

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI  
WARSZAWA-MIEDZESZYN

**BIULETYN**

**INFORMACYJNY**

**10(188)**

**1979**

MINISTERSTWO ŁĄCZNOŚCI

---

# BIULETYN INFORMACYJNY

ROK 19

WARSZAWA 1979

NR 10/188/

---

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI  
Branżowy Ośrodek  
Informacji Naukowej, Technicznej i Ekonomicznej

Redakcja Biuletynu Informacyjnego

---

Redaktor Naczelny - prof. mgr inż. Lesław Kędzierski  
Z-ca Redaktora Naczelnego - doc. dr inż. Krystyn Plewko

Redaktorzy działów:

doc. mgr inż. Władysław Cetner, doc. mgr inż. Adam Moniuszko

Adres Redakcji:

Instytut Łączności

Branżowy Ośrodek

Informacji Naukowej, Technicznej i Ekonomicznej

Warszawa-Miedzeszyn, ul. Szachowa 1

NA PRAWACH RĘKOPISU - DO UŻYTKU SŁUŻBOWEGO

Redaktor: mgr K. Juszkiewicz

Montaż tekstu: B. Drabik

---

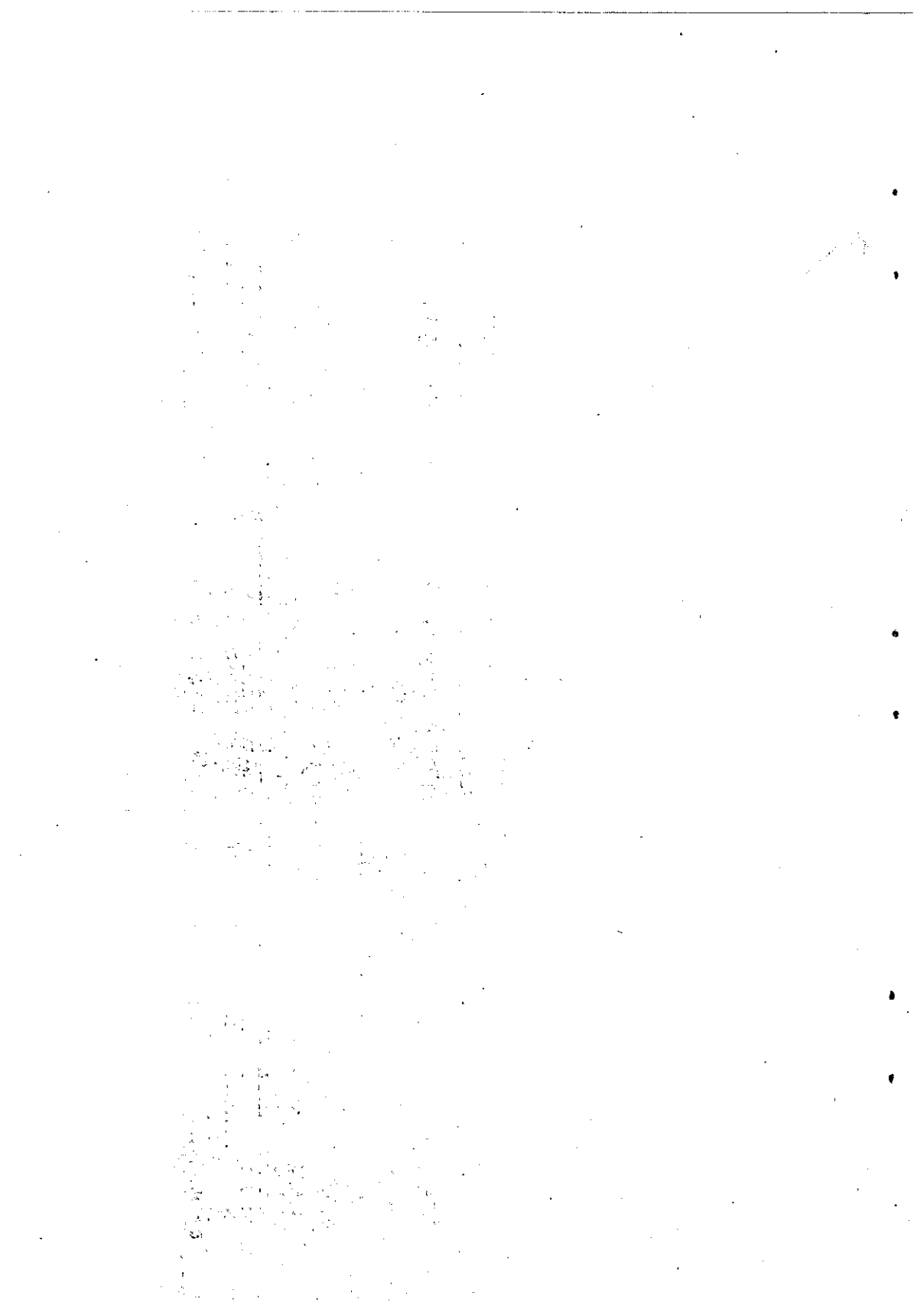
Dział Wydawniczy Instytutu Łączności  
Format B5, Nakład 625. Wpłynęło do  
Działu Wydawniczego 8.XI.1979 r.  
Druk ukończono w grudniu 1979 r.

Andrzej Piłatowicz

PROBLEMATYKA ODDZIAŁYWAŃ LINII ELEKTROENERGETYCZNYCH  
NA URZĄDZENIA TELEKOMUNIKACYJNE

SPIS TREŚCI

	Str.
1. Wstęp	1
2. Oddziaływania zakłócające	2
2.1. Uwagi ogólne	2
2.2. Oddziaływania zakłócające przez sprzężenia elektryczne	4
2.3. Oddziaływania zakłócające przez sprzężenia magnetyczne	5
3. Oddziaływania niebezpieczne	10
3.1. Oddziaływania przez sprzężenia magnetyczne	10
3.2. Oddziaływania przez sprzężenia galwaniczne	23
4. Zakończenie	26
Wykaz literatury	28



## PROBLEMATYKA ODDZIAŁYWAŃ LINII ELEKTROENERGETYCZNYCH NA URZĄDZENIA TELEKOMUNIKACYJNE

### 1. WSTĘP

Pierwsze wytyczne ochrony linii i urządzeń telekomunikacyjnych przed oddziaływaniem linii elektroenergetycznych zostały opublikowane w Polsce w 1966 roku [25]. Następna redakcja wytycznych ukazała się w 1974 roku [24], przy czym jej zakres obejmował również zagadnienia oddziaływań traktacji elektrycznej prądu stałego. W okresie między wymienionymi latami wykonano w kraju wiele prac i badań, których celem było wyjaśnienie podstawowych zagadnień i wybór najwłaściwszych wymagań technicznych oraz metod wyznaczania stopnia oddziaływań, a także sposobów ochrony urządzeń telekomunikacyjnych. Pozwoliło to na rozpowszechnienie i wdrożenie do praktyki projektowej, określonego trybu postępowania i zasad ochrony. Trzeba przy tym stwierdzić, że krajowe wytyczne ochrony są na ogół zgodne z międzynarodowymi zaleceniami CCITT [4]. Po roku 1974 zakres prac krajowych ograniczył się do rozwiązywania pewnych szczególnych zagadnień, jak np. opracowania metod wyznaczania oddziaływań niebezpiecznych przez sprzężenia galwaniczne, oraz do prac mających na celu uproszczenie metod obliczeniowych, np. przez wprowadzenie metod nomograficznych wyznaczania oddziaływań, lub do rozwiązywania szczególnych przypadków spotykanych w praktyce, np. badań oddziaływań zakłócających linii elektroenergetycznych 400 kV.

Zmieniające się warunki pracy obu rozpatrywanych układów: elektroenergetycznego oraz telekomunikacyjnego, jak również wprowadzanie nowych typów urządzeń powodują konieczność uwzględnienia wielu nowych czynników i częściowej zmiany dotychczasowych zasad postępowania i stosowanych środków ochrony. Na konieczność taką wskazały między innymi wyniki i wnioski z Sympozjum na temat szkodliwego oddziaływania linii i urządzeń elektroenergetycznych na sieci telekomunikacyjne, które odbyło się w czerwcu 1977 roku [19]. Materiały z Sympozjum pozwalają na ocenę przewidywanych zmian w zakresie spodziewanych aspektów technicznych dotyczących oddziaływań zakłócających i niebezpiecznych.

Wiele zagadnień było i pozostaje w sferze zainteresowań organizacji

międzynarodowych, zwłaszcza takich jak: Grupa Studiów V CCITT oraz Komitet Studiów 36 CIGRE.

W artykule przedstawiono główne wyniki badań i studiów krajowych oraz zagranicznych, z uwzględnieniem prac wymienionych organizacji międzynarodowych, kierując się przewidywanymi potrzebami, wynikającymi z rozwoju sieci i urządzeń elektroenergetycznych oraz telekomunikacyjnych w Polsce. W podsumowaniu zwrócono uwagę na zagadnienia, które powinny stać się przedmiotem badań w najbliższych latach.

## 2. ODDZIAŁYWANIA ZAKŁÓCAJĄCE

### 2.1. Uwagi ogólne

W krajach europejskich obserwuje się z jednej strony ograniczenie zasięgu oddziaływań zakłócających wobec coraz powszechniejszego stosowania telekomunikacyjnych linii kablowych, z drugiej zaś strony zwraca się uwagę na potrzebę wprowadzenia nowych metod obliczeniowych, popartych odpowiednimi danymi pomiarowymi, na skutek coraz szerszego stosowania urządzeń tyrystorowych, które powodują wzrost harmonicznych prądu i napięcia w sieciach elektroenergetycznych. W krajach Ameryki Północnej, zwłaszcza zaś w Kanadzie przewiduje się dalsze stosowanie napowietrznych linii telekomunikacyjnych lub linii kablowych na długich odcinkach równoległe z liniami elektroenergetycznymi, rurociągami różnego typu, drogami i liniami kolejowymi, w celu lepszego wykorzystania terenu i zmniejszenia kosztów eksploatacyjnych. Tym samym w krajach tych zagadnienie oddziaływań zakłócających jest i będzie nadal szczególnie istotne.

