przy telegrafii morskiej specjalny układ z kondensatorami i telegrafowanie o dwóch kierunkach prądu, przy czym jeden kierunek odpowiada kreskom, a drugi kropkom alfabetu Morse. Schemat podany jest na rys. 6; pozwala on skrócić czas między jednym a drugim impulsem prądu na wyżej wspomnianym kablu do 1 sekundy, to jest 12 razy prędzej niż przy normalnym włączeniu aparatów Morse.

D. Prąd w linii z samoidukcją, oporem, pojemnością i upływem.

Matematyczne rozwiązanie zagadnienia w danym wypadku komplikuje się jeszcze bardziej niż w oddziale poprzednim. Dla technicznych obliczeń można zastosować przybliżoną metodę, która z dostateczną dla praktyki dokładnością pozwoli określić wartości prądów na stacji nadawczej i odbiorczej w funkcji czasu po włączeniu, to jest

znaleść krzywą prądu stacji nadawczej i odbiorczej. Za pomocą tej samej metody można znaleźć krzywą w dowolnym punkcie linii, co jednakże, jako zadanie praktyczne nie będzie interesowało technikę telegraficzną.

Wspomniana metoda polega na sumowaniu dwóch fikcyjnych prądów: po pierwsze prądu fali i po drugie prądu ustalonego. Prąd fali będziemy uważali jako wynik pewnej sinusoidalnej siły elektromotorycznej, amplituda której jest równą niezmiennemu napięciu na stacji nadawczej, o takiej fazie w czasie, aby prąd fali miał swą maksymalną amplitudę zaraz po włączeniu. O ile własności linii i aparatów, włączonych na jej końcach są takie, że pozostała fala bieżąca dojdzie do drugiego końca linii i po odbiciu się da powrotną falę, to będziemy w stanie określić wszystkie interesujące nas wartości.

Prąd ustalający się będziemy uważali, jako powstający w linii i aparatach podobnych do rzeczywistych, z tą tylko różnicą, że pojemność tej fikcyjnej linii będziemy uważali za nieskończoną nie małą.

Po załączeniu linii do źródła prądu o niezmiennym napięciu zajdą zjawiska następujące, w zalez-

ności od własności linii: powstanie fali bie-
 żącej od początku linii ku końcowi; odbicie
 się tej fali w tym lub innym stopniu, powrotna
 odbita fala od końca ku początkowi linii, ;
 powtórna bieżąca fala, odpowiednio zmniejszona
 w zależności od współczynnika tłumienia i współ-
 czynnika odbicia na stacji nadawczej; znowu od-
 bicie i tak dalej. Jednocześnie powstaje w linii
 prąd stały, do wartości którego w danym miejscu
 należy dodawać lub odejmować chwilowe wartości
 bieżących lub odbitych fal.

Okres czasu jednego pełnego wahania prądu w
 dowolnym miejscu linii między dwoma jednakowymi
 impulsami bieżącej fali przybliżenie będzie

$$t = 326,8 \sqrt{\frac{c}{640 - cr^2}} \dots \dots \dots (33)$$

Wartość amplitud prądu bieżącej i odbitej fal
 nie będzie miała stałą WARTOŚĆ wzdłuż linii
 przyczem wartości te zależne są od współczynnika
 tłumienia, i, prócz tego, od elektrycznych wartoś-
 ci aparatów, włączonych z obu końców danej linii;
 przytem z nadawczego końca linii do kompletu
 włączonych aparatów należy zaliczyć źródło pra-
 du z uwzględnieniem jego elektrycznych własności.
 Pozorny opór nieskończenie długiej linii dla



bieżącej fali będzie

$$u = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{r^2 + \omega^2 l^2}{a^2 + \omega^2 c^2}} \dots \dots \dots (34)$$

Można stosować wzory:

a/dla linii z nieznaczną samoindukcją

$$u = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{r}{\omega c}} \dots \dots \dots (35)$$

b/dla linii z dużą samoindukcją

$$u = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{l}{c}} \dots \dots \dots (36)$$

We wzorach 34 i 35 jako ω rozumiane jest $2\pi f$ przyczem $f = \frac{1}{T}$ gdzie T jest określone na zasadzie wzoru 33.

Przykład 3. Tysiącokilometrowa linja powietrzna z czteromilimetrowego drutu żelaznego z aparatami Morse'a.

Dane elektryczne linji

$r = 10$ omów na kilometr

$c = 0,006$ ufarady na kilometr

$l = 0,007$ henry na kilometr

$\omega = 20 \cdot 10^6$ omów na kilometr.

Dane aparatów Morse

$r_a = 600$ omów

$l_a = 15$ henry

Na podstawie wzorów 27 i 28 znajdujemy

$U_0 = 8850$ omów

$U_\infty = 22950$ omów.

Dla prądów ustalonych według wzoru 26 .

$$\frac{J_s}{J_0} = \frac{\sqrt{1 - \frac{U_0}{U_{\infty}}}}{1 + \frac{U_0}{U_{\infty}}} = 0,76.$$

Jeżeli aparat Morse będzie wyregulowany tak, aby pracował zupełnie pewnie od prądu o wartości 5 milliampier, co będzie odpowiadało 0,63 prądu ustalonego, to wartość prądu ustalonego na stacji odbiorczej będzie

$$J_s = \frac{5}{0,63} = 8 \text{ ma}$$

Na stacji nadawczej

$$J_0 = \frac{8}{0,76} = 10,5 \text{ ma}$$

Napięcie ustalone na stacji odbiorczej będzie

$$8 \text{ ma} \times 600 \omega = 4,8 \text{ VOLTA.}$$

Napięcie ustalone na stacji nadawczej, na podstawie wzoru 41, umieszczonego w "obliczeniu linii telefonicznych" będzie

$$V_0 = 96 \text{ volt}$$

Opór pozorny linii z włączonym aparatem

$$u = \frac{V_0}{J_0} = 9150 \text{ omów.}$$

Wzór 33 daje dla czasu pełnego wahania wielkość pojemną; jest to wskazówką, że dana linja ze znacznym oporem nie daje fali i powinna być traktowana, jako linja z oporem tylko i pojemnością, jak to miało miejsce w przykładzie pierwszym.

Przykład 4. Pięciusetkilometrowa linja powietrzna z czteromilimetrowego drutu żelaznego i aparatami Morse.

Przyjmując dla linii tej te same dane elektrycz_ ne, jak w przykładzie 3 otrzymamy czas pełnego wahania według wzoru 33

$$t = 32 \mu s \sqrt{\frac{c}{64c - cr^2}} = 0,016 \text{ sek.}$$

$$f = \frac{1}{t} = 63 \text{ okresy na sekundę}$$

Pozorny opór według wzoru 36

$$u = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{r}{\omega c}} = 1020 \text{ omów}$$

Analogicznie, jak w przykładzie trzecim, otrzymu_

jemy: $U_0 = 4820 \text{ omów}$ $U_\infty = 41600 \text{ omów}$

$$J_s : J_0 = 0,93 \quad J_0 = 8,5 \text{ ma}$$

$$V_0 = 46 \text{ volt} \quad u = V_0 : J_0 = 5400 \text{ omów}$$

Prąd pierwszej fali tj. wartość amplitudy stacji nadawczej będzie:

$$46 \text{ volt} : 1020 \text{ omów} = 45 \text{ ma}$$

Spółczynnik tłumienia

$$\beta = \sqrt{\frac{\omega cr}{2}} = 0,0034 ; 2\beta l = 3,44.$$

Jeżeli odbicie się z obu końców linii było zupeł_ ne, to amplituda drugiej fali byłaby

$$45 \text{ ma} \times e^{-2\beta l} = 1,45 \text{ ma}$$

Ponieważ odbicie się jednak od aparatu Morse jest niezupełne, więc należy określić współczynnik odbicia się dla stacji odbiorczej.

W obliczeniu linii telefonicznych znajdziemy wzor

$$23 : \varphi_0 = \frac{1}{2} \arctg \frac{\omega(\frac{a}{c} - \frac{r}{c})}{\omega^2 + \frac{a}{c} + \frac{r}{c}} = 40^\circ$$

Dla aparatu Morse mamy

$$\operatorname{tg} \gamma_a = \frac{\omega L_a}{r_a} = 9,9; \gamma_a = 84^\circ$$

Pozorny opór aparatu Morse

$$(r_a^2 + \omega^2 L_a^2)^{0,5} = 5950 \text{ omów.}$$

Napięcie V_β na stacji odbiorczej dałoby falę odbitą o energii

$$\frac{V_\beta^2}{1020} \cos 40^\circ = V_\beta^2 \cdot 0,000626 = \eta_\sim$$

Wynikiem tegoż napięcia będzie w aparacie Morse następująca energia

$$\frac{V_\beta^2}{5950} \cos 84^\circ = V_\beta^2 \cdot 0,000017 = \eta_a$$

Spółczynnik odbiera się pojedynczej fali

$$\frac{\eta_\sim - \eta_a}{\eta_\sim + \eta_a} = 0,96.$$

Ostateczna amplituda odbitej fali na stacji nadawczej jest $1,45 \text{ ma} \times 0,96 = 1,40 \text{ ma}$. Jeżeli źródło energii elektrycznej będzie miało opór równy zeru, co technicznie będzie przy baterji akumulatorów, to odbicie się na stacji nadawczej będzie pełne, współczynnik odbicia się równy jedności i amplituda drugiej fali będzie $1,40 \text{ ma}$, trzeciej $0,04 \text{ ma}$ i tak dalej. Amplituda pierwszej fali na stacji odbiorczej, gdyby linja była przedłużoną do nieskończoności byłaby $45 \cdot e^{-\beta l} = 8 \text{ mV}$. Ponieważ odbija się $8 \cdot 0,96 = 7,8 \text{ mV}$ więc amplituda napięcia pierwszej fali na stacji odbiorczej będzie $7,8 \text{ ma} \times 1020 \text{ omów} = 8 \text{ volt}$. Amplituda prądu od pierwszej fali do aparatu Morse $8 \text{ volt} : 5950 \text{ omów} = 1,34 \text{ ma}$.

Analogenicznie od drugiej fali 0,04 ma; powrotna od pierwszej fali 1,22 ma i od drugiej 0,036 ma. Dla składowej prądu ustalającego się będziemy mieli dla stacji nadawczej przybliżony wzór

$$\frac{V_0}{u} (1 - e^{-\frac{rL + r_0 a}{L + L_0 a} t}) = \frac{46}{5400} (1 - e^{-\frac{5600}{18,5} t})$$

