

MINISTERSTWO ŁĄCZNOŚCI

**PRACE  
INSTYTUTU ŁĄCZNOŚCI**

ROK XI

ZESZYT 3(36)

WARSZAWA 1965

WYDAWNICTWA NAUKOWO - TECHNICZNE

## SPIS TRESCI

1. *Stanisław Ogulewicz* — Szerokopasmowe właściwości wzmacniacza regulowanego równoległe (Analiza układu modulatora sygnału wizyjnego) . . . . . 3
2. *Olimpia Skiba-Rogalska* — Korozja ołowiu w warunkach ochrony katodowej . . . . . 33

## СОДЕРЖАНИЕ

1. *С. Огулевич* — Широкополосные свойства параллельно регулируемого усилителя (Анализ схемы видеомодулятора) . . . . . 3
2. *О. Скиба-Рогальска* — Коррозия свинца в условиях катодной защиты . . . . . 33

## CONTENTS

1. *S. Ogulewicz* — Wide-band performance of the shunt regulated amplifier (Analysis of the video modulator circuit) . . . . . 3
2. *O. Skiba-Rogalska* — Lead cable sheath corrosion under cathodic protection conditions . . . . . 33

## SOMMAIRE

1. *S. Ogulewicz* — Amplificateur à réglage parallèle (Analyse du circuit du modulateur vidéo) . . . . . 3
2. *O. Skiba-Rogalska* — La corrosion des câbles sous plomb en conditions de la protection cathodique . . . . . 33

## INHALTSVERZEICHNIS

1. *S. Ogulewicz* — Breitbandige Eigenschaften des parallelgeregelten Verstärkers (Analyse der Schaltung des Videomodulators) . . . . . 3
2. *O. Skiba-Rogalska* — Die Bleikorrosion bei Kathodischer Schute . . . . . 33

MINISTERSTWO ŁĄCZNOŚCI

PRACE  
INSTYTUTU ŁĄCZNOŚCI

ROK XI

ZESZYT 3(36)

WARSZAWA 1965

WYDAWNICTWA NAUKOWO - TECHNICZNE

K o m i t e t R e d a k c y j n y  
Redaktor naczelny — *prof. mgr inż. Józef Wójcikiewicz †*

Redaktorzy działów:  
*adiunkt inż. Aleksy Brodowski, prof. mgr inż. Sylwester Jarkowski*  
*prof. mgr inż. Lesław Kędzierski*  
Sekretarz Redakcji — *Edward Tomkiel*

A d r e s R e d a k c j i  
Instytut Łączności, Warszawa-Miedzeszyn, ul. Szachowa 1

WSZELKIE PRAWA ZASTRZEŻONE  
*Printed in Poland*

Rysunki dostarczył Komitet Redakcyjny

Redaktor techniczny *I. Milewska*

---

WNT Warszawa 1965. Wydanie 1. Nakład 783 egz. Ark. wyd. 5,6. Ark. druk. 5,99/A  
Format B5. Pap. ilustr. kl. V, 70 g. 70 × 100/16. Maszynopis oddano do skła-  
dania 29. 1. 65. Podpisano do druku 1. 7. 65. Druk ukończono w lipcu 1965. Symbol  
80354/INB. Cena zł 21.—

---

Zakłady Graficzne im. M. Kasprzaka w Poznaniu — Zam. 356/65-M-3

STANISŁAW OGULEWICZ

621.375.1 : 621.397

**SZEROKOPASMOWE WŁAŚCIWOŚCI WZMACNIACZA  
REGULOWANEGO RÓWNOLEGLE****(Analiza układu modulatora sygnału wizyjnego)**

Rękopis dostarczono do Komitetu Redakcyjnego:

1.4.1962 r. (1 redakcja)

1.7.1964 r. (2 redakcja)

Układ regulowanego równoległego wzmacniacza o podstawie katodowej został przeanalizowany z punktu widzenia właściwości przenoszenia szerokopasmowego. Działanie wzmacniacza idealnego (bez uwzględnienia pojemności szkodliwych układu) sprowadzono do schematu zastępczego typowego wzmacniacza lampowego, w którym parametry lampy: współczynnik amplifikacji i oporność wewnętrzna, wyrażone w zależności od stałych układu, mają charakter wielkości rzeczywistych. Dla układów spotykanych w praktyce wzory wyprowadzone na współczynniki układu zastępczego są uzależnione od częstotliwości. Wprowadzono więc pojęcie częstotliwości krytycznej układu, przy której moduł zastępczego współczynnika amplifikacji maleje o 3 dB. Równania opisujące współczynniki układu, wyrażone w zależności od częstotliwości krytycznej, przedstawiono w postaci graficznej jako uniwersalne charakterystyki rozpatrywanego układu wzmacniacza.

Na przykładzie wzmacniacza idealnego został przedyskutowany prosty sposób kompensacji wpływu pojemności obciążającej, a następnie podano również równania dla szczególnego przypadku wzmacniacza kompensowanego, w którym uwzględniono pojemności rozproszone.

W zakończeniu porównano wyniki analizy teoretycznej z wynikami pomiarów układu eksperymentalnego zbudowanego z typowych elementów spotykanych w modulatorach sygnału wizyjnego. Wyniki porównania wskazują na celowość stosowania podanych współczynników przy projektowaniu i ocenie wzmacniaczy rozważanego typu.