Wspomniany wzrost harmonicznych prądów i napięć jest niepożądany również z uwagi na pracę sieci elektroenergetycznych i odbiorników zasilanych z tej sieci. Powoduje to ograniczenie harmonicznych w sieciach elektroenergetycznych, przy czym wymagania w tym zakresie są formułowane w różny sposób. Na przykład w Szwecji przyjęto, że harmoniczne prądów przy zasilaniu urządzeń prostownikowych lub tyrystorowych powinny być takie, aby wartości największej harmonicznej napięcia na szynach zasilających oraz sumaryczne odkształcenie krzywej napięcia nie przekraczały odpowiednio: 2,5% oraz 3% w sieciach 3,3 do 24 kV, 1,5% oraz 2% w sieciach 36 do 72 kV i 0,7% oraz 1,0% w sieciach 84 kV i wyższych napięć [2]. Jednocześnie podano stosunki mocy urządzeń tyrystorowych  $/S_t/$  do mocy zwarciovych  $/S_z/$ , przy których nie ma potrzeby sprawdzania poziomu wyższych harmonicznych

w sieci - tablica 1. W Wielkiej Brytanii są podane [18] dopuszczalne harmoniczne prądów dla szyn zasilających urządzenia prostownikowe lub tyrystorowe i inne odbiory - por. tablica 2. Jednocześnie ogranicza się maksymalnie dopuszczalne obciążenie powodowane przez urządzenia prostownikowe lub tyrystorowe przy zasilaniu z sieci o różnych napięciach znamionowych /tablica 3/. Przy podanych obciążeniach nie ma obaw o przekroczenie dopuszczalnych wartości harmonicznych prądów. W przypadku przyłączenia większych obciążeń należy sprawdzić, czy nie zostały przekroczone harmoniczne prądów podane w tablicy 2.

T a b l i c a 1

Dopuszczalne z punktu widzenia wyższych harmonicznych  
stosunki mocy  $S_t/S_z$

Liczba faz urządzeń tyrystorowych	Dopuszczalne stosunki $S_t/S_z$ przy napięciach znamionowych sieci	
	do 24 kV	powyżej 24 kV
poniżej 6	$\leq 0,5\%$	-
6	$\leq 1,0\%$	$\leq 0,5\%$
12	$\leq 2,0\%$	$\leq 1,0\%$
powyżej 12	$\leq 3,0\%$	$\leq 1,5\%$

T a b l i c a 2

Dopuszczalne harmoniczne prądów

Napięcie znamionowe sieci, kV	Dopuszczalne harmoniczne prądów, w A			
	5	7	11	13
0,415	65	42	63	53
6,6/11	9,7	6,3	10	8,5
33	9,6	6,3	7	6,0
66	4,8	3,2	3,5	3,0
132	3,0	2,5	3,3	2,8



T a b l i c a 3

Maksymalne dopuszczalne obciążenia prostownikowe  
lub tyrystorowe

Napięcie znamionowe sieci, kV	Dopuszczalne obciążenie w kW przy liczbie faz	
	6	12
0,415	250	750
6,6	600	1800
11	1000	3000
33/66	3000	7000
132 i pow.	-	14000

Podobne wymagania są formułowane w innych krajach; również w Polsce trwają prace zmierzające do wprowadzenia odpowiednich przepisów w tym zakresie. Komitet Techniczny 77 IEC prowadzi prace nad ustaleniem zaleceń międzynarodowych, a Komitet Studiów Nr 36 CIGRE przewiduje zebranie danych ankietowych w zakresie dopuszczalnych w różnych krajach harmonicznych prądów i napięć i wpływu tych prądów i napięć na poziom oddziaływań zakłócających. Do oceny tego wpływu w warunkach krajowych niezbędne byłoby wykonanie serii pomiarów w sieciach 110 - 400 kV dla ustalenia aktualnie występujących telefonicznych współczynników kształtu krzywych prądu i napięcia.

## 2.2. Oddziaływania zakłócające przez sprzężenia elektryczne

Pomiary oddziaływań zakłócających linii elektroenergetycznych 400 kV wykonane ostatnio przez Instytut Łączności [10] wykazały, że występuje znaczna różnica pomiędzy obliczonymi a pomierzonymi wartościami tych oddziaływań. Stosunek wartości pomierzonych do obliczonych zawierał się przy tym w granicach od 0,19 do 0,27, co potwierdza potrzebę uzyskania danych pomiarowych o wartościach harmonicznych prądów i napięć, a ponadto świadczy o konieczności opracowania dokładniejszej metody obliczeniowej, np. podobnej w założeniach do metody opisanej w p. 2.3. Ponieważ metody obliczeniowe, mimo dużej pracochłonności obliczeń, mogą często prowadzić do mylnych wyników, celowe byłoby większe niż dotychczas uzależnienie stosowanych środków ochrony od wyników pomiarów oddziaływań zakłócających.

Zmniejszyłoby to dodatkowo zakres prac obliczeniowo-projektowych. Szczegółowe propozycje dotyczące omawianych zagadnień zostały sprecyzowane w pracy [10].

### 2.3. Oddziaływania zakłócające przez sprzężenia magnetyczne

Interesującą ocenę możliwości powstania oddziaływań zakłócających przez sprzężenia magnetyczne zamieszczono w referacie [11]. Podstawę oceny stanowią: wyniki pomiarów harmonicznych prądów w sieciach 123 kV, 245 kV oraz 420 kV, t.j. w sieciach elektroenergetycznych pracujących ze skutecznie uziemionym punktem gwiazdowym, wyniki pomiarów współczynników podatności torów telekomunikacyjnych na zakłócenia oraz obliczenia indukcyjności wzajemnych i współczynników redukcyjnych przewodów odgromowych rozpatrywanych linii wysokiego napięcia.

Pomiary harmonicznych prądów dotyczyły prądów fazowych oraz składowych zerowych prądów linii elektroenergetycznej. Wykonano łącznie 95 serii pomiarowych w 17 stacjach 123...420 kV zasilających omawiane linie. W tabelicy 4 zamieszczono wyniki pomiarów - podano wartości minimalne i maksymalne oraz wartości 50% i 90% prądów zakłócających równoważnych, o częstotliwości odniesienia  $f_0 = 800$  Hz, uzyskane z rozkładów statystycznych. Pomie-

T a b l i c a 4

Zakłócające prądy równoważne pomierzone w sieciach  
123...420 kV

Napięcie sieci w kV	Prądy fazowe, w A				Składowe zerowe prądów w A			
	min	max	50%	90%	min	max	50%	90%
123	1,6	10,0	5,8	7,6	0,23	0,76	0,50	0,63
245	1,3	3,0	2,1	2,5	0,13	0,91	0,30	0,63
420	0,5	2,3	0,9	1,3	0,20	0,36	0,25	0,29

zione wartości współczynników podatności linii telekomunikacyjnych przedstawiono na rys. 1<sup>x/</sup>. Na rysunku tym podano również rozkłady statystyczne współczynników dla napowietrznych linii abonenckich i linii łączących centrale telefoniczne. W rezultacie wstępnej oceny skutków oddziaływania

<sup>x/</sup> Rysunki zamieszczono na końcu artykułu.

stwierdzono, że decydujące znaczenie ma oddziaływanie składowych zerowych prądów<sup>x/</sup>, tym bardziej że w rozpatrywanych warunkach rezystywność gruntu była znaczna i wynosiła 2300  $\Omega \cdot m$ . Dla tego przypadku oddziaływania wyznaczono sem psfometryczną zakłóceń z zależności:

$$E_p = 2\pi f_o M_L I_n I_{ro} \eta_m r_{u800} \cdot 10^{-3} \quad (1)$$

w której:

- $E_p$  - sem psfometryczna zakłóceń, w mV,
- $f_o$  - 800 Hz,
- $M_L$  - jednostkowa indukcyjność wzajemna obwodów współzłemnych utworzonych z przewodów linii telekomunikacyjnej i elektroenergetycznej, w  $\mu H/km$ ,
- $I_n$  - długość odcinka zbliżenia, w km,
- $I_{ro}$  - prąd zakłócający równoważny prądom składowych zerowych, w A /tabl. 4/,
- $\eta_m$  - współczynnik podatności na zakłócenia przy sprzężeniu magnetycznym /rys. 1/,
- $r_{u800}$  - współczynnik redukcyjny przewodów odgromowych linii elektroenergetycznej.

W obliczeniach rozważono populację złożoną z 6470 km linii o napięciu znamionowym 123 kV /70%/ , z 2080 km linii 245 kV /22%/ oraz 700 km linii 420 kV /8%/. Uwzględniono jedynie przypadki istotne z punktu widzenia oddziaływań zakłócających, tzn. takie, w których iloczyn  $2\pi f_o M_L I_n$  zawierał się w granicach od 2 do 10  $\Omega$ . Współczynniki redukcyjne przewodów odgromowych wynosiły 0,6...0,7 dla przewodów stalowych 2 x 35 FL...2x70 AFL oraz 0,4...0,5 dla - 2 x 130 AFL. Wynikowe sem psfometryczne zależą w sposób losowy od wymienionych czynników - przy użyciu metody Monte Carlo uzyskano rozkład prawdopodobieństwa występowania sem psfometrycznych o różnych wartościach przedstawiony na rys. 2. Z rozkładu wynika, że prawdopodobne jest przekroczenie wartości dopuszczalnej 1 mV w ok. 18,5% linii łączących centrale telefoniczne oraz w ok. 20% linii abonenckich.

<sup>x/</sup> Zgodnie z p. 2.4.6. wytycznych [6] jako składowe zerowe prądów lub prądy kolejności zerowej, przyjmuje się prądy płynące przez uzziemienia punktów zerowych transformatorów, pracujących w układach ze skutecznie uzziemionym punktem zerowym.

Przedstawiony przykład świadczy o braku możliwości powstawania oddziaływań zakłócających przez prądy kolejności zerowej przy korzystniejszych rezystywnościach gruntu, to jest np. w warunkach polskich, w których można się liczyć w większości przypadków z rezystywnością rzędu  $100 \Omega \cdot m$ . Wydaje się natomiast celowe przeprowadzenie podobnej analizy dla oceny możliwości powstawania oddziaływań przekraczających dopuszczalne wartości przy sprzężeniach elektrycznych.

W tabelicy 5 podano dla porównania zakłócające prądy równoważne składowych zerowych pomierzone w sieciach 130...400 kV w Szwecji [14] /wartości średnie półgodzinne oraz odchylenia standardowe/. Z porównania tablic 4 oraz 5 wynika dobra zgodność prądów jedynie w przypadku linii 400 kV.

T a b l i c a 5

Zakłócające prądy równoważne składowym zerowym w sieciach  
130...400 kV

Napięcie sieci w kV	Wartości prądów w mA			
	1967 rok		1976 rok	
	średnia	$\sigma$	średnia	$\sigma$
130	60	35	51	26
220	130	80	111	89
400	230	140	312	120

$\sigma$  - średnie odchylenie standardowe

Wzrost harmoniczných prądów w liniach elektroenergetycznych, a także w liniach elektrotrakcyjnych przy zasilaniu elektrowozów ze sterowaniem tyrystorowym, spowodował konieczność ustalenia, dokładniejszego od dotychczasowych, sposobu wyznaczania oddziaływań zakłócających w liniach telekomunikacyjnych kablowych przy sprzężeniach magnetycznych. Nowy sposób [23] uwzględnia wpływ tłumienia zakłóceń na napięcie zakłóceń mierzone na krańcach linii telekomunikacyjnej. Rozpatrywana linia kablowa, telekomunikacyjna jest podzielona na szereg odcinków, w których sem indukowana przez prąd n-tej harmonicznej ma stałą wartość wynoszącą:

$$E_{yn} = - I_{zyn} \omega_n M_{ty} \frac{l_y}{s_y} \cdot 10^{-3} \quad /2/$$

przy czym:

$E_{yn}$  - sem indukowana na odcinku  $y$  przez prąd  $n$ -tej harmonicznej, mV/km,

$I_{zyn}$  - prąd zakłócający  $n$ -tej harmonicznej na odcinku  $y$ , A,

$\omega_n$  -  $2\pi f_n$  - pulsacja prądu,

$M_{ty}$  - jednostkowa indukcyjność wzajemna na odcinku  $y$  w  $\mu\text{H}/\text{km}$ ,

$l_y$  - długość odcinka linii elektroenergetycznej, w km,

$s_y$  - długość odcinka linii telekomunikacyjnej, w km.