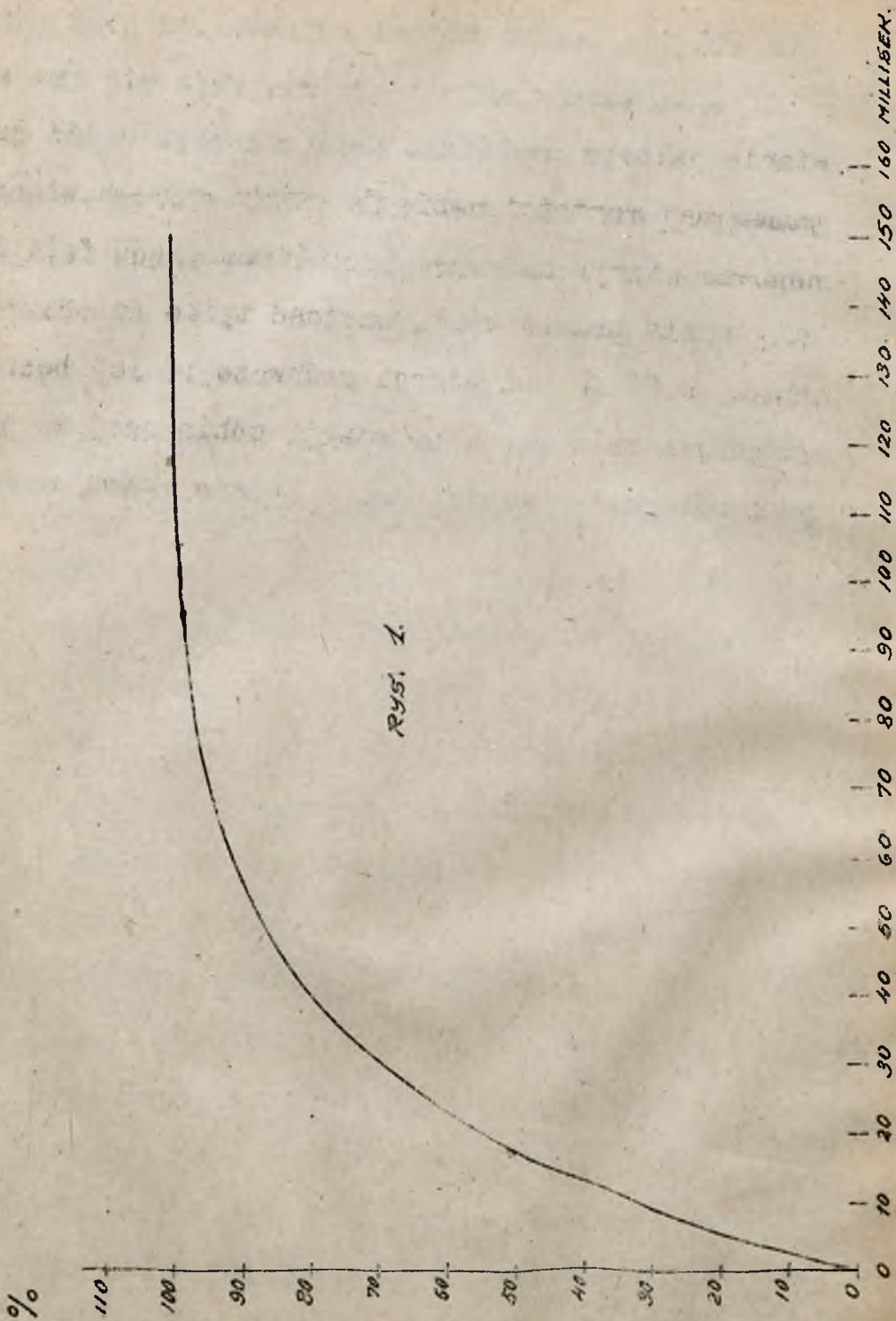
co dla $t = 0,0033''$ daje $0,63 \times 8,5 = 5,35$ ma.

Składowa prądu ustalającego się na stacji odbiorczej określi się wzorem $5(1 - e^{-\frac{600}{15} t})$

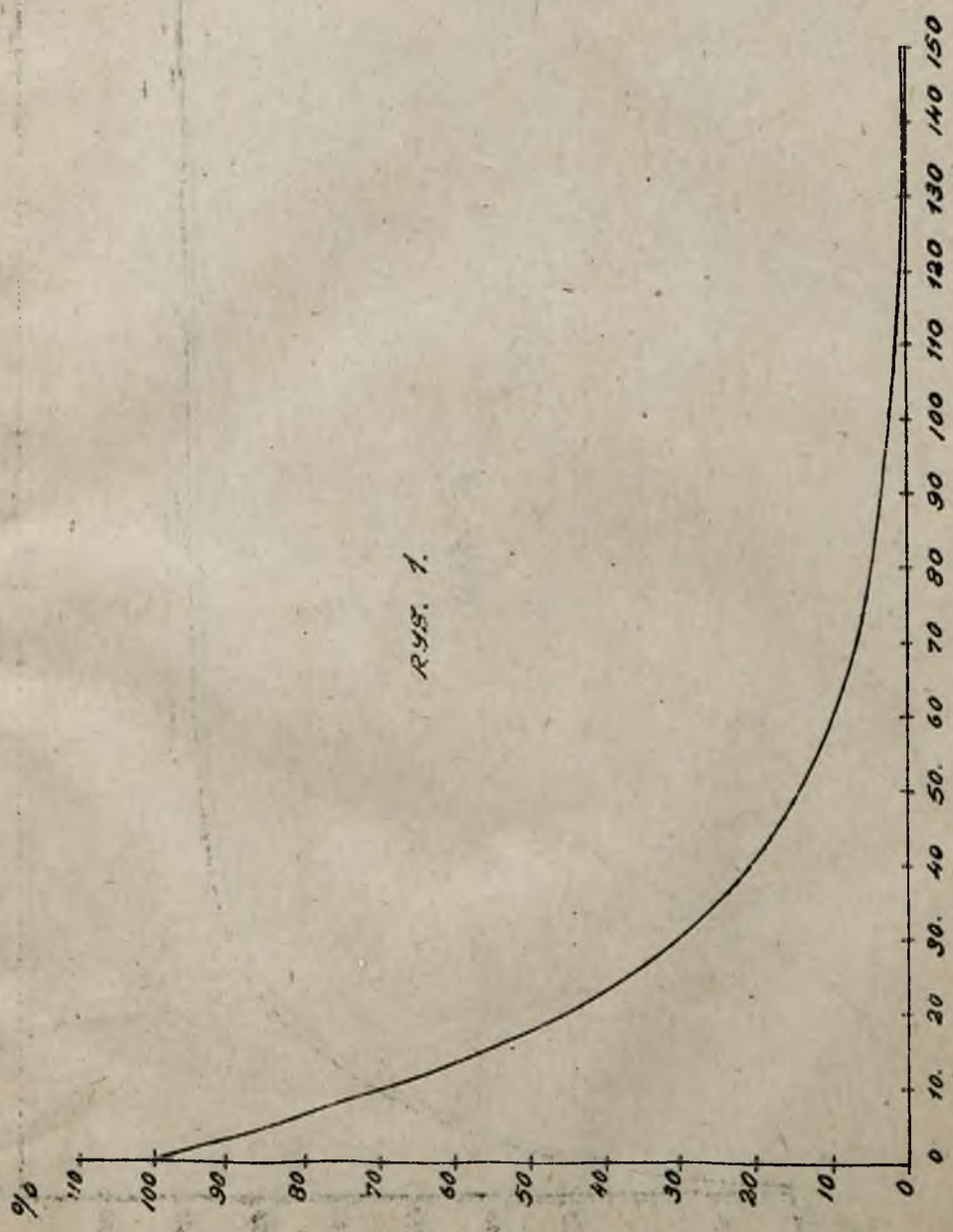
przyczem jako moment powstania prądu należy uważać czas włączenia prądu na stacji nadawczej z uwzględnieniem szybkości rozchodzenia się zjawisk elektrycznych. Zauważyć należy, że szybkość bieżącej i odbitej fal zależy nie tylko od własności linii, lecz i od własności aparatów, włączonych na jej końcach, co przy dokładnych obliczeniach trzeba mieć na uwadze.

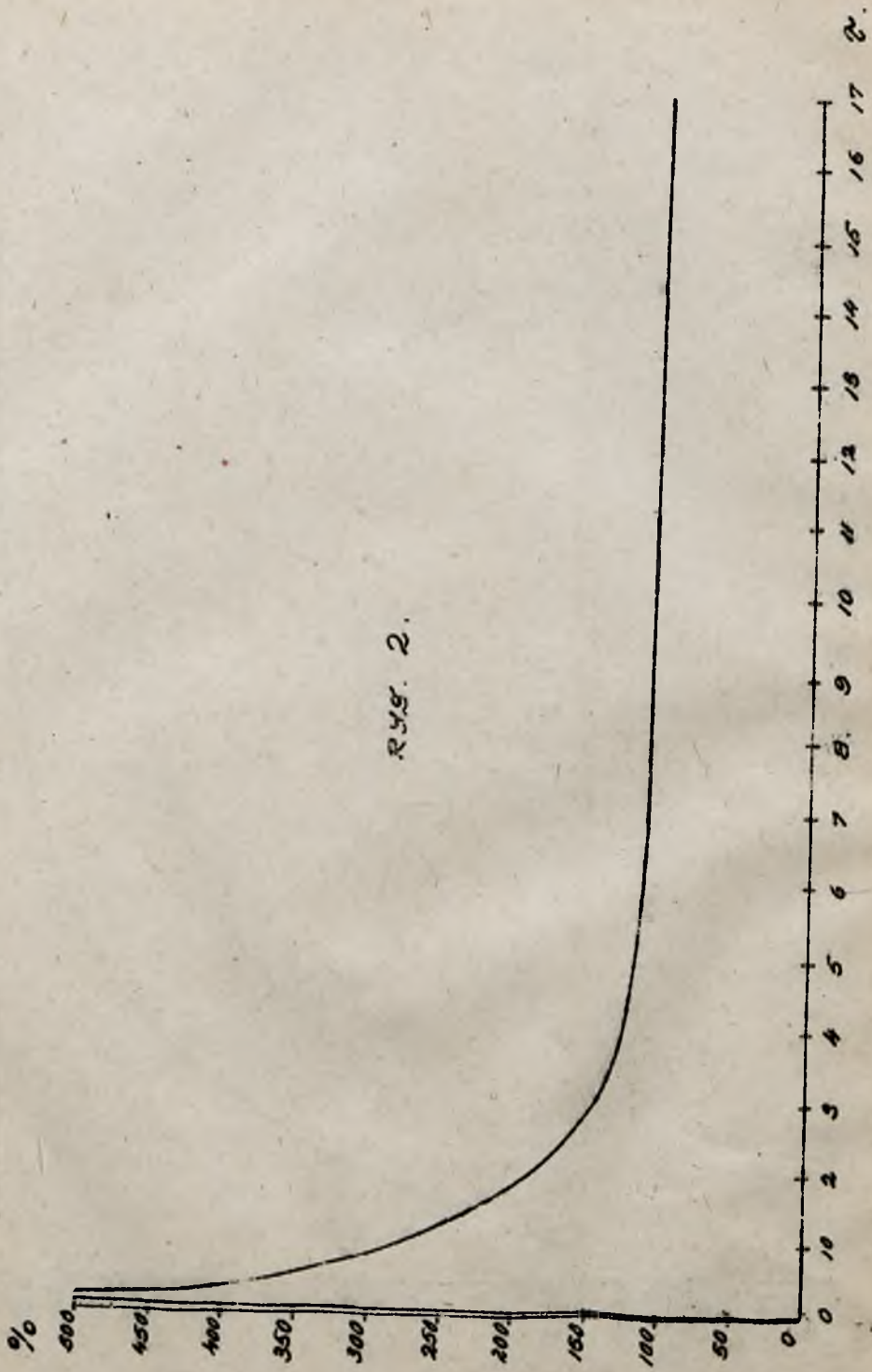
Pamiętać należy, że fazy napięcia prądu fali w czasie określają się wzorem dla \mathcal{L}_0 i że naprzekład napięcie stacji odbiorczej jest wyprzedzone przez prąd o $0,016'' \times \frac{40}{360} = 0,0018''$ co należy uwzględnić przy wykreślaniu prądu do aparatu Morse. Odpowiednie wykresy są pokazane na rys. 7 i 8.