**WYKAZ SYMBOLI** $K', K''$  — współczynniki amplifikacji lamp ( $V_1, V_2$ ) $g', g''$  — oporności wewnętrzne lamp ( $V_1, V_2$ ) $U_s$  — wejściowe napięcie siatkowe

- $I, I', I'', I_R, I_c$  — prądy w poszczególnych gałęziach obwodu wzmacniacza  
 $K_z = K_0$  — zastępczy współczynnik amplifikacji układu idealnego lub początkowa wartość zastępczego współczynnika amplifikacji w układzie rzeczywistym  
 $\varrho_z = \varrho_0$  — zastępcza oporność wewnętrzna układu idealnego lub początkowa wartości zastępczej oporności układu rzeczywistego  
 $\hat{K}_z$  — zastępczy współczynnik amplifikacji układu rzeczywistego, symbol ogólny  
 $\hat{\varrho}_z$  — zastępcza oporność wewnętrzna układu rzeczywistego, symbol ogólny  
 $\varrho_\infty$  — zastępcza oporność wewnętrzna układu rzeczywistego przy częstotliwości nieskończenie wielkiej  
 $f_{kr} = \frac{\omega_{kr}}{2\pi}$  — częstotliwość krytyczna układu wzmacniacza  
 $f_{gr} = \frac{\omega_{gr}}{2\pi}$  — częstotliwość graniczna układu ze względu na wzmocnienie napięciowe  
 $k_u$  — wzmocnienie napięciowe układu  
 $R$  — oporność regulacyjna  
 $\hat{Z}$  — oporność zespolona  
 $S_0 = \frac{K_0}{\varrho_0}$  — zastępczy współczynnik nachylenia charakterystyki statycznej układu — wartość początkowa  
 $L$  — indukcyjność korekcyjna  
 $C'$  — pojemności rozproszone występujące pomiędzy anodą lampy V1 a masą układu  
 $C''$  — pojemności rozproszone lub pojemności obciążenia zewnętrznego, występujące pomiędzy katodą lampy V2 a masą układu  
 $\omega', \omega''$  — częstotliwości kątowe charakterystyczne dla układu  
 $A = \frac{\varrho_\infty}{\varrho_0}$  — parametr  
 $\hat{K}_{zk}$  — zastępczy współczynnik amplifikacji układu kompensowanego  
 $\hat{\varrho}_{zk}$  — zastępcza oporność wewnętrzna układu kompensowanego  
 $\gamma = \frac{\omega}{\omega_{kr}}$  — względna częstotliwość kątowa odniesiona do częstotliwości krytycznej układu

## 1. WSTĘP

Wzmacnianie sygnałów wizyjnych do poziomu wymaganego przy modulacji stanowi jeden z trudniejszych problemów techniki urządzeń nadawczych. Warunki pracy modulatora, jakie narzuca wejściowa oporność wzmacniacza wielkiej częstotliwości są w ogólności znane, nie będą więc tutaj szczegółowo omawiane. Wystarczy tu tylko przypomnieć, że napotykanne trudności są związane zarówno ze znaczną susceptancją o charakterze pojemnościowym, występującą na wejściu wzmacniacza modu-

lowanego, jak i nieliniowym charakterem składowej rzeczywistej oporności obciążającej wynikającej z przepływu prądu siatki. Aby wynikające stąd zniekształcenia utrzymać w dopuszczalnych granicach, należy stosować modulatory o małej oporności wyjściowej i dużej wydajności prądowej. Rozwiązania modulatorów oparte na konwencjonalnym układzie oporowego wzmacniacza wizyjnego nie dają z reguły wyników zadowalających, gdyż zasadniczą wadą tych układów jest stosunkowo duży pobór mocy zasilającej obniżający sprawność nadajnika jako całości.

Wyraźny postęp w konstrukcji modulatorów wizyjnych datuje się od chwili zastosowania tzw. układów wzmacniaczy regulowanych, a w szczególności wzmacniaczy regulowanych równolegle (ang. shunt regulated amplifier), obejmujących szereg wariantów układowych.

Praca niniejsza jest poświęcona głównie jednemu z układów podanych w 1951 r. przez *V. J. Coopera* [1], [2], a mianowicie układowi oznaczoneму przez tego autora jako typ 2e. Zainteresowanie tym wzmacniaczem jest spowodowane dwiema przyczynami: wzmacniacz typu 2e cechuje względna prostota schematowa w porównaniu z innymi układami, a jednocześnie wyniki uzyskiwane w praktyce są w większości zastosowań całkowicie zadowalające.

W istniejącej literaturze [1], [2], [3], [4], [5] można znaleźć opis zasady działania i teorii układu uproszczonego, a także sposoby graficznej analizy warunków jego pracy. Porównanie takiego układu (w szczególności ze względu na pobieraną moc zasilającą) ze zwykłym wzmacniaczem oporowym o takiej samej liczbie lamp wypada zdecydowanie na korzyść wzmacniacza regulowanego. Jednak w dotychczasowych rozważaniach nie brano pod uwagę pewnych rzeczywiście występujących pojemności, bez których układ praktyczny nie daje się zrealizować, a które mają poważny wpływ na zachowanie się wzmacniacza pracującego w szerokim pasmie częstotliwości wizyjnych.

Głównym celem przeprowadzonej poniżej analizy jest właśnie ujęcie wpływu tych pojemności. Jak się bowiem okazuje, uwzględnienie ich prowadzi do niezbyt skomplikowanych wzorów, nadających się do praktycznego stosowania. Przeprowadzone rozważania teoretyczne są uzupełnione wynikami badań wykonanych dla potwierdzenia przydatności podanych wzorów.