Dla każdego odcinka linii telekomunikacyjnej są układane równania wiążące pomiędzy sobą prądy i napięcia w obwodzie żyła-powłoka, zgodnie z ogólnym rozwiązaniem równania linii długiej:

$$I_{zpy}/x/ = A_y e^{\gamma_{zp} x} + B_y e^{-\gamma_{zp} x} + E_{yn} \frac{r_k}{R_{zp}}$$

/3/

$$U_{zpy}/x/ = -Z_{zp}/A_y e^{\gamma_{zp} x} - B_y e^{-\gamma_{zp} x}$$

W równaniach /3/ przyjęto oznaczenia:

$U_{zpy}/x/$  - napięcie w obwodzie żyła-powłoka na odcinku  $y$ , w odległości  $x$  od środka odcinka,

$I_{zpy}/x/$  - j.w., lecz prąd w obwodzie żyła-powłoka,

$A_y, B_y$  - stałe równania,

$\gamma_{zp} = \sqrt{Z_{zp} Y_{zp}}$  - jednostkowa tamowność obwodu żyła-powłoka,

$Z_{zp} = R_{zp} + jX_{zp}$  - impedancja jednostkowa wzdłużna obwodu żyła-powłoka,

$Y_{zp}$  - admitancja jednostkowa poprzeczna obwodu żyła-powłoka,

$R_{zp}$  - rezystancja jednostkowa obwodu żyła-powłoka,

$X_{zp}$  - reaktancja jednostkowa obwodu żyła-powłoka,

$r_k$  - współczynnik redukcji kabla.

Stale równania wyznacza się z warunków brzegowych - dla końcowych odcinków toru przyjmuje się wartość prądu równą zero /otwarty obwód/, a dla

każdego z sąsiednich odcinków przyjmuje się równość prądów i napięć. Przy sumarycznej liczbie odcinków równej  $N$  oznacza to konieczność rozwiązania  $2N$  równań liniowych. Na podstawie znanych współczynników  $A_y$  oraz  $B_y$  są wyznaczane prądy i napięcia, a następnie elementarne moce:

$$dP_{y/x} = \frac{Z}{16} \left| U_{zpy/x} \right|^2 \omega_n^2 e_a^2 dx \quad /4/$$

przy czym:

- $dP_{y/x}$  - elementarna moc zakłóceń na odcinku  $y$  w odległości  $x$  od środka odcinka,
- $Z$  - impedancja falowa linii telekomunikacyjnej,
- $e_a$  - średnia kwadratowa wartość jednostkowej asymetrii względem ziemi.

Znając jednostkowe tłumienie mocy w torze linii telekomunikacyjnej można obliczyć moce na początku i końcu każdego odcinka  $y$ , a następnie na początku i końcu całej linii kablowej dla każdej harmonicznej. Po zsumowaniu mocy poszczególnych harmonicznych uzyskuje się wynikową moc zakłóceń na początku i końcu toru oraz szukane napięcie psfometryczne z zależności:

$$U_p = \sqrt{PZ} \quad /5/$$

- $U_p$  - napięcie psfometryczne na początku lub końcu toru,
- $P$  - moc zakłóceń na początku lub końcu toru,
- $Z$  - impedancja falowa toru.

Ze względu na złożoność metody obliczeń konieczne jest stosowanie metod numerycznych i maszyny cyfrowej. Uproszczenie metody, polegające na obliczaniu napięć psfometrycznych dla jednej podstawowej harmonicznej powoduje błąd rzędu 12...15%. Asymetria aparatury przyłączonej na końcach toru może w istotny sposób wpływać na poziom zakłóceń, co może być uwzględnione w metodzie obliczeń. W podsumowaniu artykułu stwierdzono, że dotychczasowe metody nie uwzględniały wpływu odcinków kabla, poza odcinkiem zbliżenia, ani faktycznego stopnia asymetrii względem ziemi toru telekomunikacyjnego, przez co uzyskiwano znaczną rozbieżność pomiędzy obliczeniami i pomiarami. Metoda nadaje się szczególnie do obliczenia oddziały-

wań zakłócających z ruchomymi źródłami zakłóceń /np. lokomotywami sterowanymi tyrystorowo/. Należy przypuszczać, że wymienione uproszczenia mogą być przyczyną niedokładności obliczeń oddziaływań zakłócających przez sprzężenia elektryczne, np. wg metody opisanej w krajowych wytycznych ochrony [24].

### 3. ODDZIAŁYWANIA NIEBEZPIECZNE

#### 3.1. Oddziaływania przez sprzężenia magnetyczne

Zgodnie z dotychczasową praktyką sem wzdłużna indukowana w napowietrznych lub kablowych torach telekomunikacyjnych stanowiła na ogół podstawę oceny stopnia oddziaływania przez sprzężenia magnetyczne. Było to powodem podjęcia przez CIGRE /Komitet Studiów 36/ prac uzasadniających możliwość zwiększenia dopuszczalnych wartości sem, biorąc pod uwagę:

- a/ wytrzymałość izolacji linii telekomunikacyjnych,
- b/ odporność urządzeń i aparatów przyłączonych na krańcach linii oraz urządzeń wzmacniających instalowanych wzdłuż jej trasy,
- c/ bezpieczeństwo pracy obsługi wykonującej prace montażowe i konserwacyjne związane z dotykiem przewodów linii lub urządzeń oraz
- d/ bezpieczeństwo abonentów.

Podstawowym kryterium okazało się przy tym bezpieczeństwo ludzi obsługujących urządzenia telekomunikacyjne. Prawdopodobieństwo zagrożenia obsługi zależy od trzech czynników:

- a/ prawdopodobieństwa jednofazowych zwarcí doziemnych w liniach elektroenergetycznych,
- b/ prawdopodobieństwa wystąpienia zwarcia w miejscach zbliżeń z liniami telekomunikacyjnymi /tj. prawdopodobieństwo zwarcí powodujących powstanie sem wzdłużnych o znacznych wartościach/ oraz
- c/ prawdopodobieństwa pracy personelu w strefie zagrożonej.

Biorąc pod uwagę wymienione czynniki zaproponowano przyjęcie następujących wartości dopuszczalnych: 430 V w przypadkach zbliżeń linii telekomunikacyjnych z liniami elektroenergetycznymi o "normalnym wykonaniu" wg zaleceń CCITT [4], 1000 V w przypadku zbliżeń z liniami o "dużej pewności pracy" [4], jeżeli czas trwania zwarcia zawiera się w granicach

0,35 - 0,5 s oraz 1500 V - jak wyżej, lecz przy czasie trwania zwarcia poniżej 0,35 s. Propozycje CIGRE nie zostały jednak dotąd zaakceptowane przez Grupę Studiów V CCITT [15], [16]. Na podstawie odpowiedzi ankietowych nadesłanych przez Austrię, Danię, Francję, Japonię, Oman, RFN, Szwajcarię, USA, Wielką Brytanię, Włochy i ZSRR zdecydowano, że obecnie /1978 r./ nie ma podstaw do zwiększenia wartości dopuszczalnych. Głównymi argumentami przeciw zmianie wartości dopuszczalnych, używanymi w odpowiedziach, były: Możliwość powiększenia sem wzdłużnych indukowanych, przez przyjęcie jako kryterium oddziaływania niebezpiecznego wartości napięć pomiędzy przewodami linii telekomunikacyjnych a ziemią, konieczność ponoszenia kosztów dodatkowej ochrony po podwyższeniu wartości dopuszczalnych, mniejsze dopuszczalne wartości w przepisach narodowych od wartości przyjętych w zaleceniach CCITT, coraz szersze stosowanie urządzeń z elementami elektronicznymi itp. Z przytoczonych odpowiedzi wynikało, że wartości dopuszczalne, praktycznie przyjęte w różnych krajach, odbiegają od zalecanych przez CCITT. Pierwsze odpowiedzi na ankietę opracowaną przez CIGRE na ten temat wskazują, że wartości dopuszczalne dla linii napowietrznych zawierają się od 300 do 1000 V, a dla linii telekomunikacyjnych kablowych od 300 do 2400 V lub od 60 do 100% napięcia probierczego 50 Hz, 1 min. W RFN i w Wielkiej Brytanii wartości dopuszczalne są podawane dla napięć pomiędzy przewodami linii telekomunikacyjnych a ziemią.

Zagadnienie obliczenia napięcia przewodów linii telekomunikacyjnej względem ziemi wiąże się z wyborem miejsca zainstalowania odgromników gazowanych ochronnych oraz ustaleniem dodatkowego współczynnika redukcyjnego wnoszonego przez prądy płynące przez przewody po zapłonie odgromników. Mimo wielu publikacji na ten temat nie znaleziono metody, która mogłaby być stosowana praktycznie, zwłaszcza przy uwzględnieniu możliwości wystąpienia zwarcia w dowolnym punkcie wzdłuż odcinka zbliżenia i poza nim. Wybór miejsca zainstalowania odgromników gazowanych wzdłuż przewodów linii narażonej na oddziaływanie może być dokonany na podstawie obliczenia napięcia linii względem ziemi  $U_T/x/$  i porównania go z napięciem dopuszczalnym  $U_{T\text{dop}}$  - w przypadku gdy  $U_T/x/ > U_{T\text{dop}}$ , należy w punkcie x zainstalować odgromniki gazowane. Ogólna metoda, przy założeniu równoległego zbliżenia i przepływie prądu oddziaływującego przez cały odcinek zbliżenia, została opisana w artykule [8]. Napięcie  $U_T/x/$  można obliczyć z zależności



$$U_T/x/ = U_T^u/x/ + U_T^w/x/ \quad /6/$$

przy czym:

$$U_T^u/x/ = - Ksh \left[ n_T^u + \gamma_T^u/l_T^u + x/ \right] \left\{ \frac{Fsh \frac{\gamma_T^u - \gamma_E^u/x + l_Z^u}{2}}{\gamma_T^u - \gamma_E^u} \operatorname{ch} \left[ n_T^u + \gamma_T^u/l_Z^u + l_T^u/ - n_E^u - \gamma_E^u/l_Z^u + l_E^u/ - \frac{\gamma_T^u - \gamma_E^u/x + l_Z^u}{2} \right] - \frac{Nsh \frac{\gamma_T^u + \gamma_E^u/x + l_Z^u}{2}}{\gamma_T^u + \gamma_E^u} \operatorname{ch} \left[ n_T^u + \gamma_T^u/l_Z^u + l_T^u/ + n_E^u + \gamma_E^u/l_Z^u + l_E^u/ - \frac{\gamma_T^u + \gamma_E^u/x + l_Z^u}{2} \right] \right\} \quad /6a/$$

oraz

$$U_T^w/x/ = Ksh \left[ n_T^w + \gamma_T^w/l_T^w - l_T^w - x/ \right] \left\{ \frac{Nsh \frac{\gamma_T^w + \gamma_E^w/x}{2}}{\gamma_T^w + \gamma_E^w} \operatorname{ch} \left[ n_T^w + \gamma_T^w/l_T^w - l_T^w - x/ + \gamma_T^w/l_T^w - n_E^w - \gamma_E^w/l_Z^w + l_E^w/ + \frac{\gamma_T^w + \gamma_E^w/x}{2} \right] - \frac{Fsh \frac{\gamma_T^w - \gamma_E^w/x}{2}}{\gamma_T^w - \gamma_E^w} \operatorname{ch} \left[ n_T^w + \gamma_T^w/l_T^w + n_E^w + \gamma_E^w/l_Z^w + l_E^w/ + \frac{\gamma_T^w - \gamma_E^w/x}{2} \right] \right\} \quad /6b/$$