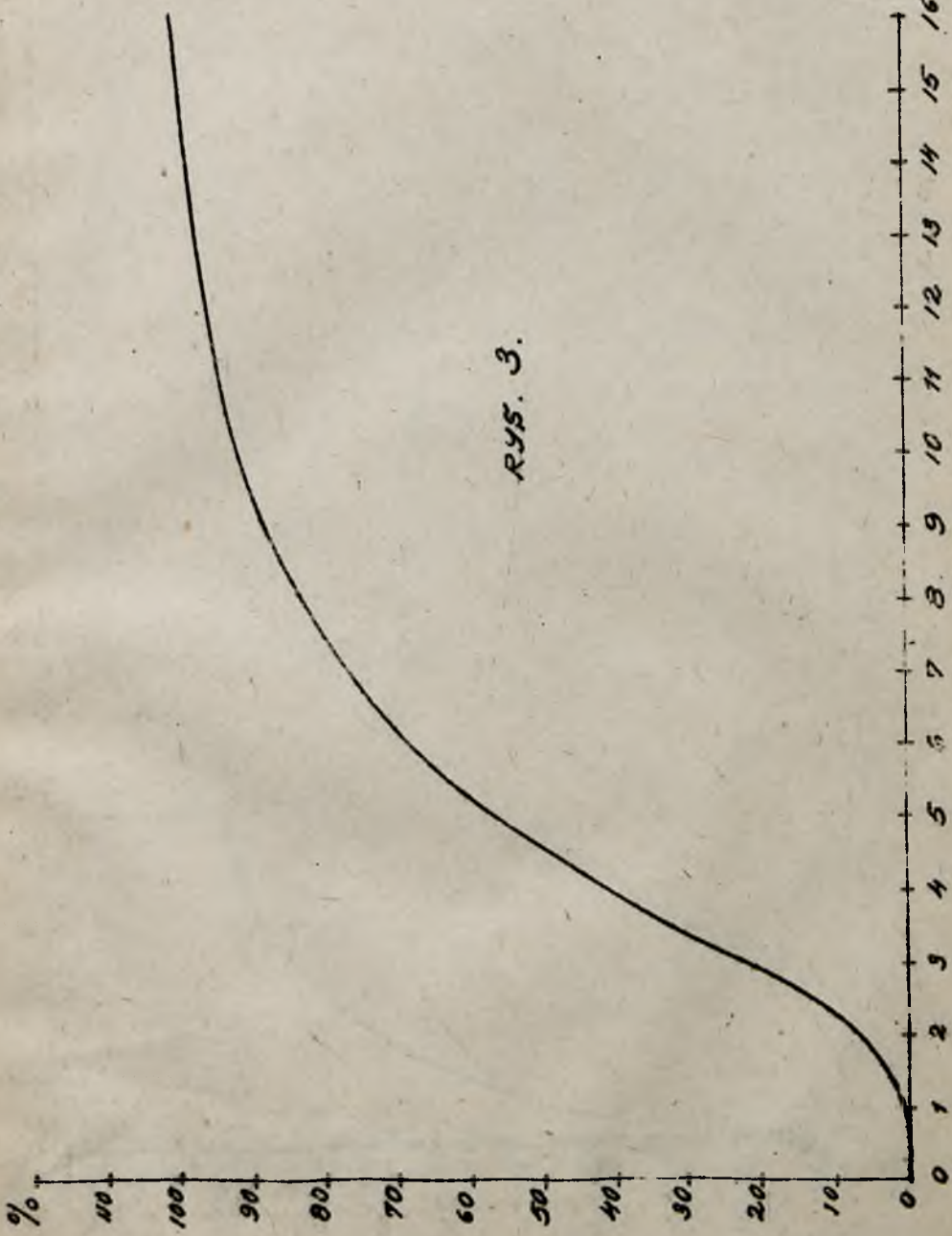
Dla linii z bardzo małymi stratami, to jest gdy r i a są bardzo małe i gdy znajduje się ona w stanie jałowym amplituda napięcia może dojść do podwójnej wartości napięcia prądu stałego, włączonego na stacji nadawczej; amplituda prądu fali będzie miała prawie stałą wartość tylko do odległości równej $0,75 \lambda$ od stacji nadawczej; dalej będzie stopniowo mniejszą i na stacji odbiorczej, to jest przy odległości równej λ będzie równą zeru.



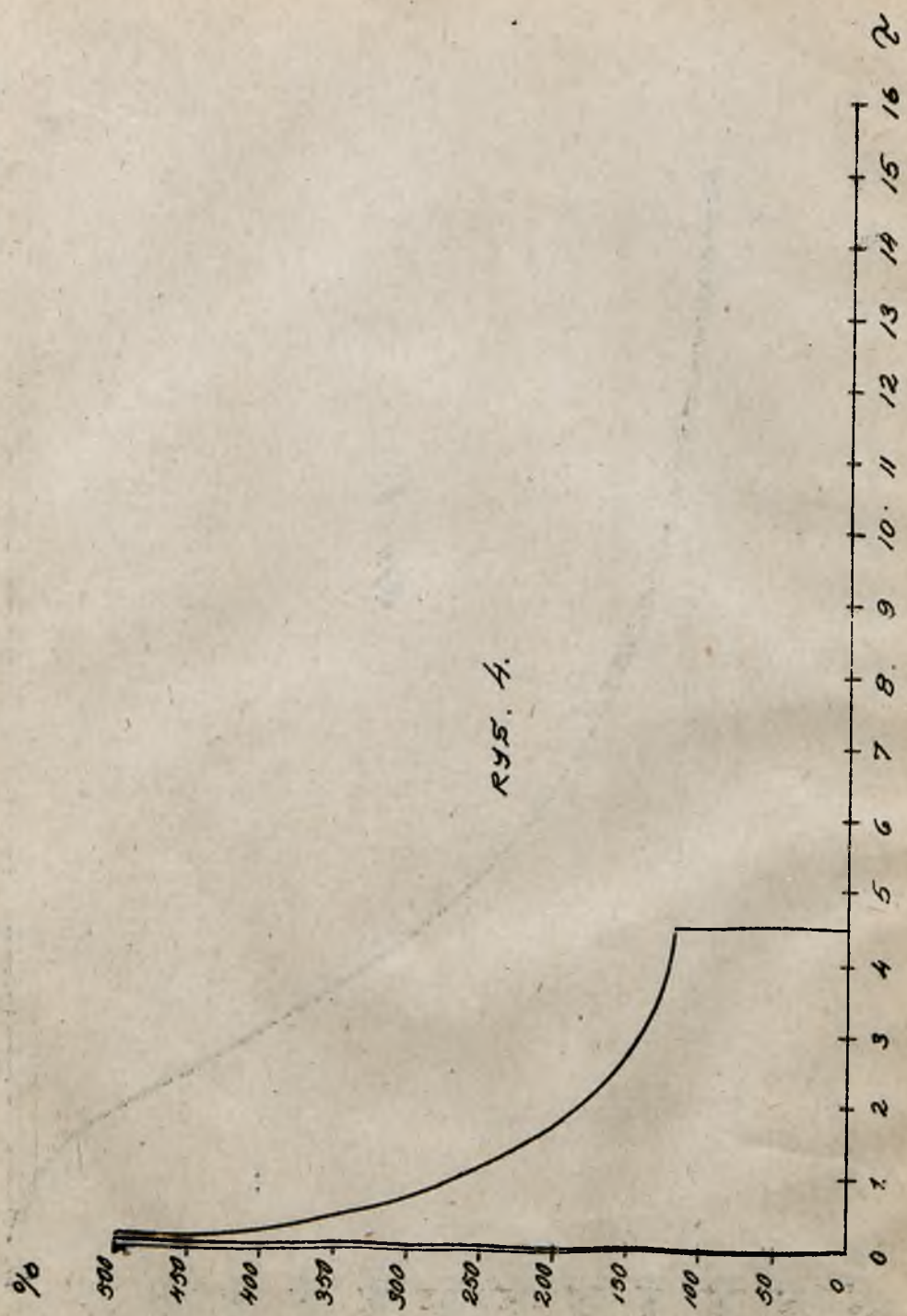
RYS. 1.