## 2. UKŁAD ZASTĘPCZY WZMACNIACZA IDEALNEGO

Analiza przebiegów zmiennych zachodzących w układzie wzmacniacza przedstawionym na rys. 1 pozwala utworzyć jego schemat zastępczy, zgodnie z rys. 2. Schemat ten ma postać typowego wzmacniacza lampo-

wego wzbudzanego napięciem  $\hat{U}_s$  i dostarczającego prąd  $\hat{I}$  do zewnętrznego obciążenia  $\hat{Z}$ .

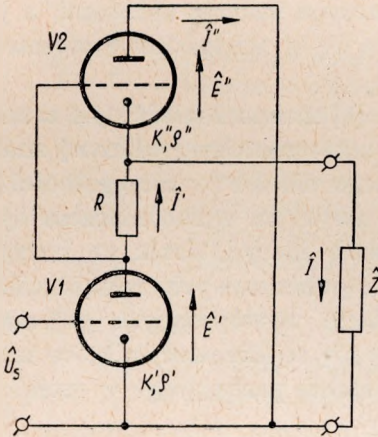
W takim układzie prąd sygnału wzmacniacza jest wyrażony równaniem

$$\hat{I} = -K_z \hat{U}_s \frac{1}{\varrho_z + \hat{Z}}$$

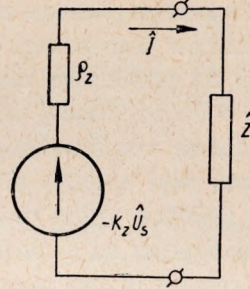
zaś wzmocnienie napięciowe

$$\hat{k}_u = -K_z \frac{1}{1 + \frac{\varrho_z}{\hat{Z}}}$$

Ujemny znak po prawej stronie równania oznacza, jak zwykle, przesunięcie o  $180^\circ$  fazy napięcia wyjściowego względem fazy napięcia wzbudzającego, jeśli oporność obciążająca ma charakter rzeczywisty. W ogólnym przypadku obciążenie  $\hat{Z}$  może być oczywiście dowolną wielkością zespoloną, co uwzględnia symboliczna postać podanych równań.



Rys. 1. Schemat ideowy wzmacniacza idealnego



Rys. 2. Schemat zastępczy wzmacniacza idealnego

Parametry lampy w układzie zastępczym, a mianowicie zastępczy współczynnik amplifikacji  $K_z$  i zastępcza oporność wewnętrzna  $\varrho_z$ , mogą być obliczone na podstawie parametrów  $K'$ ,  $\varrho'$ ,  $K''$ ,  $\varrho''$  lamp układu rzeczywistego oraz wartości oporności  $R$ . W tym celu należy rozwiązać układ równań napisanych dla przebiegów zmiennych zachodzących w sieci podanej na rys. 1:

$$\left. \begin{aligned} \hat{E}' - \hat{I}' \varrho' - \hat{I}' R - \hat{I} \hat{Z} &= 0 \\ \hat{E}'' - \hat{I}'' \varrho'' + \hat{I} \hat{Z} &= 0 \\ \hat{I}' - \hat{I} - \hat{I}'' &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$



gdzie:

$$\bar{E}' = -K' \bar{U}_s; \quad \bar{E}'' = -K'' \bar{I}' R$$

Prąd  $\bar{I}$  płynący przez obciążenie  $\bar{Z}$  jest określony zależnością

$$\bar{I} = -K' \frac{K'' R + \varrho''}{\varrho' + \varrho'' + R(K'' + 1)} \bar{U}_s \frac{1}{\frac{\varrho'(\varrho' + R)}{\varrho' + \varrho'' + R(K'' + 1)} + Z} \quad (2)$$

z której wynika, że poszukiwane wyrażenia na zastępczy współczynnik amplifikacji  $K_z$  i zastępczą oporność wewnętrzną  $\varrho_z$  układu z rys. 2 mają postać:

$$K_z = K' \frac{K'' R + \varrho''}{\varrho' + \varrho'' + R(K'' + 1)}; \quad \varrho_z = \varrho'' \cdot \frac{\varrho' + R}{\varrho' + \varrho'' + R(K'' + 1)} \quad (3a \text{ i } b)$$

Jak wynika z zależności (3) współczynniki  $K_z$  i  $\varrho_z$  są związane zależnością

$$\frac{K_z}{K'} + \frac{\varrho_z}{\varrho''} = 1 \quad (3c)$$

która pozwala w łatwy sposób wyznaczyć wartość jednego z nich przy założonej wartości drugiego.

Przy ustalonym więc typie lamp stosowanych w układzie wzmacniacza istnieje możliwość wpływania na oba współczynniki  $K_z$  i  $\varrho_z$  za pomocą doboru oporności  $R$  wtrąconej pomiędzy anodę lampy wzmacniającej V1 a katodę lampy regulacyjnej V2. Zbadanie obu zależności jest istotne, pozwoli bowiem wyciągnąć praktyczne wnioski co do projektowania układu spełniającego założone wymagania.