W powyższych wzorach przyjęto następujące oznaczenia:

$U_T^u/x/$ ;  $U_T^w/x/$  - składowe napięcie pochodzące od oddziaływań z lewej - lub prawej strony punktu x,

$n_T^u$ ;  $n_T^w$ ;  $n_E^u$ ;  $n_E^w$  - współczynniki niedopasowania odpowiednio toru telekomunikacyjnego i elektroenergetycznego na obu końcach torów,

$\gamma_T$  i  $\gamma_E$  - jednostkowe tłumienności odpowiednio linii telekomunikacyjnej i elektroenergetycznej,

$$I_T = I_T^1 + I_2 + I_T^N$$

$I_T^1$ ;  $I_T^N$ ;  $I_2$ ;  $I_E^N$  oraz  $x$  - odległości, jak na rys. 3,

F; K oraz N stałe.

W przypadku sprzężenia magnetycznego:

$$K = \frac{I_E^0 / Z_E}{ch/n_E^2 + \gamma_E I_E^0} \quad N = -F = \frac{Z_M}{Z_E Z_T}$$

przy czym:

$I_E^0$  - prąd oddziaływujący na początku linii elektroenergetycznej,

$$I_E = I_E^1 + I_2 + I_E^N \text{ /rys. 3/},$$

$Z_M$  - impedancja wzajemnego sprzężenia przewodów linii elektroenergetycznej i telekomunikacyjnej,

$Z_E$ ;  $Z_T$  - impedancja falowa odpowiednio linii elektroenergetycznej i telekomunikacyjnej.

Na podstawie zależności /6/, /6a/ oraz /6b/ wyznacza się punkt, w którym napięcie jest maksymalne i przekracza wartość dopuszczalną; w punkcie tym należy przewidzieć zainstalowanie odgromników gazowanych. W większości przypadków maksymalne napięcie wystąpi na obu końcach odcinka zbliżenia  $l_2$ . Przyjmując, że odgromniki gazowane będą instalowane, np. w środku odcinka zbliżenia lub na jego końcach należy powtórzyć obliczenie dla odcinków między końcami toru a punktem zainstalowania odgromnika lub dla odcinka między odgromnikami i na podstawie uzyskanych nowych wartości napięć zdecydować o ewentualnej potrzebie zainstalowania dodatkowych odgromników. Obliczenia należy powtarzać do momentu uzyskania dla dowolnego  $x$  napięcia  $U_T/x/ < U_{T\text{dop}}$ . Punkty zainstalowania odgromników należy traktować przy tym jako punkty o współczynniku niedopasowania  $n_0$  /wartość zależna między innymi od rezystancji odgromnika  $R_0$ /.

Współczynnik redukcyjny żył kabli, będący skutkiem przepływu prądu po zadziałaniu odgromników, można wyznaczyć [7] jako

$$r_d = \frac{1}{\sqrt{\left[1 + R'_U/G'_p + nG'_z/2\right]^2 + X'^2/G'_p + nG'_z/2}}$$

/7/

przy czym:

$$R'_U = \frac{R_{u1} + R_{u2}}{l_T} - \text{zastępcza rezystancja uzłomów, } \Omega/\text{km,}$$

$R_{u1}$  oraz  $R_{u2}$  - rezystancja uzłomu odpowiednio na jednym i drugim krańcu linii telekomunikacyjnej,  $\Omega$ ,

$l_T$  - długość linii telekomunikacyjnej, km,

$G'_p$  oraz  $G'_z/2$  - jednostkowe konduktancje wzdłużne powłoki i żyły kabla telekomunikacyjnego,  $\Omega/\text{km}$ ,

$X'$  - jednostkowa reaktancja obwodu żyła - powłoka,  $\Omega/\text{km}$ ,

$n$  - liczba żył przewodzących prąd.

Znając wymaganą wartość współczynnika  $r_d$  oblicza się liczbę żył, w której powinien nastąpić zapłon odgromników, aby sem indukowana nie przekroczyła wartości dopuszczalnej  $/Er_d \leq E_{dop}/$ :

$$n = R'_z \frac{\sqrt{1 - r_d^2}}{r_d X'} - G'_p \quad /8/$$

gdzie:

$$R'_z = \frac{1}{G'_z}$$

Zależność /8/ jest zależnością uproszczoną, obowiązującą dla przypadków, w których  $R'_U$  jest pomijalnie małe w porównaniu z pozostałymi parametrami kabla. W tabelicy 6 podano minimalne wartości  $n$  dla wymaganych wartości współczynnika  $r_d$  oraz różnych parametrów: rezystancji wewnętrznych odgromnika, średnic żył kabli i rezystancji powłok kabli. Skuteczność tego typu ochrony może być zapewniona, jeżeli rezystancje wewnętrzne odgromników i rezystancje uzłomów są małe. Zmiana wartości prądu zwarciowego oddziaływującego wymaga sprawdzenia skuteczności ochrony /powoduje ona zmianę wymaganej wartości  $r_d/$ .

Szczególnym zagadnieniem rozpatrzonym w zakresie oddziaływań przez

T a b l i c a 6

Wymagane liczby żył kabli przewodzące prąd po zapłonie odgromników

Średnica żył kabli mm	Rezystancja wewnętrzna odgromników $\Omega$	Wymagane wartości n przy:											
		$R'_p = 0,8 \Omega / \text{km}$				$R'_p = 2 \Omega / \text{km}$				$R'_p = 8 \Omega / \text{km}$			
		$r_d = 0,6$	$r_d = 0,2$	$r_d = 0,6$	$r_d = 0,2$	$r_d = 0,6$	$r_d = 0,2$	$r_d = 0,6$	$r_d = 0,2$	$r_d = 0,6$	$r_d = 0,2$	$r_d = 0,6$	$r_d = 0,2$
0,8	0	14	205	40	232	54	245						
	10	22	321	63	363	84	384						
	25	33	495	97	559	129	591						
	50	53	784	154	886	205	936						
	100	91	1362	268	1539	356	1627						
0,6	0	25	365	72	413	96	436						
	10	32	481	95	543	126	575						
	25	44	655	129	739	171	782						
	50	63	944	186	1066	247	1127						
	100	102	1522	299	1720	398	1818						
0,4	0	55	822	162	928	215	982						
	10	63	938	184	1059	245	1120						
	25	74	1111	219	1255	291	1327						
	50	94	1400	275	1582	366	1673						
	100	133	1979	389	2235	517	2364						

sprężenia magnetyczne było wyznaczenie współczynników redukcyjnych mostów [13]. Badania wykonano dla odcinka zbliżenia linii elektroenergetycznej, napowietrznej 220 kV o długości ok. 12 km, przebiegającej na długości ok. 1,4 km w odległości 176...192 m od kabla telekomunikacyjnego, ułożonego na moście. Most przebiega nad morzem o głębokości 20 m - przewodność wody morskiej wynosi 4,4 S/m, zaś przewodność ziemi pod wodą morską: 0,02 S/m. Wykonano pomiary sem indukowanej w żyłach kabla telekomunikacyjnego przy przepływie prądu 42...167 A, odwzorowującego przepływ prądu zwarciowego przy jednofazowym zwarciu doziemnym. Z pomiarów wynika, że w rozpatrywanych warunkach sem indukowana wynosi ok. 0,016 V/A, a współczynnik redukcyjny konstrukcji mostu 0,19. Współczynnik redukcyjny mostu  $r_m$  można wyznaczyć jako:

$$r_m = 1 - \frac{Z_{MT}}{2R_{UM} + Z_M} \quad /9/$$

przy czym:

$Z_{MT}$  - impedancja wzajemna pomiędzy mostem a przewodami linii telekomunikacyjnej,

$R_{UM}$  - rezystancja uziemienia mostu na obu końcach,

$Z_M$  - impedancja własna, wzdłużna mostu.

Przyjmując dwuwarstwową strukturę gruntu, wyprowadzono zależności dla obliczenia wielkości wchodzących do wzoru /9/, stosując klasyczne równania Carsona. Konstrukcję mostu złożoną z sześciu metalowych kształtowników zastąpiono pojedynczym przewodem o zastępczym promieniu 12,5 m. Podstawową trudność w obliczeniach stanowiło wyznaczenie rezystancji  $R_{UM}$ . Na podstawie znajomości wartości współczynnika  $r_M$  z pomiarów stwierdzono, że rezystancja ta jest bardzo mała i wynosi ok. 0,023  $\Omega$ . Porównanie reakcji  $X_{MT}$  wskazuje na dobrą zgodność obliczeń i pomiarów. Głównym powodem bardzo korzystnego /małego/ współczynnika redukcyjnego mostu była duża przewodność wody morskiej.

W ostatnich latach, wobec stosowania kabli elektroenergetycznych pracujących w sieciach ze skutecznie uziemionym punktem gwiazdowym /110 - 400 kV/, rozpatrywano oddziaływania tych kabli na kablowe linie telekomunikacyjne. Oddziaływania prądów fazowych kabli elektroenergetycznych w czasie normalnej pracy powstają na skutek bardzo małych odległości po-

między kablami obu rodzajów, przez co istotną rolę zaczynają odgrywać różnice odległości pomiędzy kablami telekomunikacyjnymi a poszczególnymi fazami trójkablowych linii elektroenergetycznych. Podstawowe zagadnienie stanowi przy tym wyznaczanie prądów płynących w czasie normalnej pracy przez powłoki kabli elektroenergetycznych i przez ziemię. Wartości tych prądów są zależne od sposobu ułożenia kabli elektroenergetycznych /ułożenie w trójkąt lub ułożenie poziome/, liczby torów i wzajemnych odległości poszczególnych torów kablowych linii elektroenergetycznych, zastosowanego systemu przepleceń kabli elektroenergetycznych. Dla obliczeniowego wyznaczenia tych zależności niezbędne jest stosowanie metod numerycznych.