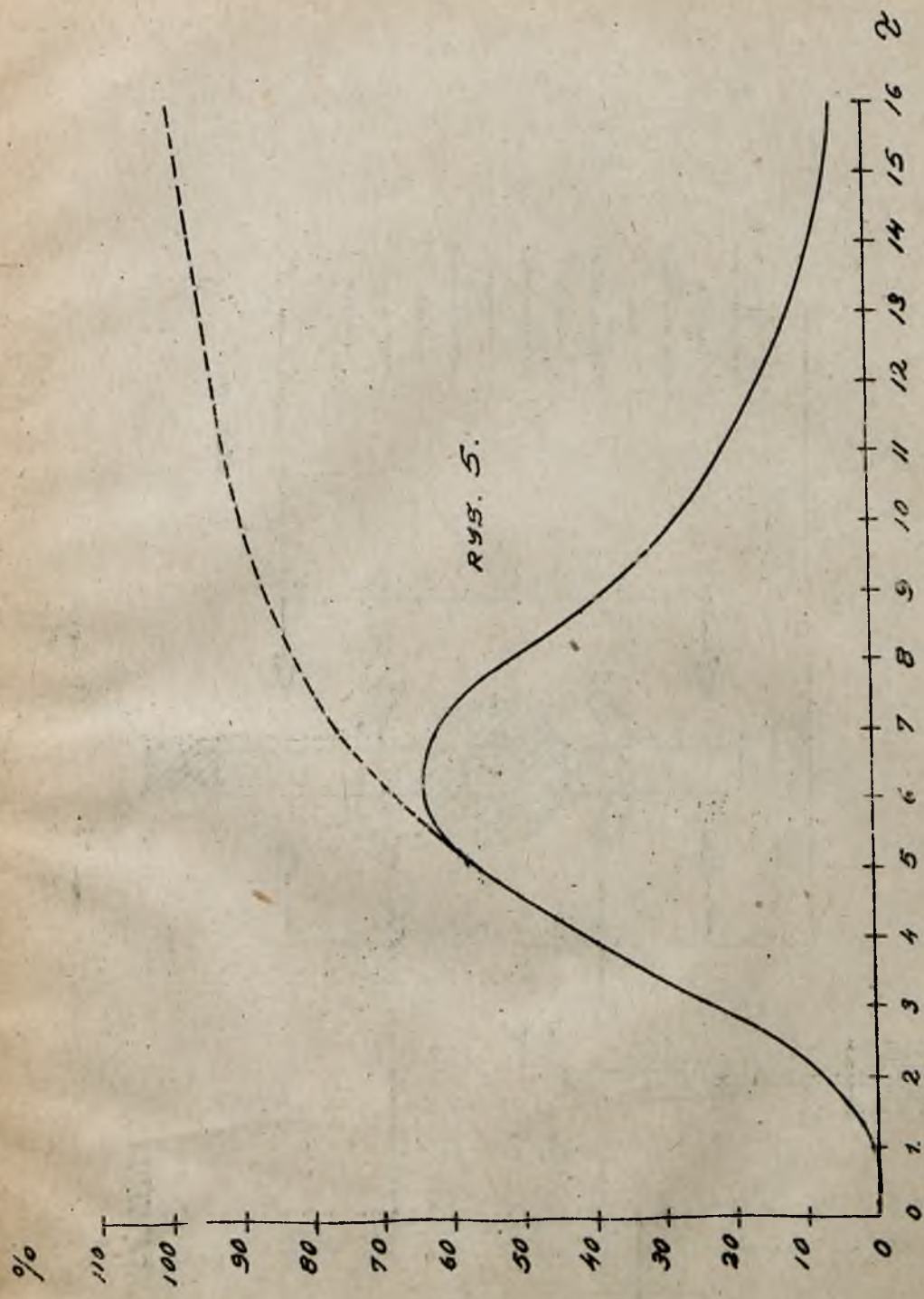




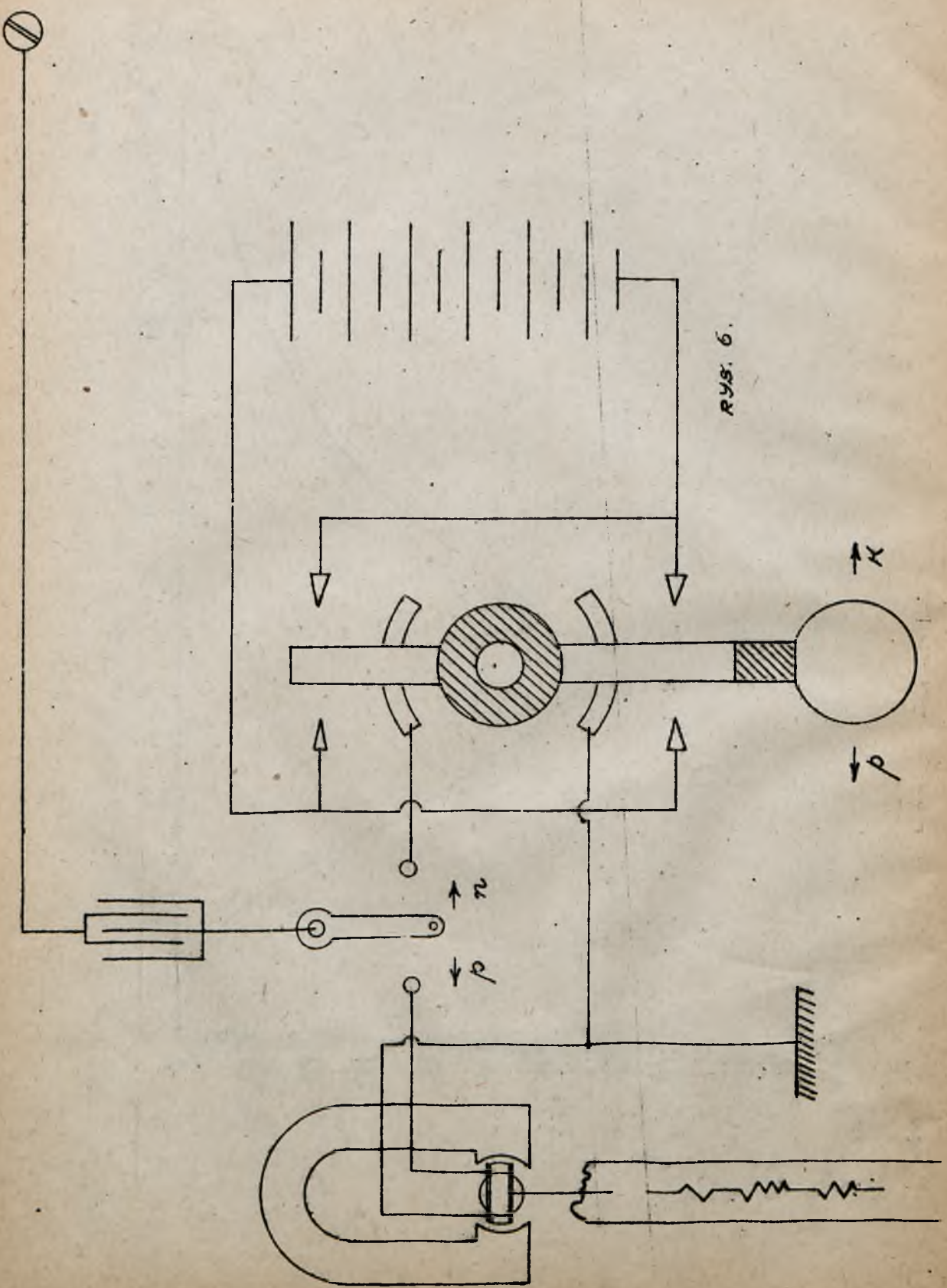


RYS. 3.





KABE



rys. 6.

STACJA NADAWCZA.

SKŁADOWA PRĄDU PALI.

1100.

50.

45.

40.

35.

30.

25.

20.

15.

10.

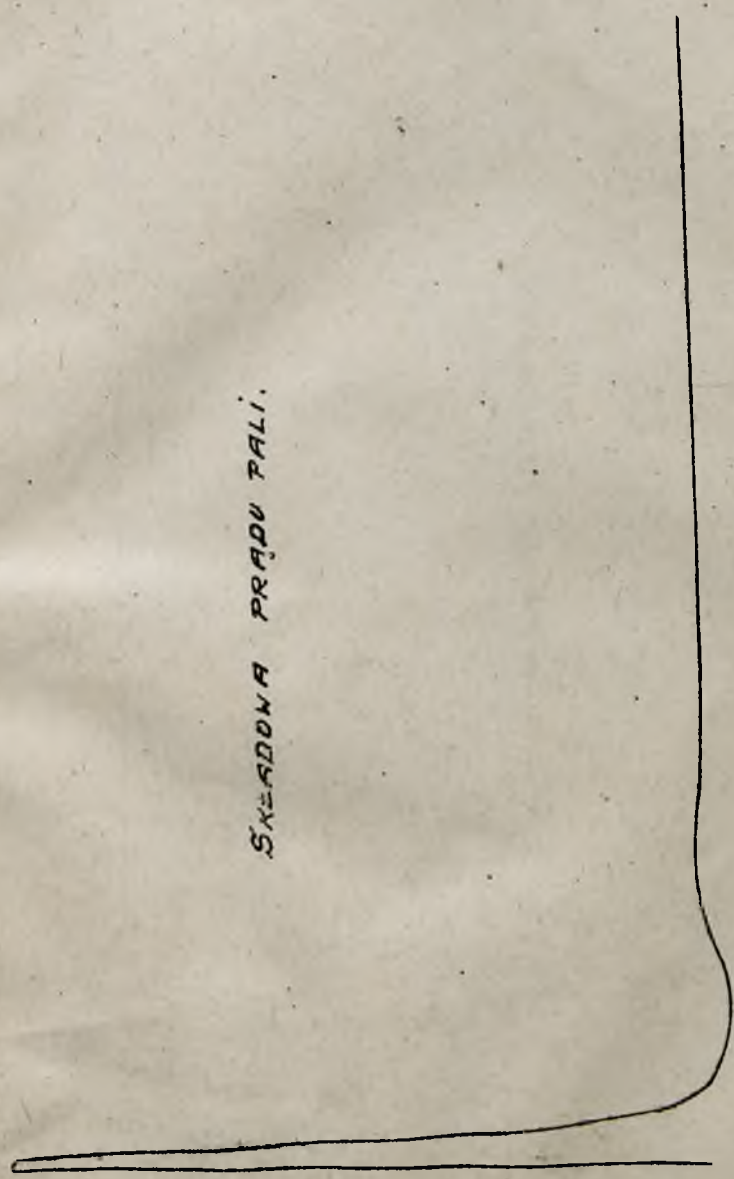
5.

0.

5.

10.

0



60

MILLISEK.

50

40

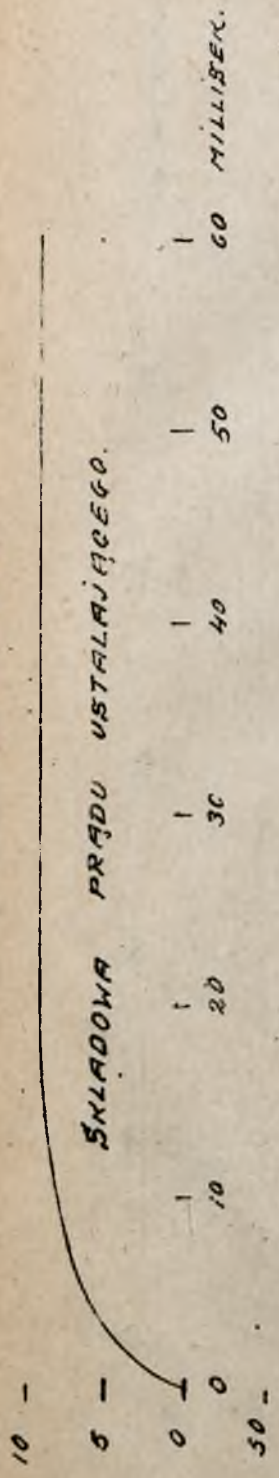
30

20

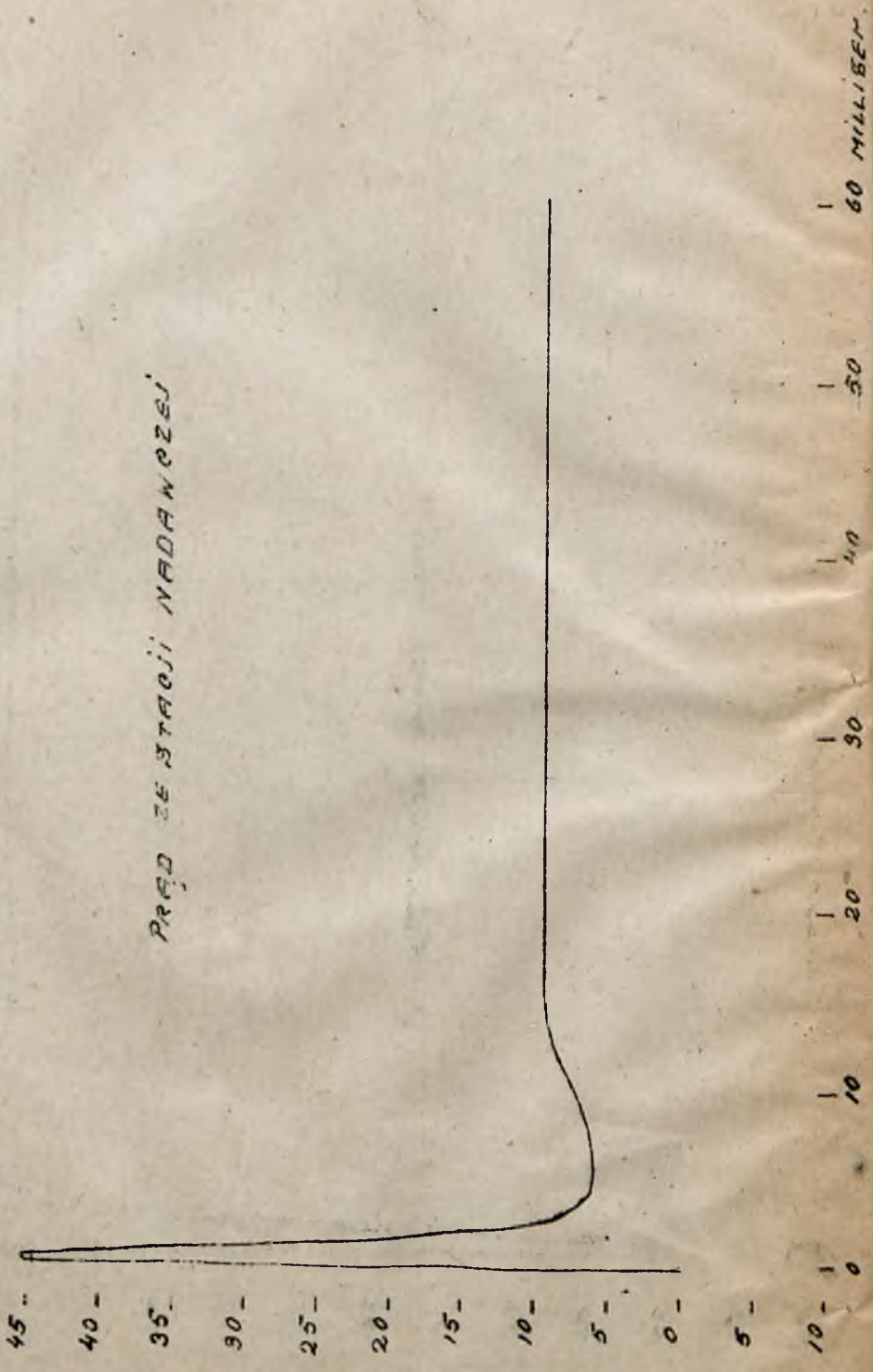
10

STACJA NADAWCZA.

SKŁADOWA PRĄDU USTALAJĄCEGO.

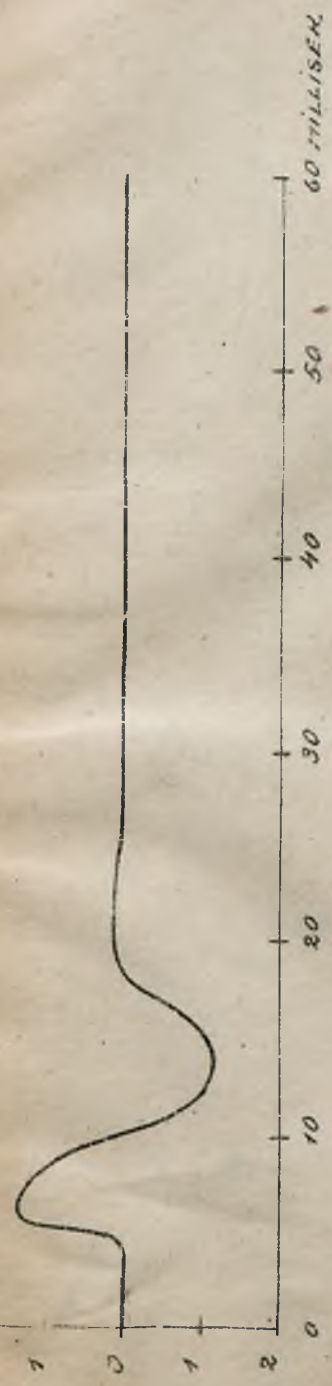


PRĄD ZE STACJI NADAWCZEJ.