### 3. WPŁYW OPORNOŚCI REGULACYJNEJ $R$ NA PARAMETRY UKŁADU ZASTĘPCZEGO

Jak wynika z zależności (3a i b), powiększenie oporności  $R$  wpływa na wzrost zastępczego współczynnika amplifikacji  $K_z$ . Zakres jego zmian może być określony przez podstawienie na  $R$  wartości skrajnych:  $R = 0$  i  $R = \infty$ . Minimalna wartość  $K_z$  dla  $R = 0$  wynosi

$$K_{z \min} = K' \frac{\varrho''}{\varrho' + \varrho''}$$

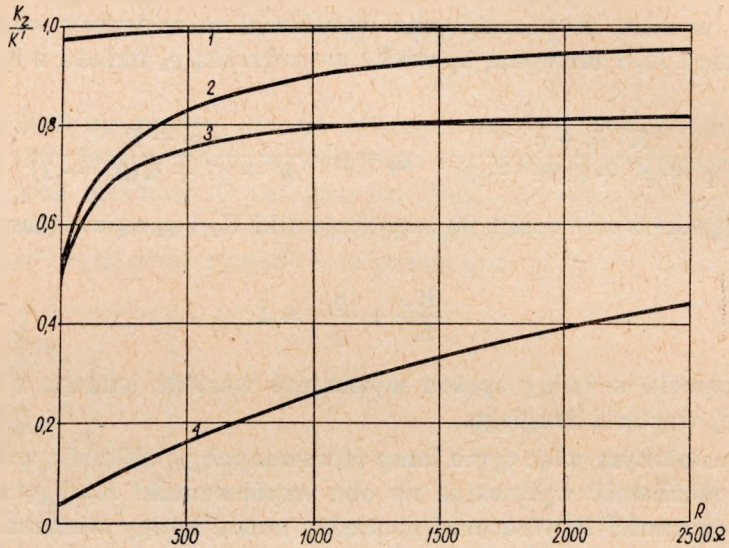
a w przypadku szczególnym, gdy lampy V1 i V2 są tego samego typu, tj. gdy  $\varrho' = \varrho'' = \varrho$  i  $K' = K'' = K$

$$K_{z \min} = \frac{1}{2} K$$

Maksymalna wartość współczynnika  $K_z$  dla  $R = \infty$  wynosi

$$K_{z \max} = K' \frac{K''}{1 + K''}$$

jest więc bliska  $K'$ , jeśli wartość  $K''$  jest odpowiednio większa od jedności, co ma zazwyczaj miejsce w praktyce.



Rys. 3. Wpływ oporności regulacyjnej na zastępczy współczynnik amplifikacji

Krzywe	V1	V2	$\frac{q''}{q' + q''}$	$\frac{K''}{1 + K''}$	$K_{z \min}$	$K_{z \max}$
1	trioda	pent.	0,967	0,995	4,85	4,96
2	pent.	pent.	0,5	0,995	60,0	119
3	trioda	trioda	0,5	0,833	2,5	4,16
4	pent.	trioda	0,033	0,833	4,0	100

Odwrotny przebieg ma zależność  $q_z = f(R)$ , co widać zresztą z równania (3c). Wzrost oporności  $R$  wpływa na zmniejszanie się  $q_z$ , przy czym maksymalna wartość początkowa dla  $R = 0$

$$q_{z \max} = \frac{q' q''}{q' + q''}$$

i w przypadku szczególnym, gdy  $q' = q'' = q$

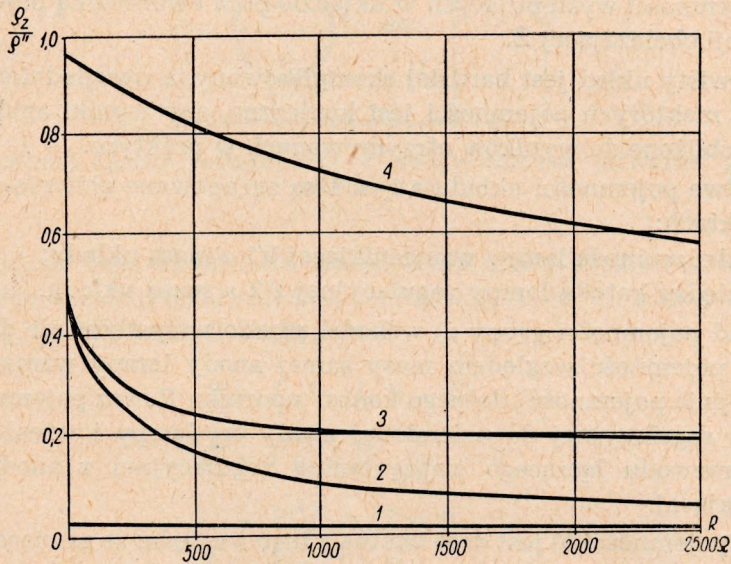
$$q_{z \max} = \frac{1}{2} q$$

Zastępcza oporność wewnętrzna układu maleje przy powiększaniu  $R$  do wartości granicznej określonej przez  $R = \infty$

$$\varrho_{z \min} = \frac{\varrho''}{1 + K''}$$

która jest bliska odwrotności  $S''$ , jeśli wartość  $K''$  jest odpowiednio większa od jedności.

Należy dodać, że zmiany współczynników układu zastępczego zachodzą szybko w początkowym zakresie zmienności parametru  $R$  i stopniowo maleją, gdy  $R$  rośnie. Przebiegi funkcji  $\frac{K_z}{K'}$  i  $\frac{\varrho_z}{\varrho''}$  obliczone przykładowo dla lampy P-300 w połączeniu triodowym i pentodowym są podane na rys. 3 i 4.