Szczegółowa analiza wykonana dla kabli 275 kV [22] wykazała, że:

- przy trójkątowym ułożeniu kabli 275 kV nie występują prądy w powłokach kabli ani w ziemi w przypadku linii jednotorowych, natomiast w przypadku linii dwutorowych /dwa systemy trójkablowych linii 275 kV/ wartości prądów w powłokach są większe przy jednakowej kolejności faz, a mniejsze przy odwrotnej kolejności faz poszczególnych torów, podczas gdy dla prądów w ziemi zachodzi odwrotna zależność /np. przy odległości pomiędzy torami 0,5 m i zgodnej kolejności faz prąd w powłokach wynosił 4 A i w ziemi 0,18 A, a przy odwrotnej kolejności faz odpowiednio 0,42 A oraz 2,55 A/, oznacza to, że dążenie do zmniejszenia strat mocy w powłokach /małe prądy w powłokach/ będzie niekorzystnie wpływało na sem indukowane /duże prądy przepływające przez ziemię/;
- przewodność ziemi nie ma praktycznego wpływu na prądy przepływające przez powłoki kabli;
- w zakresie częstotliwości od 50 do 800 Hz następuje wzrost wartości prądów w powłokach kabli nie przekraczający jednak 25% prądu 50 Hz,
- ułożenie kabli elektroenergetycznych poziome jest mniej korzystne od trójkątowego, np. w przypadku linii jednotorowych następuje wzrost: prądu w powłokach od 0,0007 A do 0,87 A, prądu w ziemi od 0,002 do 2,6 A oraz sem indukowanych 50 Hz od 1,61 do 4,4 V lub od 0,15 do 1,5 V /w zależności od usytuowania linii telekomunikacyjnej/;
- zastosowanie odpowiedniego systemu przepleceń linii elektroenergetycznych powoduje znaczne ograniczenie napięć indukowanych /np. zmniejszenie prądu w powłokach z 0,42 do 0,006 A, prądu w ziemi z 2,55 do 0,034 A, sem indukowanych 50 Hz z 2,21 do 0,43 V lub z 1,49 do 0,02 V/;

- sem pomierzone zawierają się w granicach od 0,47 do 1,51 wartości obliczonych.

Badania wykazały przydatność stosowania metod obliczeniowych dla oceny napięć indukowanych, możliwość ograniczenia napięć indukowanych przez odpowiednie zaprojektowanie kablowych linii elektroenergetycznych (układ poszczególnych kabli, kolejność faz linii wielotorowych, odstępy pomiędzy poszczególnymi torami, stosowanie przepleceń) oraz istotny wpływ redukcji - ny różnych mas metalowych umieszczonych w ziemi.

Podobne badania wykonane dla warunków zwarciowych, przy jednofazowych zwarciach doziemnych [12] doprowadziły do układu zastępczego złożonego z przewodu linii oddziaływującej /elektroenergetycznej/,  $n-1$  przewodów linii /telekomunikacyjnej/ narażonej na oddziaływanie oraz  $m$  przewodów ekranujących /różne inne przewody i masy metalowe w ziemi/. Przy założeniu, że przewody ekranujące są uziemione jedynie na końcach odcinków zblżenia, ułożono  $(n+m)$  równań włączających sem oraz prądy w poszczególnych obwodach i wykonano obliczenia dla dwutorowej linii kablowej 132 kV /wszystkie kable ułożone poziomo w odległości 180 m/, oddziaływującej na kable sterownicze ułożone pomiędzy środkową i skrajną fazą każdego toru. Długość odcinka zblżenia wynosiła 21,4 km, a prąd oddziaływujący 200 A; przy takim samym prądzie wykonano pomiary sprawdzające.

Z przeprowadzonych badań i pomiarów wynikają następujące wnioski:

- prądy przepływające przez powłoki kabli elektroenergetycznych stanowiły ok. 95% /wartość pomierzona/ i ok. 99,5% /wartość obliczona/ prądu zwarciowego oddziaływującego, podczas gdy przepływające przez ziemię stanowiły odpowiednio 4,8% oraz 2,5% /suma prądów nie stanowi algebraicznie 100% wobec znacznych przesunień fazowych i konieczności sumowania geometrycznego/;
- wartości pomierzone i obliczone sem indukowanych na 1 A prądu oddziaływującego i na 1 km odcinka zblżenia różnią się nieznacznie, co ilustruje tablica 7, w której uwidoczniono również wpływ ekranujący uziemionych obustronnie żył kabla sterowniczego; wartości obliczone są przeciętnie wyższe o 13% - wynika to z nieuwzględnienia wpływu uziemień przewodów ekranujących i powłok kabli wzdłuż odcinka zblżenia /założono, że przewody ekranujące i powłoki są uziemione jedynie na końcach/;

T a b l i c a 7

Pomierzone i obliczone sem indukowane w kablach telekomunikacyjnych na skutek oddziaływania kabla 132 kV

Liczba uziemionych par żył kabla telekomunikacyjnego	Napięcie Indukowane w kablu telekom., w V/A·km			
	kabel telekom. między fazami linii 132 kV		kabel telekom. na zewnątrz linii 132 kV	
	pomiar	oblicz.	pomiar	oblicz.
0	0,022	0,025	0,005	0,005
8	0,021	0,024	0,005	0,005
16	0,020	0,023	0,005	0,005
24	0,019	0,021	0,005	0,004

- lepsze efekty dodatkowego ekranowania uzyskuje się, jeżeli powłoki kabli sterowniczych są wykonane z ołowiu, bowiem przy stosowaniu powłok aluminiowych rezystancja powłoki kabla jest mniejsza i tym samym rezystancja wypadkowa w mniejszym stopniu zależy od równoległej rezystancji żył kabla co ilustrują rys. 4 oraz 5;
- wytrzymałość elektryczna izolacji polietylenowej kabla telekomunikacyjnego od czasu przyłożenia napięcia może być wyznaczana z zależności:

$$\lg U_W = a - 0,104 \lg t \quad /10/$$

przy czym:

$U_W$  - napięcie 50 Hz przebicia izolacji w czasie  $t$ , w kV,

$a$  - współczynnik zależny od grubości izolacji polietylenowej,

$t$  - czas przyłożenia napięcia, w godzinach.

Wartość współczynnika  $a$  wynosi ok. 1,2 przy grubości izolacji 0,04" /0,102 mm/ oraz ok. 1,48 przy grubości izolacji 0,1" /0,254 mm/; w tabl. 8 podano przykładowo napięcia przebicia dla kabla o izolacji polietylenowej dla czasów  $t = 1$  min oraz  $t = 0,4$  s oraz napięcie wytrzymywane dla tych czasów /napięcie wytrzymywane dla czasu 1 min jest napięciem probierczym izolacji/ - pomiędzy napięciem przebicia a napięciem wytrzymywanym założono współczynnik bezpieczeństwa równy 3;



T a b l i c a 8

Napięcia przebicia i wytrzymałość elektryczna kabli telekomunikacyjnych o izolacji polietylenowej

Rodzaj izolacji	Napięcie przebicia w kV		Napięcie wytrzymywane w kV	
	1 min	0,4 s	1 min	0,4 s
Powłoka polietylenowa 0,1'' /0,254 mm/	44,5	77,0	14,9	25,7
Żyła-powłoka 0,13'' /0,33 mm/	49,7	85,0	16,6	28,3
Żyła-żyła 0,06'' /0,152 mm/	36,0	63,0	12,0	21,0

- stwierdzono, że zagadnienie stanowi jedynie zapewnienie ciągłości transmisji sygnałów sterowniczych w czasie zwarć, natomiast izolacja stosowanych obecnie kabli sterowniczych jest wystarczająca, nawet jeżeli uwzględni się wzrost prądów zwarciowych związany z rozwojem układu przesyłowego.

Wyniki obliczeń oddziaływań przez sprzężenia magnetyczne są wykorzystywane do oceny stopnia zagrożenia obsługi i urządzeń telekomunikacyjnych. Przykładem próby takiej oceny jest praca [17] poświęcona obliczeniom prawdopodobieństwa uszkodzeń kabli telekomunikacyjnych dalekosieżnych narażonych na oddziaływanie linii elektroenergetycznych 130; 220 i 380 kV we Włoszech. Prawdopodobieństwo uszkodzenia kabla można obliczyć z zależności

$$p_u = p_z \frac{l_{SE}}{l_{ST}} n_e f_T f_U f_L \quad /11/$$

w której:

- $p_u$  - prawdopodobieństwo uszkodzenia kabla wyrażone jako prawdopodobieństwo powstania 1 uszkodzenia w roku na 100 km długości kabla,
- $p_z$  - liczba zwarć w linii elektroenergetycznej na 100 km i 1 rok,
- $l_{SE}$  - średnia długość linii elektroenergetycznej, oddziaływującej, km,
- $l_{ST}$  - średnia długość linii telekomunikacyjnej kablowej, narażonej na oddziaływanie, km,

- $n_E$  - średnia liczba linii elektroenergetycznych mogących oddziaływać na jedną linię telekomunikacyjną,
- $f_T$  - względna długość linii telekomunikacyjnych narażonych na oddziaływanie /stosunek długości linii narażonych na oddziaływanie do całkowitej długości linii w rozpatrywanej sieci/,
- $f_U$  - względna liczba przypadków, w których może zostać przekroczona wartość dopuszczalna oddziaływań /sem indukowana lub napięcie żyła-powłoka/,
- $f_I$  - względny czas, w którym wartość prądu oddziaływującego jest równa lub większa od granicznego prądu mogącego powodować powstanie zagrożenia,
- $f_L$  - względna, średnia długość odcinka linii elektroenergetycznej, w obrębie którego zwarcia są związane z przepływem prądu, mogącego powodować powstanie zagrożenia /stosunek długości wymienionego odcinka do całkowitej długości linii elektroenergetycznej oddziaływującej/.

Oceniono również prawdopodobieństwo zagrożenia obsługi urządzeń

$$p_o = p_u f_N f_o n_o \quad /12/$$

przy czym:

- $p_o$  - prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożenia obsługi - na 100 km kabla telekomunikacyjnego i rok,
- $p_u$  - określone zależnością /11/,
- $f_N$  - względna długość odcinków linii telekomunikacyjnej, na których w wyniku oddziaływania powstają napięcia, mogące powodować zagrożenie dla personelu /stosunek długości wymienionych odcinków do całkowitej długości linii telekomunikacyjnej/,
- $f_o$  - względny czas pracy obsługi w ciągu roku,
- $n_o$  - przeciętna liczba osób wykonujących prace z dotykaniem urządzeń telekomunikacyjnych w ciągu roku.