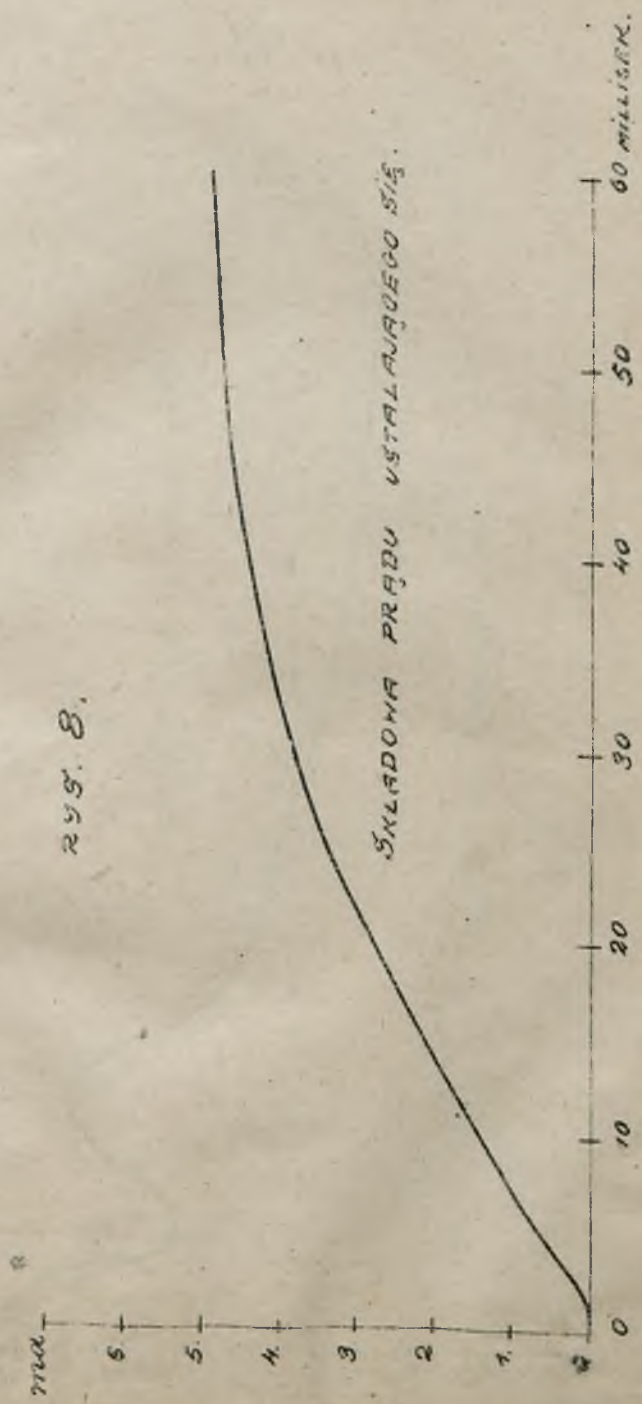
STACJA ORBICORZA.

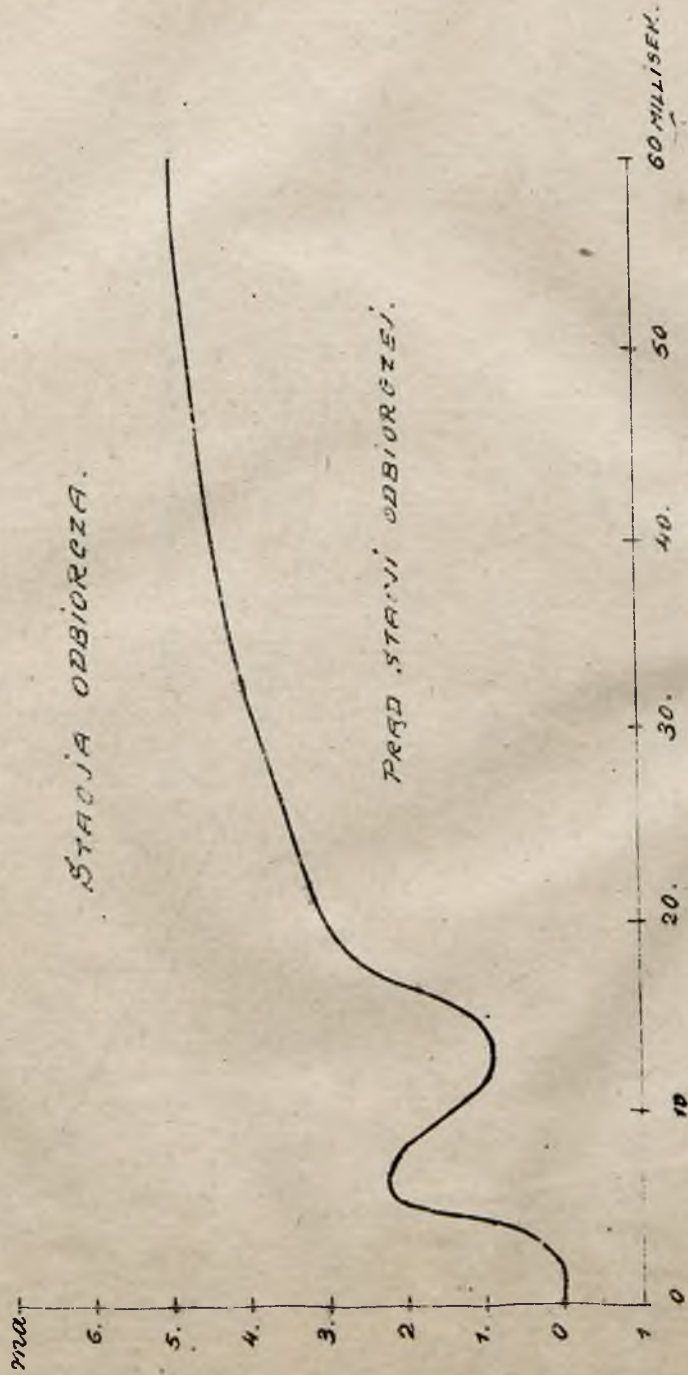
SKŁADOWA PRĄDU FALI.



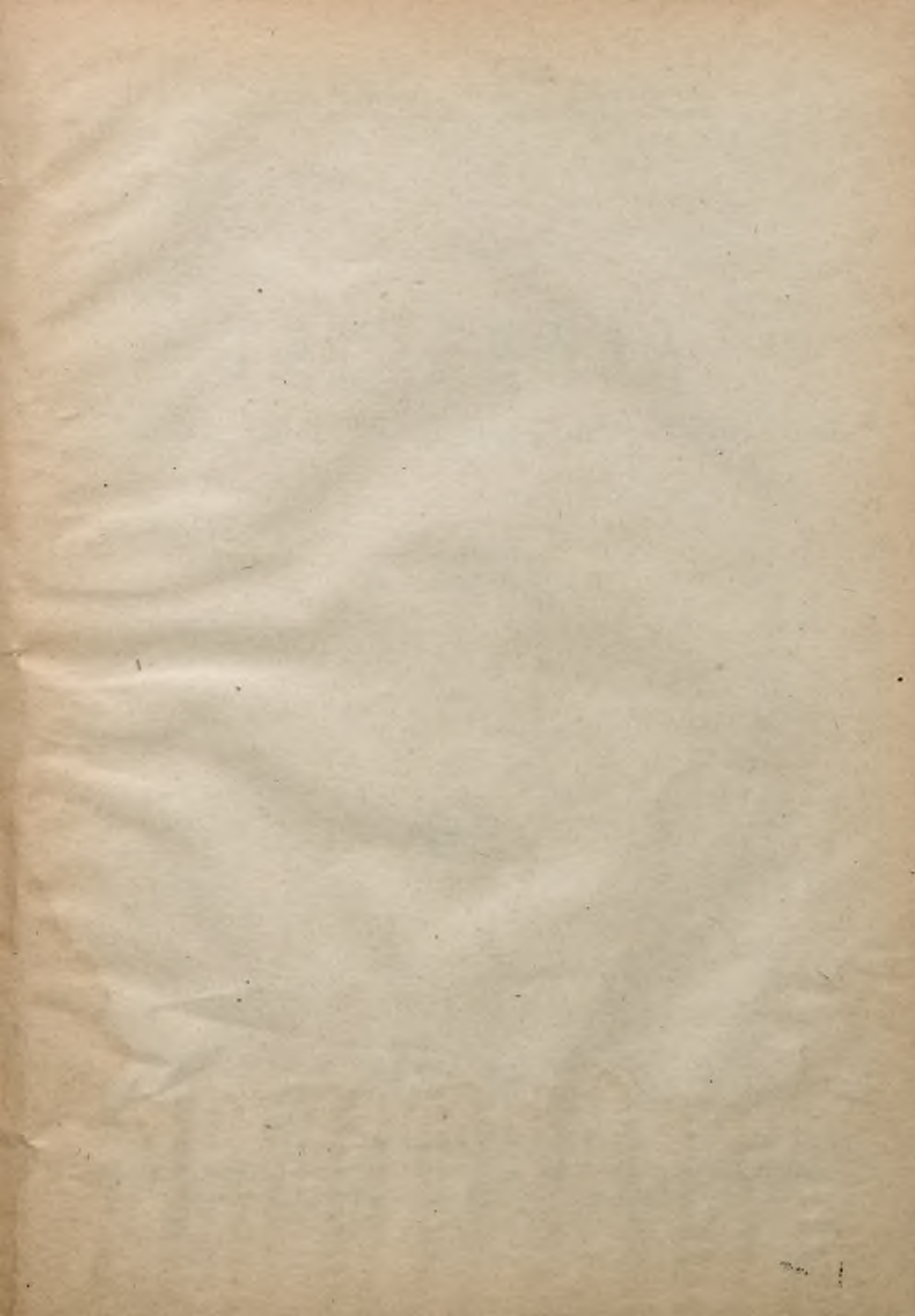
RYŚ. 8.