Rys. 4. Wpływ oporności regulacyjnej na zastępczą oporność wewnętrzną

Krzy- we	V1	V2	$\frac{\varrho'}{\varrho' + \varrho''}$	$\frac{1}{1 + K''}$	$\varrho_{z \max}$ ( $\Omega$ )	$\varrho_{z \min}$ ( $\Omega$ )
1	trioda	pent.	0,033	0,00826	483	120
2	pent.	pent.	0,5	0,00826	7250	120
3	trioda	trioda	0,5	0,166	250	83
4	pent.	trioda	0,967	0,166	483	83

Przytoczone rozważania wskazują na celowość wyboru możliwie dużej wartości oporności  $R$ , której odpowiadałby wysoki współczynnik amplifikacji układu i mała oporność wewnętrzna. Wzmacniacz o małej oporności wewnętrznej jest bowiem mało wrażliwy na wpływy obciążenia pojemność-

ciowego w odpowiednio szerokim zakresie częstotliwości oraz na nieliniowe zmiany impedancji obciążającej przy zmianach napięcia wzbudzającego, co — jak wspomniano — stanowi istotną cechę wymaganą od modulatora sygnału wizyjnego.

#### 4. LOKALIZACJA I OBLICZENIOWE UWZGLĘDNIENIE SZKODLIWYCH POJEMNOŚCI UKŁADU

Rozpatrywany dotychczas schemat ideowy wzmacniacza niezupełnie odpowiada warunkom rzeczywistym i z tego względu może być traktowany tylko jako układ idealny. W szczególności schemat ten nie liczy się z wpływami pojemności występujących w układzie poza ewentualną pojemnością impedancji obciążającej  $Z$ .

Rzeczywisty układ jest bardziej skomplikowany, a uwzględnienie przynajmniej niektórych pojemności jest konieczne, aby wyniki analizy były bardziej zbliżone do wyników otrzymywanych w praktyce.

Szkodliwe pojemności układu z rys. 1 są zgrupowane głównie w dwóch jego punktach:

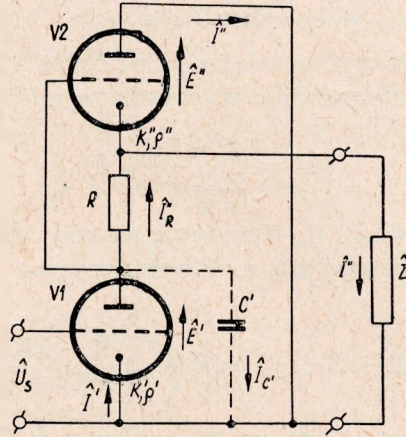
- a) pomiędzy anodą lampy wzmacniającej  $V1$  a masą układu;
- b) pomiędzy katodą lampy regulacyjnej  $V2$  a masą układu.

W skład pojemności grupy a) wchodzi przede wszystkim nie dająca się pominąć pojemność względem masy samej anody lampy wzmacniającej  $V1$ , następnie pojemność „dolnego końca” opornika  $R$  oraz pojemność siatki lampy regulacyjnej do uziemionej anody tej lampy i wreszcie pojemność przewodu łączącego siatkę lampy regulacyjnej z anodą lampy wzmacniającej.

Grupa pojemności b) jest dość istotna z tego względu, że zawiera znaczną pojemność katody lampy regulacyjnej  $V2$  do masy. Pojemność ta jest związana ze źródłem prądu żarzenia lampy, co ogranicza możliwości jej redukcowania. Jednakże pojemność do masy katody  $V2$  łącznie z pojemnością transformatora żarzeniowego lub innego źródła żarzenia oraz pojemność opornika  $R$  mogą być uważane jako składowe reaktancyjne impedancji obciążającej  $Z$ , która ma charakter wielkości zespolonej i z tego powodu nie ma potrzeby traktować ich przy analizie oddzielnie.

Należy również wspomnieć o trzeciej pojemności szkodliwej układu, jaka istnieje pomiędzy dwoma końcami oporności  $R$ . Reaktancja ta zawiera również wejściową pojemność lampy regulacyjnej. Jednak przy spotykanych w praktyce wartościach oporności  $R$  pojemność ta (jak i pojemność przewodu łączącego) może być z powodzeniem pominięta, a w każdym razie wpływ jej będzie dalszego rzędu.

Zmodyfikowany w ten sposób schemat ideowy odpowiadający rzeczywistym warunkom pracy układu jest przedstawiony na rys. 5, gdzie omówione poprzednio pojemności grupy a) są reprezentowane przez  $C'$ .



Rys. 5. Schemat ideowy wzmacniacza z uwzględnieniem głównych pojemności szkodliwych

Rozwiązanie tego układu dla wyznaczenia prądu obciążenia  $\hat{I}$  wymaga rozwiązania układu pięciu równań, analogicznych do (1), z niewiadomymi  $\hat{I}$ ,  $\hat{I}'$ ,  $\hat{I}''$ ,  $\hat{I}_R$ ,  $\hat{I}_c$ . Równania te mają postać:

$$\hat{E}' - \hat{I}' \varrho' - \hat{I}_R R - \hat{I} Z = 0$$

$$\hat{E}' - \hat{I}' \varrho' + j \hat{I}_c \frac{1}{\omega C'} = 0$$

$$\hat{E}'' - \hat{I}'' \varrho'' + \hat{I} Z = 0$$

$$\hat{I}_R - \hat{I}'' - \hat{I} = 0$$

$$\hat{I}_c - \hat{I}' - \hat{I}_R = 0$$

gdzie:

$$\hat{E}' = -K' \hat{U}_s$$

$$\hat{E}'' = -K'' \hat{I}_R R$$

Układ ten daje się łatwo sprawdzić do trzech równań przez podstawienie prądów  $\hat{I}_R$  i  $\hat{I}_c$  z dwóch ostatnich do trzech pierwszych równości:

$$\left. \begin{aligned} \hat{E}' - \hat{I}' \varrho' - (\hat{I}'' + \hat{I}) R - \hat{I} Z &= 0 \\ \hat{E}' - \hat{I}' \varrho' + j(\hat{I}' - \hat{I}'' - \hat{I}) \frac{1}{\omega C'} &= 0 \\ \hat{E}'' - \hat{I}'' \varrho'' + \hat{I} Z &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Eliminując dalej w dwóch pierwszych równaniach  $\hat{I}'$  i grupując odpowiednio składniki dochodzi się do wyrażenia

$$\hat{E}' = (R + \hat{Z} + \varrho')\hat{I} + (R + \varrho')\hat{I}'' + j[R\omega C'\varrho' + \hat{Z}\omega C'\varrho']\hat{I} + R\omega C'\varrho'\hat{I}'' \quad (5)$$

Prąd  $\hat{I}''$  można wyznaczyć w zależności od  $\hat{I}$  z ostatniego równania układu (4). Podstawiając odpowiednie wyrażenia w miejsce  $\hat{E}''$ , otrzymuje się

$$\hat{I}'' = \frac{\hat{Z} - RK''}{RK'' + \varrho''} \hat{I} \quad (6)$$

Podstawiając dalej (6) do (5) otrzymuje się równanie na prąd obciążenia  $\hat{I}$  w zależności od zastępczej siły elektromotorycznej  $\hat{E}'$ , która z kolei jest funkcją  $\hat{U}_s$ :

$$\begin{aligned} \hat{E}' &= \left[ (R + \hat{Z} + \varrho') + (R + \varrho') \frac{\hat{Z} - RK''}{RK'' + \varrho''} \right] \hat{I} + \\ &+ j \left[ (R\omega C'\varrho' + \hat{Z}\omega C'\varrho') + R\omega C'\varrho' \frac{\hat{Z} - RK''}{RK'' + \varrho''} \right] \cdot \hat{I} \\ &= - K' \hat{U}_s \frac{RK'' + \varrho''}{(R + \hat{Z} + \varrho')(RK'' + \varrho'') + (R + \varrho')(\hat{Z} - RK'') + j\omega C'[\varrho'(R + \hat{Z})(RK'' + \varrho'') + R\varrho'(\hat{Z} - RK'')]} \end{aligned}$$

Po dalszych przekształceniach równanie to otrzymuje postać ostateczną

$$\hat{I} = - K' \hat{U}_s \frac{RK'' + \varrho''}{\varrho' + \varrho'' + R(K'' + 1) + j\omega C'\varrho'[R(K'' + 1) + \varrho'']} \cdot \frac{1}{\frac{(R + \varrho')\varrho'' + j\omega C'\varrho'\varrho''R}{\varrho' + \varrho'' + R(K'' + 1) + j\omega C'\varrho'[R(K'' + 1) + \varrho'']} + \hat{Z}} \quad (7)$$

Powyższe równanie może być sprawdzone do postaci typowej dla układu wzmacniacza:

$$\hat{I} = - \hat{K}_z \hat{U}_s \frac{1}{\hat{\varrho}_z + \hat{Z}} \quad (8)$$

przez oznaczenie współczynników:

$$\hat{K}_z = K' \frac{RK'' + \varrho''}{\varrho' + \varrho'' + R(K'' + 1) + j\omega C'\varrho'[R(K'' + 1) + \varrho'']} \quad (9)$$

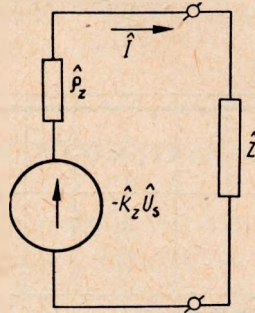
$$\hat{\varrho}_z = \frac{\varrho''(R + \varrho') + j\omega C'\varrho'\varrho''R}{\varrho' + \varrho'' + R(K'' + 1) + j\omega C'\varrho'[R(K'' + 1) + \varrho'']} \quad (10)$$

W schemacie zastępczym przedstawionym na rys. 6 zarówno zastępczy współczynnik amplifikacji  $\hat{K}_z$ , jak i zastępcza impedancja wewnętrzna

układu  $\hat{e}_z$  mają, jak widać, charakter wielkości zespolonych, a więc zmieniają swoje wartości w zakresie pasma częstotliwości wzmacnianych.

Nowe współczynniki  $\hat{K}_z$  i  $\hat{e}_z$  (odpowiadające układowi rzeczywistemu) uzyskują, jak widać, wartości  $K_z$  i  $e_z$  (podane poprzednio dla układu idealnego), jeśli pojemność  $C'$  lub częstotliwość kątowna  $\omega$  jest dostatecznie mała. Takie warunki będą spełnione, jeśli

$$\frac{1}{\omega C'} \gg \frac{R e'}{R + e'} \quad \text{oraz} \quad \frac{1}{\omega C'} \gg \frac{[R(K'' + 1) + e''] e'}{R(K'' + 1) + e'' + e'}$$



Rys. 6. Schemat zastępczy wzmacniacza zawierającego pojemności szkodliwe

Prawe strony obu nierówności oznaczają odpowiednio równoległe połączenie oporności  $R$  oraz  $e'$  w pierwszym przypadku i oporności  $[R(K'' + 1) + e'']$  oraz  $e'$  w drugim przypadku. Wynika stąd, że wystarcza spełnienie drugiego warunku, tj. aby

$$\omega C' \ll \frac{R(K'' + 1) + e'' + e'}{[R(K'' + 1) + e''] e'}$$

W dalszym ciągu będzie wykazane, że wartości  $K_z$  i  $e_z$  są maksymalnymi wartościami modułów  $\hat{K}_z$  i  $\hat{e}_z$  w zakresie zmienności  $\omega$ .