W pracy [17] obliczono prawdopodobieństwo uszkodzeń linii telekomunikacyjnych kablowych dalekosiężnych, zbudowanych z kabli współosiowych trzech typów: 2,6/9,5 mm; 1,2/4,4 mm oraz 0,65/2,8 mm, o łącznej długości 9726 km, narażonych na oddziaływanie linii 130, 220 oraz 380 kV o

długości 29013 km. Przy ocenie prawdopodobieństwa uszkodzeń podstawową trudność stanowiła potrzeba wyznaczenia spodziewanych współczynników redukcyjnych kabli telekomunikacyjnych oraz innych przewodów i mas metalowych umieszczonych w ziemi. Wszystkie rozpatrywane kable były kablami z powłoką aluminiową i ochronną osłoną antykorozyjną, polietylenową. Powłoka aluminiowa kabli jest uziemiana na końcach kabli oraz przy stacjach wzmacniakowych. W tym przypadku współczynnik redukcyjny jest mniejszy od współczynników dla kabli bez osłon antykorozyjnych i zależy od bliżej niesprecyzowanej liczby uziemień dodatkowych. Brak znajomości dokładnej wartości współczynnika redukcyjnego może być przyczyną znacznych błędów obliczeń. Drugim błędem może być całkowite pominięcie redukcyjnego działania innych mas metalowych ułożonych w ziemi /brak danych na temat rozmieszczenia tych mas wzdłuż trasy kabli/. Z tych względów wyniki obliczeń przedstawione w tabelicy 9 mogą być traktowane jako przybliżone, orientacyjne dane, określające rząd wielkości szukanego prawdopodobieństwa. Z tabelicy 9 wynika duża zależność prawdopodobieństwa uszkodzeń od przyję-

T a b l i c a 9

Prawdopodobieństwo uszkodzeń kabli telekomunikacyjnych na skutek oddziaływań elektromagnetycznych linii 132-380 kV

Typ kabla współosiowego	Średni współczynnik redukcyjny bez osłony antykorozyjnej	Prawdopodobieństwo uszkodzenia przy		Czas między kolejnymi uszkodzeniami, lat przy	
		$E_{dop} = 1500 \text{ V}$	$U_{dop} = 2000 \text{ V}$	$E_{dop} = 1500 \text{ V}$	$U_{dop} = 2000 \text{ V}$
2,6/9,5 mm	0,173	0,035	0,0013	28,5	757
1,2/4,4 mm	0,309	0,16	0,0097	6,2	103
0,65/2,8 mm	0,281	0,38	0,023	2,6	43

tego kryterium zagrożenia - jako kryterium takie przyjęto dopuszczalną wartość sem indukowanej równą 1200 V wg zaleceń CCITT [4] lub dopuszczalne napięcie żyta-powłoka równe 2000 V wg przepisów włoskich.

### 3.2. Oddziaływania przez sprzężenia galwaniczne

W zakresie oddziaływań urządzeń elektroenergetycznych przez sprzężenia galwaniczne zostały opracowane nowe, szczegółowe metody wyznaczania prądów i napięć w liniach telekomunikacyjnych wprowadzanych na teren stacji [20] lub układanych w ziemi w sąsiedztwie uziomów stacji lub słupów linii elektroenergetycznych [21]. Metody obliczeniowe podane w wytycznych pozwalają na dokładne wyznaczenie współczynników redukcyjnych kabli narażonych na oddziaływanie, z uwzględnieniem właściwości impedancyjnych oraz sposobu uziemienia powłok i opancerzenia tych kabli. Zastosowanie metody wymaga użycia maszyn cyfrowych.

Na podstawie wyników obliczeń wykonywanych z wykorzystaniem dokładnych metod obliczeniowych uzyskuje się uogólnione dane dotyczące możliwego zasięgu oddziaływań galwanicznych. Przykładowo na rys. 6 i 7 [5], [9] zamieszczono krzywe pozwalające na wyznaczenie stosunku napięcia powłoki kabla  $U_p$  do napięcia występującego na uziomie słupa linii  $U_{us}$  i stosunku potencjału ziemi  $U_x$  do napięcia uziomu stacji  $U_u$  w funkcji odległości od uziomów. Krzywe przedstawione na rysunku 7 sporządzono na podstawie danych statystycznych z pomiarów wykonanych dla 80 stacji 220 i 380 kV. Znajomość przebiegu krzywych  $U_p/U_{us}$  oraz  $U_x/U_u$  dla typowych uziomów urządzeń elektroenergetycznych umożliwia ograniczenie wykonywania obliczeń do przypadków rzeczywiście istotnych.

Szczególnie duże znaczenie przypisywano w ostatnich latach rozwiązaniu skutecznych metod ochrony kabli telekomunikacyjnych wprowadzonych na teren elektrowni i stacji elektroenergetycznych. Jest to związane ze znacznym wzrostem poziomu mocy zwarciovych na szynach stacji. Rozpatruje się zwykle trzy kryteria zagrożenia [3]: a/ zagrożenie personelu wykonującego prace montażowe i konserwacyjne oraz obsługującego urządzenia, b/ zagrożenie urządzeń oraz c/ zagrożenie wynikające z przerwy lub ograniczenia działania różnych łączy. Dla ochrony obsługi stosuje się indywidualne środki, takie jak gumowe rękawice, gumowe chodniki izolujące, próbniki napięcia itp. Dla ochrony urządzeń przed uszkodzeniami, poza doбором kabli o odpowiedniej wytrzymałości izolacji, stosuje się najczęściej transformatory neutralizujące lub izolujące. Z punktu widzenia pewności pracy obwodów rozróżnia się trzy klasy: I - obwody, które powinny zapewniać ciągłość przesyłu informacji, sygnałów lub tp., nawet podczas przepływu prądów zwarciovych - o niezawodności działania 99,99%, II - obwody, które w cza-

się zwarcia mogą przerwać normalną pracę, jednak po zwarceniu powinny powrócić do normalnego stanu i działania bez interwencji obsługi - o niezawodności działania 99,95% oraz III - obwody, które dla przywrócenia normalnej pracy po zwarceniu mogą wymagać działania obsługi - o niezawodności działania 99,92%. Spełnienie wymagań stawianych obwodom I klasy może być związane z koniecznością stosowania szczególnie pewnej ochrony na całej długości łącza /transformatory ochronne, specjalne kable itp./.

Przy doborze konstrukcji transformatorów neutralizujących uwzględnia się charakter przebiegu prądu zwarciovego w czasie  $t/T$  lub przebieg napięcia uziomu  $v/t$  [1], [6].

$$v/t = R_u i/t = \sqrt{2} I_p R_u \left[ \sin/\omega t + \alpha - \theta / - \sin/\alpha - \theta / e^{-\frac{t}{T}} \right] \quad /13/$$

przy czym:

$I_p$  - składowa okresowa początkowa prądu zwarciovego przy jednofazowym zwarciu doziemnym,

$R_u$  - rezystancja uziomu,

$\omega$  -  $2\pi f$  - pulsacja prądu,

$\alpha$  - kąt, przy którym nastąpiło zwarcie,

$\theta$  - kąt zależny od charakteru impedancji obwodu zwarciovego,  $\tan \theta = \frac{X}{R}$ ,

$t$  - czas,

$T = \frac{L}{R} = \frac{X}{\omega R}$  - stała czasu obwodu zwarciovego,

$R$  - rezystancja obwodu zwarciovego,

$X$  - reaktancja obwodu zwarciovego.

Największa chwilowa wartość prądu zwarciovego i napięcia uziomu pojawi się wówczas, gdy zwarcie nastąpi przy kącie  $\alpha = \theta + \frac{\pi}{2}$ , wtedy

$$v/t = \sqrt{2} I_p R_u \left[ \sin/\omega t + \frac{\pi}{2} / - e^{-\frac{t}{T}} \right] \quad /14/$$

Zakładając, że transformator neutralizujący musi przenieść na stronę wtórną napięcie występujące na uziemiu, równe jednocześnie napięciu uzwojenia pierwotnego tego transformatora bez zniekształceń, jego rdzeń nie może ulec nasyceniu przy strumieniu

$$\phi = \frac{\sqrt{2} I R U}{\omega} / 1 + \frac{X}{R} / \quad /15/$$

Stosunek  $\frac{X}{R}$  obwodu zwarciowego decyduje o wartości składowej stałej /aperiodycznej/ prądu zwarciowego, przy dużych wartościach  $\frac{X}{R}$  możliwe jest podmagnesowanie rdzenia prądem stałym i tym samym konieczne staje się stosowanie transformatorów neutralizujących z rdzeniami o dużych wymiarach. Według danych z pomiarów prądów zwarciowych przy jednofazowych zwarciach doziemnych wykonanych w kraju wynika, że stosunek  $\frac{X}{R}$  nie przekracza na ogół 3, podobne dane przyjmuje się przy projektowaniu transformatorów neutralizujących w różnych krajach europejskich  $\frac{X}{R}$  w granicach od 1 do 3/. Przy takich wartościach  $\frac{X}{R}$ , można praktycznie nie uwzględniać nasycenia powodowanego składową stałą prądu zwarciowego. Według danych charakterystycznych dla sieci najwyższych napięć w Ameryce Północnej [1] stosunek  $\frac{X}{R}$  może osiągać w skrajnych przypadkach wartość 40. Wymagałoby to stosowania szczególnie drogiej i dużych transformatorów neutralizujących. Badania wykonane w czterech stacjach 230 kV wykazały jednak, że nie wystąpił praktycznie ani jeden przypadek nasycenia transformatorów neutralizujących. W skrajnym przypadku zarejestrowano napięcie wynoszące 60% spodziewanej szczytowej wartości napięcia uzłomów stacji, w większości przypadków napięcie występujące podczas zwarć zawierało się w granicach 10...30% wartości szczytowej. W tej sytuacji przyjęto w normalnych warunkach zasadę doboru transformatorów neutralizujących do składowej symetrycznej napięcia  $v/t/$  stosując współczynnik zapasu w granicach 1...2. Najgorsze warunki pracy, zgodnie z zależnościami /14/ i /15/ uwzględnia się jedynie dla zabezpieczenia obwodów I klasy. Stosuje się dwie metody projektowania ochrony: a/ indywidualne projektowanie transformatorów neutralizujących dla konkretnych warunków, występujących w rozpatrywanej stacji lub elektrowni; b/ projektowanie ochrony z wykorzystaniem standardowych transformatorów neutralizujących o napięciach 1,5; 2,5; 4,0; 4,5 oraz 9 kV i napięciu resztkowym 150 V. Podkreśla się przy tym zaletę metody projektowania indywidualnego, która pozwala na uzyskanie lepszych efektów technicznych i ekonomicznych.