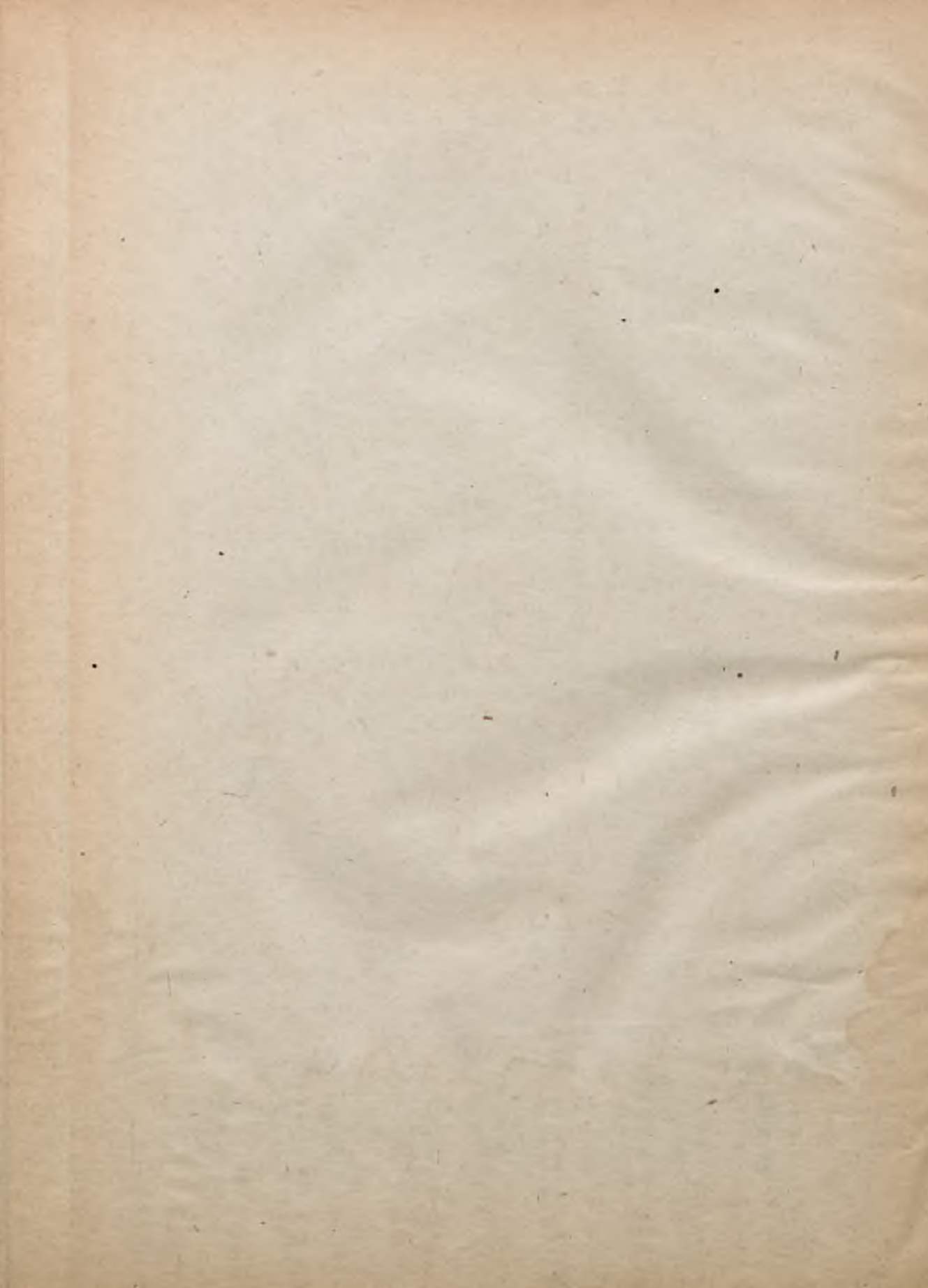
SKŁADOWA PRĄDU USTALANIEGO SIĘ.





R. S. S. B.





POLITECHNIKA WARSZAWSKA

TELEFONJA

OBLICZENIE LINJI TELEFONICZNYCH i PUPINIZACJA

Inżynier-Elektryk
ROMAN TRECHCIŃSKI



№ Wyd. 103.

W A R S Z A W A

NAKŁADEM „KOMISJI WYDAWNICZEJ“ TOW. BR. POM. STUD. POL. WARSZ.
Drukarnia i Litografja „SATURN“ Marszałkowska 91.

ROK AKAD. 1921/22.

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

WYSTAWA

WYSTAWA MIĘDZYNARODOWA W WARSZAWIE

1922



WYSTAWA MIĘDZYNARODOWA W WARSZAWIE 1922

T E L E F O N J A .

Obliczenie linii telefonicznych.

Każda linja elektryczna posiada pewien opór, samoindukcję, pojemność i upływność; oznaczymy te wartości na jeden kilometr dwuprzewodowej linii przez

r opór w omach na 1 kilometr

L samoindukcja w henry na 1 kilometr

C pojemność w faradach na 1 kilometr

σ opór izolacji w omach na 1 kilometr.

Wielkość $\alpha = \frac{1}{\sigma}$ jest to upływność czyli przewodnictwo izolacji w siemensach. Jeżeli s będzie odległość rozważanego miejsca linii od jej początku,

u - chwilowa wartość napięcia między przewodami,

I - chwilowa wartość prądu w przewodach i t - czas

od początku powstania fali napięcia, to na rozważanym odcinku ds zmniejszenie się wartości prądu z

powodu zjawiska ładowania się przewodu i upływu prądu będzie $= -dI$ i spadek napięcia na tym samym odcinku $= -dU$.

Elektryczne własności odcinka ds będą:

$r ds, L ds, C ds, \frac{1}{\alpha ds}$

Spadek napięcia, spowodowany oporem linii będzie =

$= I r d s$; zaś spowodowany samoindukcją linii =

$= l d s \frac{dI}{dt}$; a zatem

$$- dV = I r d s + l d s \frac{dI}{dt} \dots \dots \dots (1)$$

Strata prądu wskutek upływu będzie $= a V d s$; strata

spowodowana ładowaniem się linii $= c d s \frac{dV}{dt}$; a

zatem:

$$- dI = a V d s + c d s \frac{dV}{dt} \dots \dots \dots (2)$$

Na podstawie powyższych równań mamy:

$$-\frac{dV}{d s} = I r + l \frac{dI}{dt} \dots \dots \dots (3)$$

$$-\frac{dI}{d s} = a V + c \frac{dV}{dt} \dots \dots \dots (4)$$

Jeżeli elektromotorycza siła wzbudzona na początku linii ma kształt sinusoidy, to napięcia i prądy na całej linii będą mieć też sinusoidalny kształt, co metodą symboliczną możemy wyrazić:

$$V = V_m e^{j\omega t} \quad i \quad I = I_m e^{j\omega t} \quad , \quad \text{przyczem}$$

V_m i I_m oznaczają maksymalne wartości napięcia i prądu, e - jest podstawą logarytmów naturalnych;

$j = \sqrt{-1}$; $\omega = 2\pi f$, gdzie f = częstotliwość w okresach na sekundę.

Przy oznaczeniu symbolicznem zachodzą następujące zależności:

$$\frac{dI}{dt} = j\omega I \dots \dots \dots (5)$$

$$\frac{dV}{dt} = j\omega V \dots \dots \dots (6)$$

Uwzględniając to w równaniach 3 i 4 otrzymamy:

$$-\frac{dV}{dS} = Ir + l j\omega I \dots \dots \dots (7)$$

$$-\frac{dI}{dS} = aV + c j\omega V \dots \dots \dots (8)$$

Ponieważ

$$\frac{dV}{dS} = e^{j\omega t} \frac{dV_m}{dS} \dots \dots \dots (9)$$

$$\frac{dI}{dS} = e^{j\omega t} \frac{dI_m}{dS} \dots \dots \dots (10)$$

To

$$- e^{j\omega t} \frac{dV_m}{dS} = e^{j\omega t} I_m (r + j\omega l)$$

$$- e^{j\omega t} \frac{dI_m}{dS} = e^{j\omega t} V_m (a + j\omega c)$$

Skrócając przez $e^{j\omega t}$ otrzymamy:

$$-\frac{dV_m}{ds} = I_m(r + j\omega l) \dots \dots \dots (11)$$

$$-\frac{dI_m}{ds} = V_m(a + j\omega c) \dots \dots \dots (12)$$

Ogólna całka powyższych równań różniczkowych będzie:

$$V_m = K_1 e^{+\rho s} + K_2 e^{-\rho s} \dots \dots \dots (13)$$

$$I_m = -\frac{1}{r + j\omega l} \frac{dV_m}{ds} = -\sqrt{\frac{a + j\omega c}{r + j\omega l}} (K_1 e^{+\rho s} - K_2 e^{-\rho s}) \quad (14)$$

przyczem

$$\rho = +\sqrt{(r + j\omega l)(a + j\omega c)} \dots \dots \dots (15)$$

W pewnych wypadkach dogodnem jest stałe K_1 i K_2 mieć w zależności od napięcia i prądu początku linii. Obliczając maksymalne wartości napięcia i prądu na początku linii przez V_{m0} i I_{m0} i pamiętając, że dla początku linii $s = 0$ będziemy mieli

$$V_{m0} = K_1 + K_2 \quad i \quad I_{m0} = -\sqrt{\frac{a + j\omega c}{r + j\omega l}} (K_1 - K_2)$$

Określając z tych równań K_1 i K_2 i podstawiając w równania 13 i 14 otrzymamy

$$V_m = V_{m0} \frac{e^{+\rho z} + e^{-\rho z}}{2} - I_{m0} \sqrt{\frac{r + j\omega l}{a + j\omega c}} \cdot \frac{e^{+\rho z} - e^{-\rho z}}{2} \quad (16)$$

$$I_m = I_{m0} \frac{e^{+\rho z} + e^{-\rho z}}{2} - V_{m0} \sqrt{\frac{a + j\omega c}{r + j\omega l}} \cdot \frac{e^{+\rho z} - e^{-\rho z}}{2} \quad (17)$$

W wielu wypadkach zewnętrzna charakterystyka źródła energii elektrycznej przy określonym stosunku wsajemnym faz jest dokładnie znana. Oznaczmy ten stosunek $\frac{V_{m0}}{I_{m0}}$ przez u , rozumiejąc pod tem pozorny opór linii dla danego źródła energii elektrycznej.

Normalnie koniec linii jest przyłączony do aparatu odbiorczego, przy pomiarach jednakże dogodnym jest mierzenie pozornego oporu linii w dwóch krańcowych wypadkach; mianowicie 1) kiedy koniec linii jest krótko zwarty (stan zwarcia) 2) kiedy końce obu przewodów są wzajemnie izolowane (stan jałowy). Oznaczając opór pozorny, mierzony z jednego końca linii, kiedy drugi jest krótko zwarty przez u_0 i przez u_∞ gdy drugi jest w stanie jałowym, będziemy mieli w pierwszym wypadku napięcie końcowe $V_{m1} = 0$ w drugim prąd końcowy $I_{m1} = 0$.

W tych wypadkach wzory 16 i 17 dają:

$$u_0 = \sqrt{\frac{r + j\omega l}{a + j\omega c}} \cdot \frac{e^{+\rho l} - e^{-\rho l}}{e^{+\rho l} + e^{-\rho l}}$$

$$u_{\infty} = \sqrt{\frac{r + j\omega l}{a + j\omega c}} \cdot \frac{e^{+\rho l} + e^{-\rho l}}{e^{+\rho l} - e^{-\rho l}}$$

Skąd

$$\rho l = \frac{1}{2} \ln \frac{1 + \sqrt{\frac{u_0}{u_{\infty}}}}{1 - \sqrt{\frac{u_0}{u_{\infty}}}}$$

Prąd końcowy przy krótko zwartej linii, na podstawie powyższych równań będzie:

$$I_{m l} = \frac{2 I_{m 0}}{e^{+\rho l} + e^{-\rho l}} = I_{m 0} \sqrt{1 - \frac{u_0}{u_{\infty}}} \dots (18)$$

Wielkość $\rho = \sqrt{(r + j\omega l)(a + j\omega c)}$ przyrównamy do pewnej wielkości, którą oznaczyć możemy w postaci

$$\beta + j\alpha \quad \text{więc} \quad \beta + j\alpha = \sqrt{(r + j\omega l)(a + j\omega c)}$$

Oddzielając wielkości urojone otrzymamy

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{2} (\sqrt{(r^2 + \omega^2 l^2)(a^2 + \omega^2 c^2)} + ar - \omega^2 lc)} \dots (19)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{2} (\sqrt{(r^2 + \omega^2 l^2)(a^2 + \omega^2 c^2)} + ar + \omega^2 lc)} \dots (20)$$

Wprowadzając powyższe oznaczenia otrzymamy prąd końcowy zwarty linii według wzoru

$$I_{ms} = \frac{2 \cdot I_{m0}}{\sqrt{e^{2\beta L} + e^{-2\beta L} + 2 \cos 2\alpha L}} \dots \dots \dots (21)$$

Analizując wzór 21 zauważamy, że przy zwiększającej się wartości βL prąd końcowy będzie się zmniejszał w porównaniu do prądu początku linii; stąd wnioskujemy, że wartość βL jest miarodajną dla osłabienia prądu wzdłuż linii; wielkość β będziemy nazywali współczynnikiem tłumienia danej linii.

Wartość $2 \cos 2\alpha L$ ze wzrastaniem αL będzie się zmieniać w granicach od + 2 do - 2; wielkość α będziemy nazywać współczynnikiem długości fali.