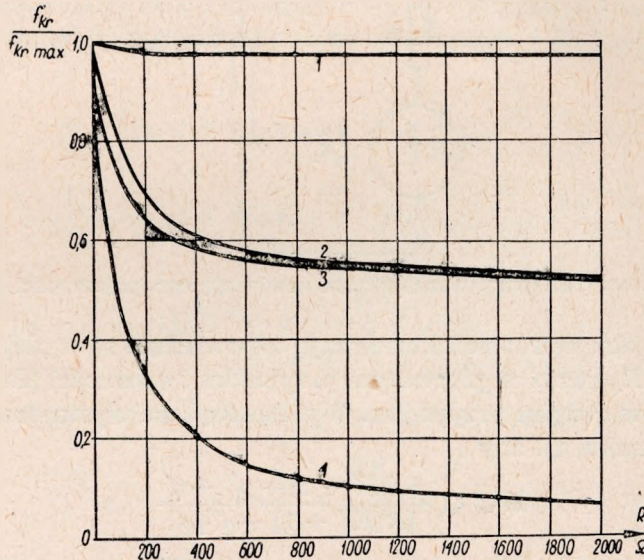
## 5. ZAKRES CZĘSTOTLIWOŚCI SYGNAŁÓW WZMACNIANYCH

Jak wynika z poprzednio podanej zależności (9), moduł zastępczego współczynnika amplifikacji  $|\hat{K}_z|$  maleje do zera, gdy częstotliwość sygnałów wzmacnianych wzrasta do nieskończoności. Właściwość tę wygodnie będzie scharakteryzować przez wprowadzenie pojęcia krytycznej częstotliwości układu. Będzie ona oznaczać częstotliwość wzmacnianego sygnału, przy której zastępczy współczynnik amplifikacji zmaleje o 3 dB. Oczywiście, przy projektowaniu wzmacniacza ważny jest nie tylko moduł zastępczego współczynnika amplifikacji, ale i jego kąt fazowy, który będzie miał wpływ na zniekształcenia fazowe wzmacnianych przebiegów.

Zakres wzmacnianych częstotliwości wyznaczony częstotliwością, dla której wzmocnienie napięciowe spada poniżej dopuszczalnej tolerancji, będzie w ogólnym przypadku różnił się od zakresu wyznaczonego częstotliwością krytyczną układu i będzie zależał od charakteru obciążenia oraz od impedancji wewnętrznej układu wzmacniacza.

Na podstawie równania (9) krytyczna częstotliwość układu, zgodnie z przyjętą definicją, jest wyznaczona jako

$$f_{kr} = f_{(3dB)} = \frac{\varrho' + \varrho'' + R(K'' + 1)}{\varrho' C' [R(K'' + 1) + \varrho'']} \cdot \frac{1}{2\pi} \quad (11)$$



Rys. 7. Wpływ oporności regulacyjnej na częstotliwość krytyczną wzmacniacza

1 — trioda/pentoda	$f_{kr,max} = 11,0$ MHz
2 — pentoda/pentoda	$f_{kr,max} = 0,782$ MHz
3 — trioda/trioda	$f_{kr,max} = 21,2$ MHz
4 — pentoda/trioda	$f_{kr,max} = 11,0$ MHz

Jak widać, zależy ona od oporności  $R$  i maleje z jej wzrostem. Graniczne wartości krytycznej częstotliwości układu łatwo jest wyznaczyć przez podstawienie granicznych wartości  $R$ . I tak dla  $R = 0$

$$f_{kr(R=0)} = \frac{\varrho' + \varrho''}{\varrho' \varrho'' C'} \cdot \frac{1}{2\pi} = f_{kr,max}$$

oraz dla  $R = \infty$

$$f_{kr(R=\infty)} = \frac{1}{\varrho' C'} \cdot \frac{1}{2\pi} = f_{kr,min}$$



Charakter przebiegu funkcji  $\frac{f_{kr}}{f_{kr \max}} = f(R)$  dla przytoczonych poprzednio typów lamp jest przedstawiony na wykresie rys. 7.

Przy projektowaniu wzmacniacza regulowanego równolegle wartość oporności  $R$  musi być wybierana w taki sposób, aby spełnić wymagania dotyczące szerokości pasma wzmacnianych sygnałów. Jeśli wartość oporności  $R$  zostanie z góry założona ze względu na pożądaną wartość wzmocnienia, to wówczas przy ustalonej pojemności  $C'$  uzyska się pewną maksymalną szerokość pasma częstotliwości wzmacnianych sygnałów i, podobnie jak w zwykłym wzmacniaczu, założona z góry szerokość pasma ograniczy odpowiednio wielkość wzmocnienia.