Podstawowymi parametrami transformatorów neutralizujących są:

- napięcie znamionowe, tj. napięcie, przy którym uzyskuje się maksymalne napięcie resztkowe, przy danym rozwiązaniu konstrukcyjnym /napięcia znamionowe są w Ameryce Północnej stopniowane co 1500 V/,

- prąd wzbudzenia - prąd ten nie powinien przekraczać 4 A przy napięciu resztkowym 150 V,
- tłumienność w zakresie 300...4000 Hz - 0,5 dB,
- impedancja charakterystyczna: 600...900  $\Omega$ ,
- napięcia próbiercze izolacji: napięcie próbiercze prądu stałego przy próbie izolacji pomiędzy uzwojeniem pierwotnym i wtórnym oraz wszystkich uzwojeń względem ziemi powinno być równe początkowej wartości napięcia znamionowego, napięcie próbiercze udarowe powinno być równe 125% napięcia udarowego zapłonu odgromników gazowanych wchodzących w skład ochrony.

Transformatory izolacyjne różnią się od zwykłych transformatorów liniowych stosowanych w liniach telekomunikacyjnych dużą wytrzymałością izolacji w połączeniu z małą tłumiennością sygnałów w całym rozpatrywanym pasmie częstotliwości. Minimalne napięcie przemienne wytrzymywane wynosi 10 kV a udarowe 35 kV, przy czym w Ameryce, Północnej wymaga się, aby uzwojenia miały taką samą wytrzymałość do ziemi /w Europie wymagana jest duża wytrzymałość doziemna tylko jednego uzwojenia/ [1].

Transformatory izolacyjne stosowane w obwodach telefonicznych powinny posiadać następujące parametry /poza wymienionymi wyżej minimalnymi napięciami wytrzymywanymi/:

- szerokość pasma przenoszonego od 3 do 10 MHz, przy tłumienności 0,5 dB od 3 kHz do 3 MHz oraz 2 dB przy 10 MHz,
- uzwojenie pierwotne powinno być przystosowane do wykorzystania jako dławik poprzeczny z uziemionym środkiem uzwojenia, przy prądzie długotrwałym 0,5 A,
- napięcie wytrzymywane udarowe powinno być nie mniejsze niż 120% udarowego napięcia zapłonu odgromników,
- impedancje obu uzwojeń powinny być dopasowane do impedancji torów przyłączonych do tych uzwojeń.

#### 4. ZAKOŃCZENIE

Z przedstawionego przeglądu ostatnio wykonanych prac w dziedzinie oddziaływań wynikają zasadnicze kierunki badań, które należałoby przeprowadzić, aby wprowadzić w praktyce krajowej nowe zasady wyznaczania oddzia-

tywań i nowe zasady ochrony obwodów telekomunikacyjnych. Do badań tych można w szczególności zaliczyć:

- badania sprawdzające wartości telefonicznych współczynników kształtu krzywej napięcia i prądu dla sieci 110-400 kV, ze szczególnym uwzględnieniem linii zasilających odbiorniki o dużym poborze harmonicznych prądu /urządzenia prostownikowe i tyrystorowe/,
- analizę zależności służących do obliczania oddziaływań zakłócających linii elektroenergetycznych i ustalenie zasad postępowania przy doborze ochrony linii telekomunikacyjnych od takich oddziaływań,
- analizę możliwości uwzględnienia dodatkowych czynników przy wyznaczeniu oddziaływań niebezpiecznych przez sprzężenia magnetyczne, w szczególności: metod wyznaczania napięć pomiędzy przewodami linii a ziemią, możliwości uwzględniania dodatkowych współczynników redukcyjnych wnoszonych przez przewody linii po zaoplonie odgromników, rzeczywistych wartości współczynników redukcyjnych kabli z izolacją polietylenową i z ochronnymi powłokami antykorozyjnymi w zależności od sposobu uziemienia powłok tych kabli,
- analizę istniejących numerycznych metod obliczeniowych, ustalenie zakresu ich stosowalności oraz wykonanie obliczeń i sprecyzowanie warunków, w których można rezygnować z wyznaczania oddziaływań /np. podanie stref, poza którymi można nie brać pod uwagę oddziaływań przez sprzężenia galwaniczne/,
- prace zmierzające do rozszerzenia asortymentu posiadanych urządzeń ochronnych, zwłaszcza zaś środków ochrony przed oddziaływaniami przez sprzężenia galwaniczne,
- badania oddziaływań zakłócających i niebezpiecznych linii kablowych 110 kV i wyższych napięć na kable telekomunikacyjne i ustalenie zasad ochrony przed tymi oddziaływaniami.

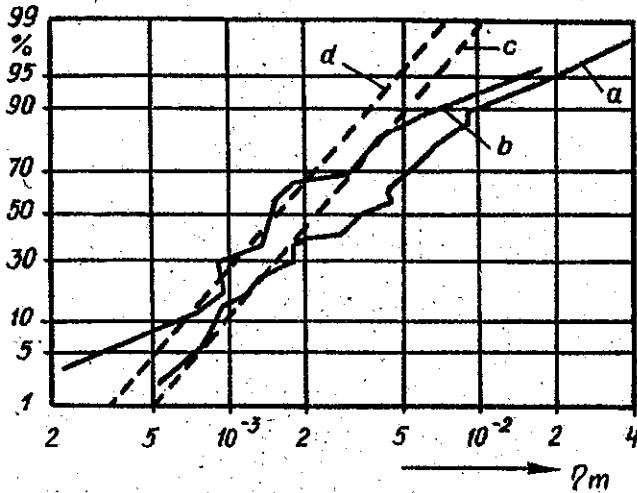


## WYKAZ LITERATURY

1. Allen G.Y.R. i inni: Design Considerations for Wireline Inductive Protection Devices, ref. 36-06 CIGRE, 1978.
2. Allowed Harmonic Content, SEF Thyristor Committee Report, 1974.
3. Atyeo G.L.: Use of Bell Canada Facilities to Meet Power System Communication and Protection Needs. Referat 36-77/SC/60 na kolokwium Komitetu Studiów Nr 36, 1977.
4. Directives concerning the protection of telecommunication lines against harmful effects from electricity lines. CCITT, Genewa 1963.
5. Feist K.H.: Zone of Influence of Earth Potential Rise. Electra 1978, nr 60.
6. Irvine R.G., Burrige G.E.: Design Consideration for the Protection of Wire Line Facilities Serving Electric Power Stations. Referat 36-77/SC/61 na kolokwium Komitetu Studiów Nr 36, 1977.
7. Iugen M.: Die Ausnutzungsmöglichkeiten des Larza. Elektrizitätswirtschaft 1976, nr 19.
8. Kaljužnyj W.F.: Raščet razmeščenijsa zaščitnyh ustrojstv v protiažennyh sistiemach pri električeskom i magnitnom vlijanii linii elektroperedači, Električestvo 1978, Nr 7.
9. Kohlmeier A.: Earth Potential Rise in the Vicinity of Power Stations and Substations. Materiały robocze Grupy Roboczej 2, Komitetu Studiów 36 CIGRE, 36-74/WG02/61 IWD, 1974.
10. Kowalski M., Piłatowicz A.: Oddziaływanie zakłócające linii elektroenergetycznych 400 kV. Informator Projektanta łączności 1979 nr 1.
11. Kuussaari M., Pesonen A.J.: Measured Power - Line Harmonic Currents and Induced Telephone Noise Interference with Special Reference to Statistical Approach, Referat CIGRE 1976, 36-05.
12. Medhurst P.J.: Induced Voltages in Communication Cables due to Fault Currents in Power Cables. Electrical Eng. Trans. 1977, s. 38.
13. Miyazaki K., Hashimoto E., Inoue Y.: Electromagnetic Induction in Communication Lines Laid Along Bridges and Shielding Effects of Bridges. IEEE Transaction on P.A.S., 1979, nr 1.

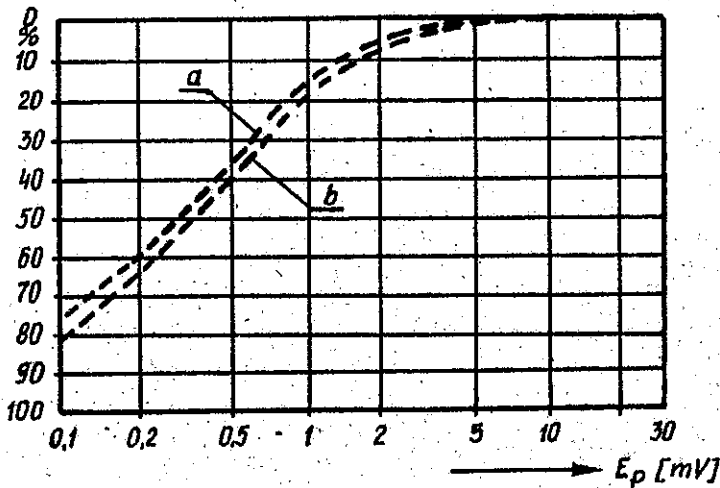
14. Persson P.O.: Harmoniques dans les lignes electriques, dokument CCITT, Com. V-No 11-F, 1977.
15. Report on the Meeting of Study Group V. Grupa Studiów V CCITT /Geneva, 6-10 March 1978/.
16. Ross N.G.: Progress Report on the Examination of the Existing Permissible Induced Voltage Limits and Possible Amendments to the "Directives", CCITT Study Group V - Contribution No 16, 1977.
17. Solbiati G.L.: Probability of Damage to the Telecommunication Underground Cables and of Danger to Personnel Working on Them due to the Electromagnetic Inductions Caused by Power Lines. Part I and II. Materiały robocze Grupy Roboczej 2, Komitetu Studiów 36 CIGRE, 36-77 /WG02/01 I 02E IWD, 1977.
18. Supplies to Converter Equipment. Harmonic Distortion and Permissible Pulse Number of Consumers' Rectifiers and Inverters - The Electricity Council. Materiały Robocze CIGRE SC-36-02/101E.
19. Sympozjum n/t szkodliwego oddziaływania linii i urządzeń elektroenergetycznych na sieci telekomunikacyjne. SEP, Koło przy Biurze Studiów i Projektów Łączności. Warszawa, czerwiec 1977.
20. Szukalski H.: Wytyczne techniczne projektowania zabezpieczeń kabli telekomunikacyjnych wprowadzanych do stacji elektroenergetycznych o dużych prądach zwarcia doziemnego. "Energoprojekt", Poznań 1972.
21. Szukalski H.: Wytyczne techniczne projektowania zabezpieczeń kabli telekomunikacyjnych układanych w pobliżu uziomów stacji i słupów linii elektroenergetycznych. "Energoprojekt", Poznań 1975.
22. Tanaka N.: Analysis and Measurement of Electro-magnetic Induction from Underground Transmission Power Cable to Adjacent Telecommunication Cable, 1971. Materiały robocze Grupy Roboczej 2, Komitetu Studiów 36 CIGRE, W.G.2/24E.
23. Widl E.: Neue Wege zur Berechnung der Geräuschspannungen, die von Starkstromleitungen in Fernsprechkabeln induziert werden. Teil I und 2. Der Fernmelde-Ingenieur 1974, nr 10 i 11.
24. Wytyczne o ochronie linii i urządzeń telekomunikacyjnych przed szkodliwym oddziaływaniem linii elektroenergetycznych i trakcji elektrycznej prądu stałego. It Warszawa 1974.