Jeżeli linja będzie na końcu przyłączona do aparatu odbiorczego o oporze pozornym U_a , to napięcie na końcu linii $V_{ms} = I_{ms} \cdot U_a$ i prąd końcowy będzie:

$$I_{ms} = I_{m0} \frac{\sqrt{1 - \frac{U_0}{U_a}}}{1 + \frac{U_0}{U_a}} \dots \dots \dots (22)$$

Między napięciem początku linii i prądem początku linii będzie pewna różnica faz; dla linii nieskończenie długiej wektory napięcia i prądu będą przesunięte o kąt φ_0 określony według wzoru

$$\varphi_0 = \frac{1}{2} \arctg \frac{\omega \left(\frac{a}{c} - \frac{r}{L} \right)}{\omega^2 + \frac{a}{c} + \frac{r}{L}} \dots \dots \dots (23)$$

Pozorny opór nieskończenie długiej linii, na podstawie równania 16 albo 17 określi się wzorem

$$u = \frac{U_{mo}}{I_{mo}} = \sqrt{\frac{r^2 + \omega^2 l^2}{g^2 + \omega^2 c^2}} \dots \dots \dots (24)$$

Długość bieżącej fali będzie $\lambda R_n = 2\pi$

$$R_n = \frac{2\pi}{\lambda} \dots \dots \dots (25)$$

Szybkość ruchu fali będzie $R_n = f \dots \dots \dots (26)$

Przy obliczeniach technicznych można stosować wzory przybliżone.

Dla linii z nieznaczną samoindukcją ($\omega l : r < 0,5$) z wpływem, co ma miejsce dla linii kablowych, wzory 19 i 20 przekształcają się w następujące:

$$\beta = \sqrt{\frac{\omega c r}{2}} \dots \dots \dots (27)$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{\omega c v}{2}} \dots \dots \dots (28)$$

$$u = \sqrt{\frac{v}{\omega c}} \dots \dots \dots (29)$$

Dla linii ze znaczną samoindukcją ($\omega l : r > 3$) otrzymujemy:

$$\beta = \frac{r}{2} \sqrt{\frac{c}{l}} \dots \dots \dots (30)$$

$$u = \sqrt{\frac{l}{c}} \dots \dots \dots (31)$$

$$I_{mo} = \frac{1}{\sqrt{V c c}} \dots \dots \dots (32)$$

W liniach dla których $\frac{\alpha}{c} = \frac{r}{l}$ wektory napięcia i prądu nie będą wzajemnie przesunięte ponieważ kąt φ_0 , na podstawie równania 23 będzie równy zero i interesujące na wielkość będą

$$\beta = r \sqrt{\frac{c}{l}} = a \sqrt{\frac{l}{c}} \dots \dots \dots (33)$$

$$\alpha = \omega \sqrt{lc} \dots \dots \dots (34)$$

$$\lambda_n = \frac{1}{\sqrt{lc}} \dots \dots \dots (35)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{c}{l}} \dots \dots \dots (36)$$

Przykład pierwszy nieskończenie długa krótko zwarta linia bez przesunięcia faz.

W tym wypadku będziemy mieli zależność $\frac{\alpha}{c} = \frac{r}{l}$

Posorny opór według wzoru 36

$$u = \sqrt{\frac{c}{l}}$$

Z zewnętrznej omowej charakterystyki źródła prądu znajdujemy skuteczne (efektywne) i maksymalne wartości napięcia i prądu, ponieważ

$$u = \frac{V_{mo}}{I_{mo}} = \frac{V_{eo}}{I_{eo}} \quad \text{gdzie } V_{eo} \text{ i } I_{eo} \text{ oznaczają}$$

skuteczne (efektywne) wartości napięcia i prądu.

Spółczynnik tłumienia według wzoru 33 będzie

$$\beta = r \sqrt{\frac{c}{l}}$$

Długość fali $\lambda_n = \frac{1}{\sqrt{lc}}$

Na podstawie wzoru 21, przyjąwszy za jednostkę na osi odciętych długość fali, znajdziemy maksymalne i proporcjonalne ^{SKUTECZNE} wartości prądu wzdłuż linii. Wykreślenie wartości te przedstawione są na rys.1; krzywa kropkowana wskazuje wpływ współczynnika tłumienia β ; krzywa pełna - wartości skuteczne prądu w linii w procentach prądu ze stacji nadawczej. Na fig.2 są pokazane chwilowe wartości prądu wzdłuż linii, przyczem kropkowana krzywa oznacza główną falę, kreskowana - odbitą, pełną ostateczną chwilową siłę prądu dla dwóch chwil: chwili powstania i chwili maksimum fali na początku linii.

Przykład drugi: linja kablowa z nieznaczną samoindukcją i wpływem, nieskończenie długa i krótko zwarta.

W tym wypadku przybliżenie $\beta = \alpha = \sqrt{\frac{\omega C W}{2}}$

Obliczając według wzoru 21 prądy w linii w zależności od wartości βl otrzymamy następującą tablicę wartości prądów w stosunku do prądu wychodzącego ze stacji nadawczej:

βl	$I_{e\beta}$
0	I_{e0}
0,5	0,98 I_{e0}
1	0,77 I_{e0}

1,5	0,47 <i>Teo</i>
2	0,25 <i>Teo</i>
2,5	0,15 <i>Teo</i>
3	0,096 <i>Teo</i>
3,5	0,030 <i>Teo</i>
4	0,018 <i>Teo</i>
4,5	0,011 <i>Teo</i>
5	0,006 <i>Teo</i>

Ponieważ prąd wysyłany przy normalnej rozmowie przez aparat telefoniczny równa się około 1 miliampera i czułość normalnego telefonu równą jest około 0,01 miliampera, to linja z tłumieniem $\beta\lambda = 4,5$ uważaną jest za krańcowy wypadek, przy którym istnieje jeszcze możliwość porozumiewania się telefonicznego; za zadawalniającą uważaną jest linja z tłumieniem 3,5, za dobrą linja z tłumieniem 3. Przykład trzeci: linja napowietrzna z dwóch czteromilimetrowych brązowych drutów na izolatorach dzwonkowych.

Własności elektryczne przyjmujemy jako średnie z pomiarów istniejących linji:

opór dla prądu stałego na kilometr 3,05 oma

samoindukcja na kilometr 0,002 henry

pojemność między drutami na kilometr 0,0058 *mf*

opór izolacji na kilometr normalny: 5×10^6 omów,
minimalny: $0,5 \times 10^6$ oma.

Dla prądów zmiennych, wskutek naskórkowości (skia -
-efekt), opór będzie większy i dla prądów telefonicz-
nych o częstotliwości

od 500 do 1000 okresów na sekundę będzie

$r = 3,05 \times 1,04 = 3,2$ oma na kilometr

$$\alpha = \frac{1}{\omega} = 0,2 \times 10^{-6} \quad \text{siemensa normalnie i}$$
$$2 \times 10^{-6} \quad \text{siemens maksymalnie.}$$

Linja może być uważaną za linię ze znaczną samoindukcją i według przybliżonego wzoru 30 otrzymamy współczynnik tłumienia

$$\beta = \frac{r}{2} \sqrt{\frac{c}{l}} + \frac{\alpha}{2} \sqrt{\frac{l}{c}} = 2,76 \times 10^{-3} \text{ normalnie i}$$
$$3,29 \times 10^{-3} \text{ maksymalnie.}$$

Pozorny opór według wzoru 31

$$u = \sqrt{\frac{l}{c}} = 590 \text{ omów}$$

Długość fali według wzoru 32

dla 500 okresów 586 kilometrów

dla 1000 okresów 293 kilometry

Powyzsze cyfry wskazują, że taka linja umożliwi zadowalniającą komunikację telefoniczną na 1000 kilometrów. Gdybyśmy w linię tę włączyli cewki Pupina

z oporem 40 omów na 1 henry i powiększyli samoindukcję linii na kilometr do 0,01 henry, to przyjmując odległość między cewkami według wzoru

$$S = \frac{1}{8000 \sqrt{LC}} = \frac{1}{8000 \sqrt{0,01 + 0,0058 \times 10^{-6}}} = 16,5 \text{ km} \quad (37)$$

otrzymamy cewką o samoindukcji

$(0,010 - 0,002) / 16,5 = 0,132$ henry i oporze

$0,132 \times 40 = 5,28$ oma, co da zwiększenie oporu

na kilometr o $5,28 : 16,5 = 0,32$ oma i pełny opór

na kilometr będzie $3,2 \times 0,32 = 3,52$ oma.

Spółczynnik tłumienia tak pupinizowanej linii będzie według wzoru 30

$\beta = 1,47 \times 10^{-3}$ przy normalnym upływie i

$\beta = 2,66 \times 10^{-3}$ przy dużym upływie.

Pozorny opór według wzoru 31

$$U = 1320 \text{ omów}$$

Długość fali według wzoru 32

dla 500 okresów 264 km.

dla 1000 okresów 132 km.

Na jedną falę o 1000 okresach będziemy mieli

$$132 : 16,5 = 8 \text{ cewek Pupina.}$$

Z powodu skupienia samoindukcji, a nie rozłożenia jej ciągłego wzdłuż linii, jak to było założone przy wyprowadzaniu wzoru 30, współczynnik β zwiąk-

szy się. Odpowiedni mnożnik określimy według wzoru

$$\frac{\pi}{n} : \sin \frac{\pi}{n} \dots \dots \dots (38)$$

gdzie n liczba cewek na jedną falę

$$\frac{3,14}{8} : \sin \frac{\pi}{8} = 0,393 : 0,383 = 1,05$$

otrzymamy:

$$\beta = 1,55 \times 10^{-3} \quad \text{przy normalnym upływie } \alpha$$
$$\beta = 2,8 \times 10^{-3} \quad \text{przy dużym upływie.}$$

Ponieważ jednak pozorny opór linii wzrósł z 590 omów do 1320 omów, to prąd wysyłany przez źródło prądu w zależności od zewnętrznej charakterystyki zmieni się i dla normalnej cewki telefonicznej z połączonym z nią w szereg telefonem zmniejszy się mniej więcej do 3/4 pierwotnej wartości.

Jak widzimy pupinizowanie linii da nam tak znaczne zmniejszenie się współczynnika tłumienia przy dobrej izolacji, że odległość porozumiewania się wzrośnie do 1500 kilometrów; przy złej zaś izolacji zwiększenie współczynnika tłumienia jest tak nieznaczne, że nie kompensuje zwiększonego oporu pozornego linii i odległość porozumiewania się będzie nawet mniejszą, niż na linii niepupinizowanej.

Przykład czwarty: linja napowietrzna z dwuch czteremilimetrowych stalowych drutów na izolatorach czwonekowych.

Dla takiej linji mamy:

opór dla prądu stałego na kilometr 20 omów.

samoindukcja na kilometr 0,01 henry

pojemność na kilometr 0,0058 μ f.

opór izolacji na kilometr: normalny 5×10^6 omów,
minimalny $0,5 \times 10^6$ omów.

Dla prądów zmiennych wskutek skin-efektu opór będzie

$$r = 20 \times 1,4 = 28 \text{ omów na kilometr}$$

$$\alpha = \frac{1}{\omega} = 0,2 \times 10^{-6} \text{ siemensa normalnie i } 2 \times 10^{-6}$$

siemensa maksymalnie.

Spółczynnik tłumienia według wzoru 30 będzie

$$\beta = 10,8 \times 10^{-3} \text{ przy normalnym upływie}$$

$$\beta = 12 \times 10^{-3} \text{ przy dużym upływie}$$

Pozorny opór według wzoru 31

$$z = \sqrt{\frac{r}{\alpha}} = 1320 \text{ omów}$$

Długość fali według wzoru 32

dla 500 okresów 264 kilometry

dla 1000 okresów 132 kilometry.

Powyższe cyfry wskazują, że taka linja umożliwi zadowalniającą komunikację telefoniczną na 250 kilometrów.

Przykład piąty: linja kablowa z dwóch drutów miedzianych o średnicy 0,5 milimetra każdy w papierowej izolacji.

Linja taka znajduje szerokie zastosowanie w sieciach miejskich przy systemie centralnej baterji.
opór na kilometr $r = 180$ omów.

pojemność na kilometr $C = 0,06$ n farady

Spółczynnik tłumienia według wzoru 27 będzie

$$\beta = \sqrt{\frac{acr}{2}} \quad \text{dla 500 okresów } 119 \times 10^3 \text{ i}$$

$$\text{dla 1000 okresów } 169 \times 10^3$$

Długość fali przy 500 okresach 53 kilometry i

przy 1000 okresach 41 kilometr.

Pozorny opór według wzoru 29

przy 500 okresach 1070 omów

przy 1000 okresach 760 omów

Na podstawie otrzymanych danych linja umożliwi sadawalnijacą komunikację telefoniczną na 20 kilometrów.

Rezultaty pomiarów linii telefonicznych:

Pojemność pomiędzy drutami, odległymi o

500 mm od siebie będzie przy średnicy:

2 mm. 0.0050 μ f na km

3 mm. 0.0054 μ f na km.

4 mm. 0.0058 μ f na km.

Dla linii bromowych (90% przewodnictwa) mamy:

średnica	opór dla prądu sta- łego	:	opór dla prądu 500 -1000 okr.	:	samoindukcja w henry na km.
2	12,2	:	12,5	:	0,0023
3	5,4	:	5,53	:	0,0021
4	3,05	:	3,2	:	0,0020
5	1,95	:	2,05	:	0,0019

Dla linii żelaznych mamy:

średnica	opór dla prądu sta- łego	:	opór dla prądu 500 -1000 okr.	:	samoindukcja w henry na km.
2	80	:	96	:	0,0102
3	35,5	:	45,5	:	0,0101
4	20	:	28	:	0,0100
5	12,8	:	19,2	:	0,0100

Dane powyższe są średnimi rezultatami z pomiarów i obliczeń.

Wzory 16 i 17, wyrażone w zależności od λ i β mogą być napisane:

$$V_{ms} = \frac{1}{2} \left[(V_{mo} - I_{mo} \sqrt{\frac{r+j\omega l}{a+j\omega c}}) e^{\beta s} (\cos \beta s + j \sin \beta s) + (V_{mo} + I_{mo} \sqrt{\frac{r+j\omega l}{a+j\omega c}}) e^{-\beta s} (\cos \beta s - j \sin \beta s) \right] \dots (39)$$

$$I_{ms} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{r+j\omega l}{a+j\omega c}} \left[(V_{mo} + I_{mo} \sqrt{\frac{r+j\omega l}{a+j\omega c}}) e^{-\beta s} (\cos \beta s - j \sin \beta s) - (V_{mo} - I_{mo} \sqrt{\frac{r+j\omega l}{a+j\omega c}}) e^{\beta s} (\cos \beta s + j \sin \beta s) \right] \dots (40)$$

W pewnych wypadkach gdy danymi są napięcie końca linii V_{ms} i prąd końca linii I_{ms} wtedy napięcie V_{mx} i prąd I_{mx} w punkcie znajdującym się na odległości x od początku, wyrazi się:

$$V_{mx} = \frac{1}{2} \left[(V_{ms} + I_{ms} \sqrt{\frac{r+j\omega l}{a+j\omega c}}) e^{\beta(l-x)} \{ \cos \beta(l-x) + j \sin \beta(l-x) \} + (V_{ms} - I_{ms} \sqrt{\frac{r+j\omega l}{a+j\omega c}}) e^{-\beta(l-x)} \{ \cos \beta(l-x) - j \sin \beta(l-x) \} \right] \dots (41)$$

$$I_{mx} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{a+j\omega c}{r+j\omega l}} \left[(V_{ms} + I_{ms} \sqrt{\frac{r+j\omega l}{a+j\omega c}}) e^{\beta(l-x)} \{ \cos \beta(l-x) + j \sin \beta(l-x) \} - (V_{ms} - I_{ms} \sqrt{\frac{r+j\omega l}{a+j\omega c}}) e^{-\beta(l-x)} \{ \cos \beta(l-x) - j \sin \beta(l-x) \} \right] \dots (42)$$

Dla początku linii $x = 0$ i wzory 41 i 42 dadzą wartości V_{mo} i I_{mo} w zależności od wartości końcowych V_{ms} i I_{ms}

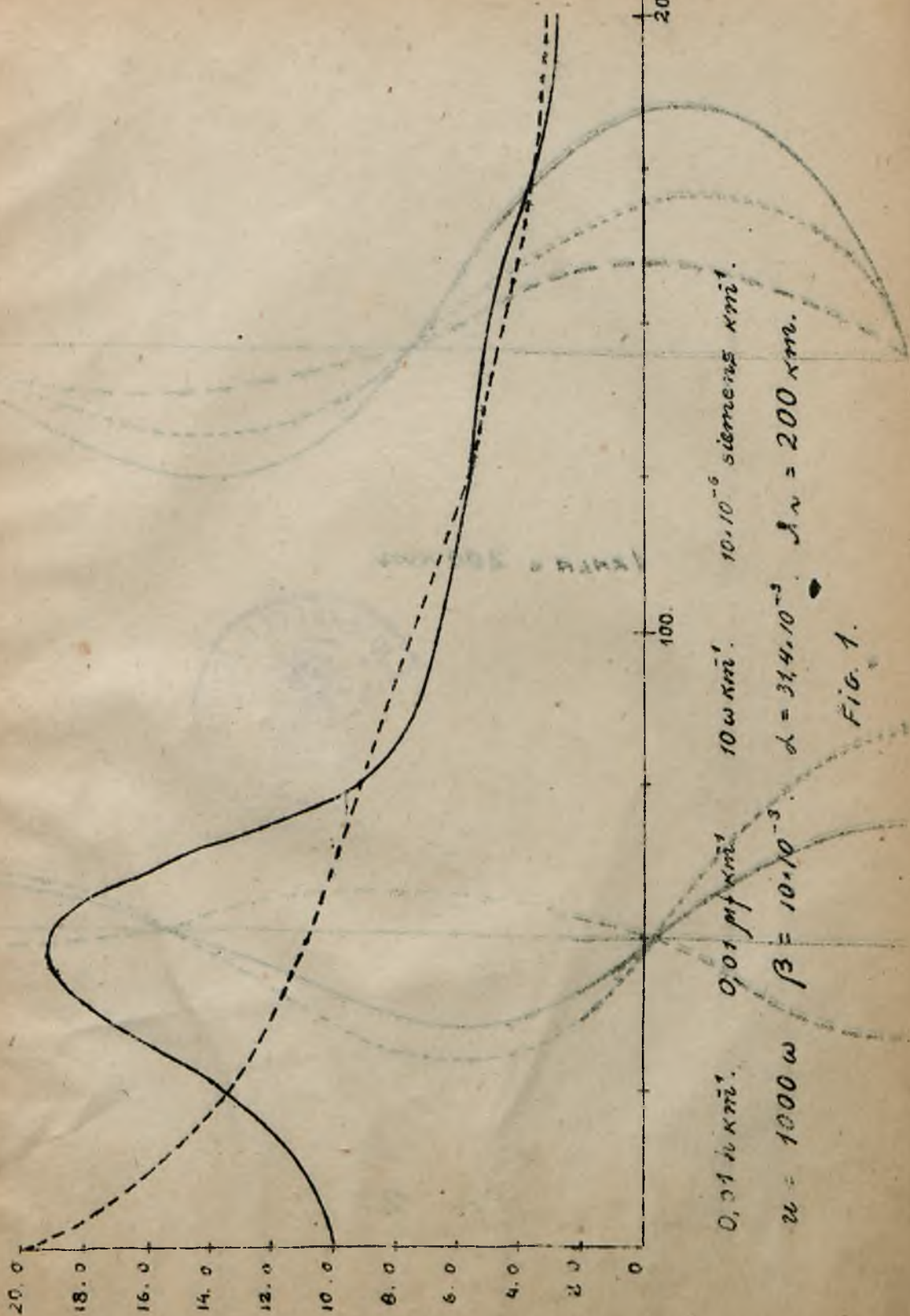
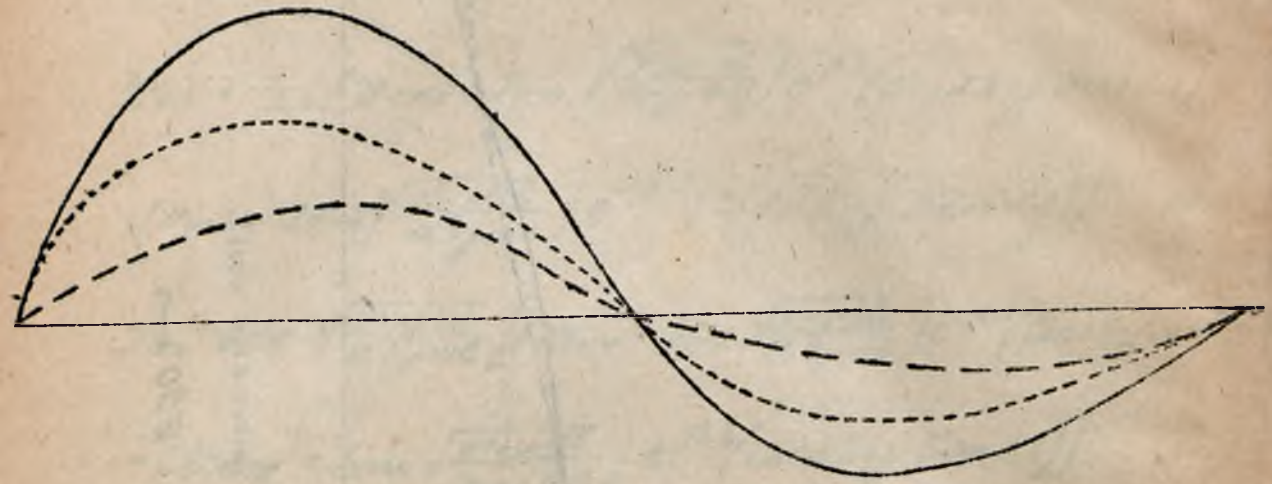


FIG. 1.



1 KALA = 200 KM.

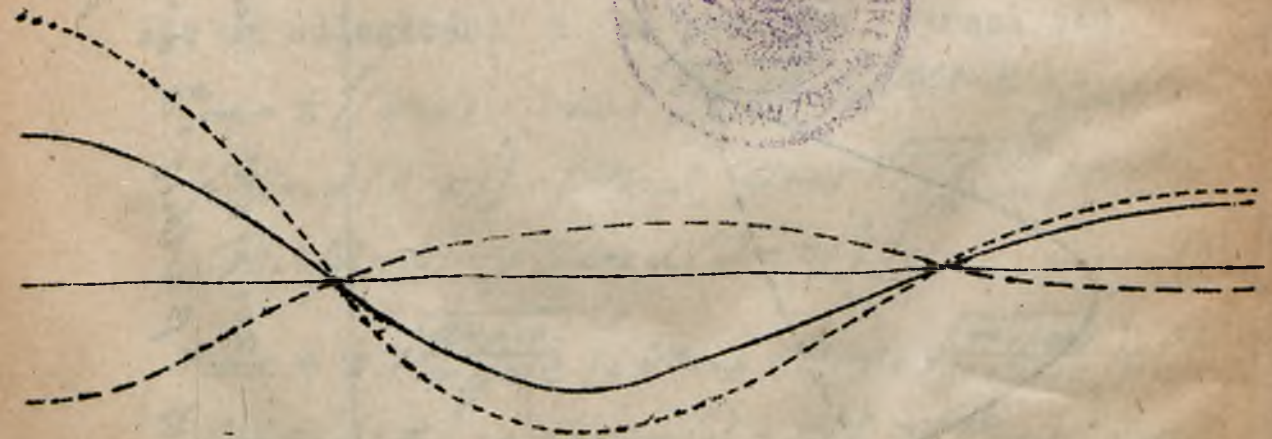


Fig. 2.