25. Wytyczne zabezpieczenia linii i urządzeń telekomunikacyjnych przed szkodliwym oddziaływaniem linii i urządzeń elektroenergetycznych.  
Ministerstwo łączności, Warszawa 1966.



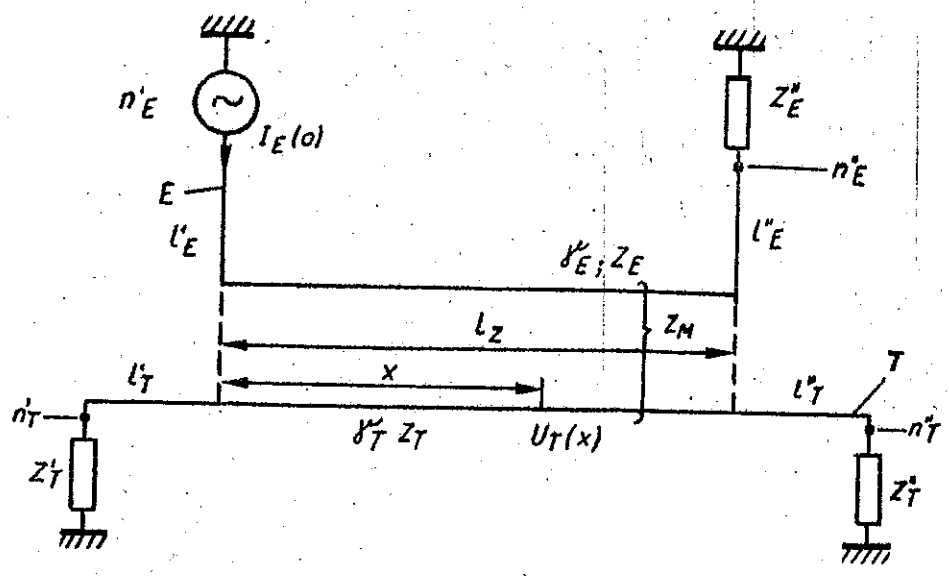
Rys. 1. Współczynniki podatności napowietrznych linii telekomunikacyjnych na zakłócenia

a - wyniki pomiarów wykonanych na skutek reklamacji, b - wyniki pomiarów dla linii wybranych losowo, c - rozkład statystyczny dla linii abonenckich, d - rozkład statystyczny dla linii między centralami

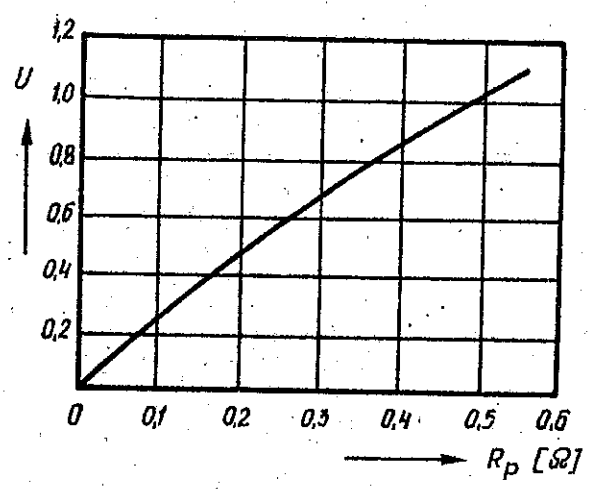


Rys. 2. Procentowa liczba linii telekomunikacyjnych dla których jest przekroczona wartość dopuszczalna  $E_p = 1$  mV

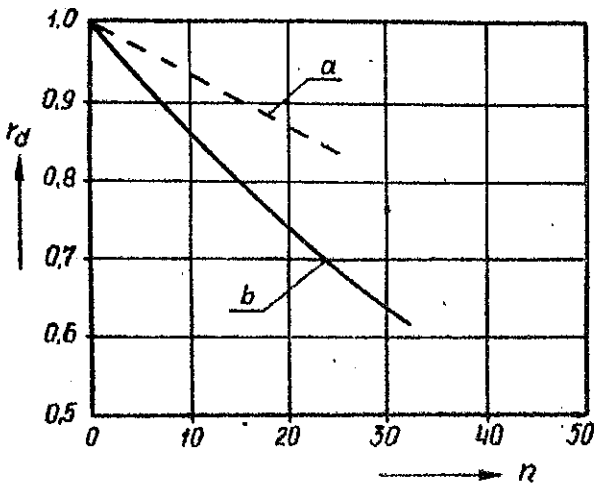
a - linie łączące centrale telefoniczne, b - linie abonenckie



Rys. 3. Schemat zblizenia linii telekomunikacyjnej i elektroenergetycznej

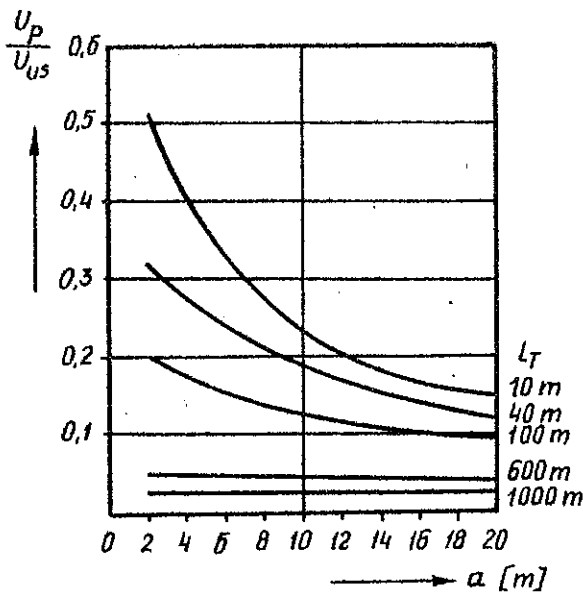


Rys. 4. Względne napięcie indukowane  $U/U$  w funkcji rezystancji pętli kabla  $R_p$

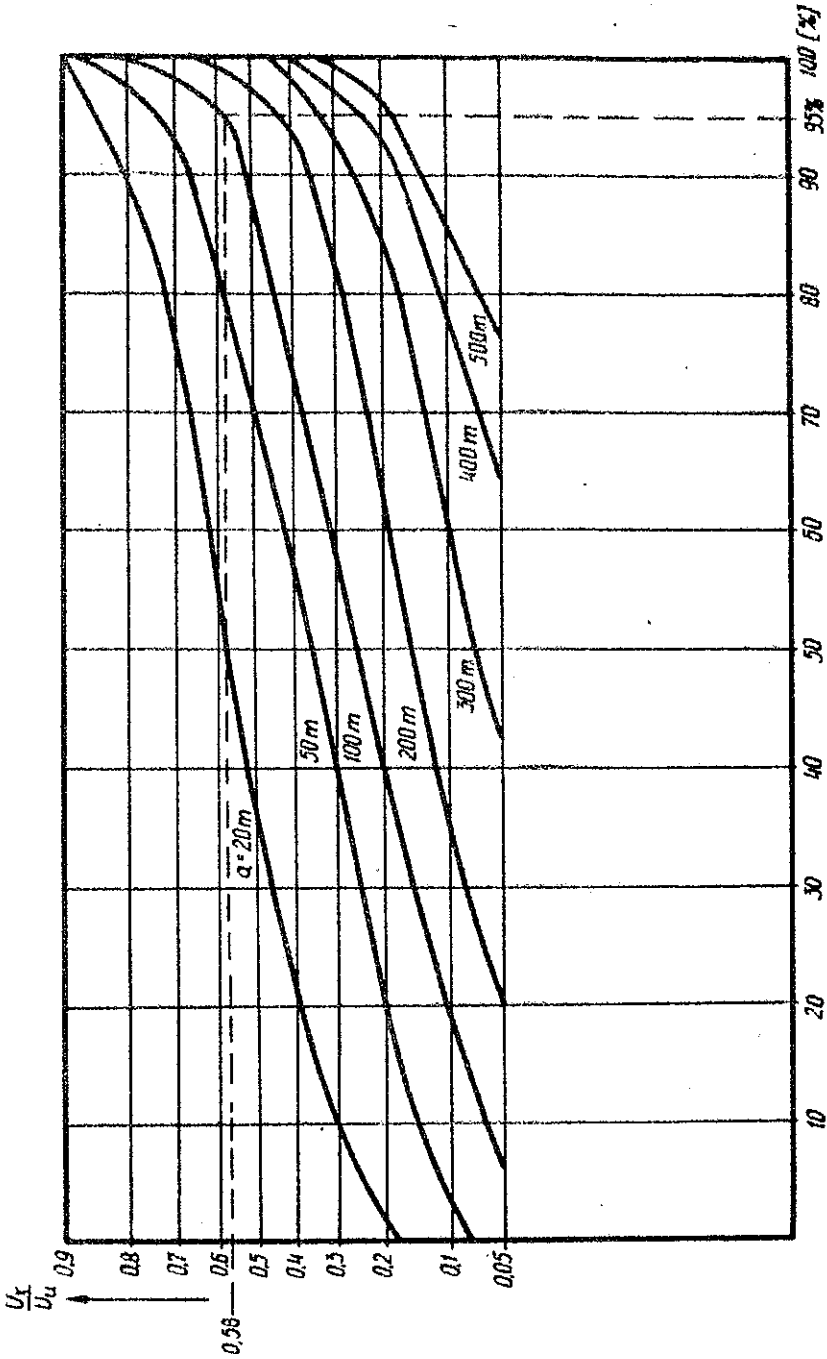


Rys. 5. Dodatkowy współczynnik redukcji  $r_d$  w funkcji liczby uziemionych par żył kabla telekomunikacyjnego  $n$

a - kable z powłoką aluminiową, b - kable z powłoką ołowianą



Rys. 6. Zależność stosunku napięć  $U_p/U_{us}$  od długości kabla telekomunikacyjnego  $l_T$  i odległości kabla od uziomu słupa linii energetycznej  $a$



Rys. 7. Stosunek napięć  $U_x/U_u$  w funkcji odległości od uziomu stacji elektroenergetycznej a oraz procentu rozpatrywanych przypadków /np. dla odległości  $a = 100$  m. można stwierdzić, że w 95% przypadków stosunek

$U_x/U_u$  nie przekroczy 0,58/