## 6. OPORNOŚĆ WEWNĘTRZNA WZMACNIACZA

Oporność wewnętrzna wzmacniacza o układzie zastępczym podanym na rys. 6 ma w ogólności, zgodnie z wyrażeniem (10), charakter zespolony. Jak wspomniano poprzednio, przy częstotliwościach bardzo małych składowa urojona oporności jest do pominięcia, a składowa rzeczywista jest równa oporności wewnętrznej układu idealnego. Składowa urojona jest również do pominięcia, gdy częstotliwość pracy układu wzrasta do nieskończoności. Natomiast składowa rzeczywista zbliża się wówczas asymptotycznie do nowej wartości, którą łatwo obliczyć na podstawie równania (10). Wprowadzając nowe oznaczenia

$$\hat{\varrho}_z(\omega=0) = \varrho_0 \quad \text{i} \quad \hat{\varrho}_z(\omega=\infty) = \varrho_\infty$$

otrzymuje się zależności

$$\varrho_0 = \frac{\varrho''(R + \varrho')}{\varrho' + \varrho'' + R(K'' + 1)} \quad (12)$$

oraz

$$\varrho_\infty = \frac{R\varrho''}{R(K'' + 1) + \varrho''} \quad (13)$$

Oporność wewnętrzną układu określoną zależnością (10) można przedstawić w ogólnej postaci jako

$$\hat{\varrho}_z = \frac{a}{\alpha} - j \frac{b}{\alpha}$$

gdzie:

$$a = \varrho''(R + \varrho')[\varrho' + \varrho'' + R(K'' + 1)]^2 + \omega^2 C'^2 \varrho'^2 \varrho'' R [R(K'' + 1) + \varrho'']$$

$$b = \varrho'^2 \varrho'' \omega C' (RK'' + \varrho'')$$

$$\alpha = [\varrho' + \varrho'' + R(K'' + 1)]^2 + \varrho'^2 \omega^2 C'^2 [R(K'' + 1) + \varrho'']^2$$

Składowa urojona tej oporności  $\frac{b}{\alpha}$  osiąga wartość maksymalną dla częstotliwości, którą można wyznaczyć przyrównując do zera wartość jej pochodnej

$$\frac{\partial}{\partial \omega} \left( \frac{b}{\alpha} \right) = 0$$

Poszukiwana częstotliwość, jak wynika z obliczenia, jest równa wyznaczonej poprzednio krytycznej częstotliwości układu (11)

$$f_{kr} = \frac{e' + e'' + R(K'' + 1)}{2\pi C' e' [R(K'' + 1) + e'']}$$

Interesująca jest również wartość obu składowych oporności wewnętrznej przy częstotliwości krytycznej. Wynikiem podstawienia  $\omega = \omega_{kr}$  do równania (10) jest:

$$\hat{e}_{z(\omega=\omega_{kr})} = \frac{e''(R + e') + jC'e'e''R \cdot \frac{e' + e'' + R(K'' + 1)}{e'C'[R(K'' + 1) + e'']}}{e' + e'' + R(K'' + 1) + jC'e' \cdot \frac{e' + e'' + R(K'' + 1)}{e'C'[R(K'' + 1) + e'']} [R(K'' + 1) + e'']}$$

czyli

$$\hat{e}_{z(\omega=\omega_{kr})} = \frac{\frac{e''(R + e')}{e' + e'' + R(K'' + 1)} + j \frac{R e''}{R(K'' + 1) + e''}}{1 + j}$$

Uwzględniając oznaczenia (12) i (13), wyrażenie powyższe upraszcza się do postaci

$$\hat{e}_{z(\omega=\omega_{kr})} = \frac{e_0 + j e_\infty}{1 + j}$$

lub po dalszych przekształceniach

$$\hat{e}_{z(\omega=\omega_{kr})} = \frac{e_0 + e_\infty}{2} - j \frac{e_0 - e_\infty}{2} \quad (14)$$

Przy częstotliwości krytycznej część rzeczywista oporności wewnętrznej układu ma wartość równą połowie sumy oporności osiąganych przy częstotliwościach: zerowej i bardzo wielkiej, a jej część urojona jest równa wtedy połowie różnicy oporności osiąganych przy tych częstotliwościach ze znakiem ujemnym.

Równanie (14) jest pomocne przy szybkiej ocenie właściwości wzmacniacza. Pozwala ono bowiem przy znanej wartości oporności obciążającej wyznaczyć prąd obciążenia, a także wartość wzmocnienia napięciowego przy częstotliwości krytycznej.

## 7. UNIWERSALNE CHARAKTERYSTYKI WZMACNIACZA REGULOWANEGO RÓWNOLEGLE

Równanie (9) określające zastępczy współczynnik amplifikacji

$$\tilde{K}_z = K' \frac{RK'' + \varrho''}{\varrho' + \varrho'' + R(K'' + 1) + jC'\varrho'[R(K'' + 1) + \varrho'']\omega}$$

można przekształcić, podstawiając z równania (3a)

$$K' \frac{RK'' + \varrho''}{\varrho' + \varrho'' + R(K'' + 1)} = K_z$$

oraz z równania (11)

$$\frac{\varrho' + \varrho'' + R(K'' + 1)}{\varrho' C' [R(K'' + 1) + \varrho'']} = \omega_{kr}$$

Otrzymuje ono wówczas postać

$$\tilde{K}_z = K_z \frac{1}{1 + j \frac{\omega}{\omega_{kr}}}$$

lub w postaci uniwersalnej

$$\frac{\tilde{K}_z}{K_z} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_{kr}}\right)^2}} e^{-j \arctg \frac{\omega}{\omega_{kr}}} = \left| \frac{\tilde{K}_z}{K_z} \right| e^{j\varphi}$$

skąd

$$\left| \frac{\tilde{K}_z}{K_z} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + \gamma^2}} \quad \text{i} \quad \varphi \frac{\tilde{K}_z}{K_z} = - \arctg \gamma$$

gdzie  $\gamma = \frac{\omega}{\omega_{kr}}$

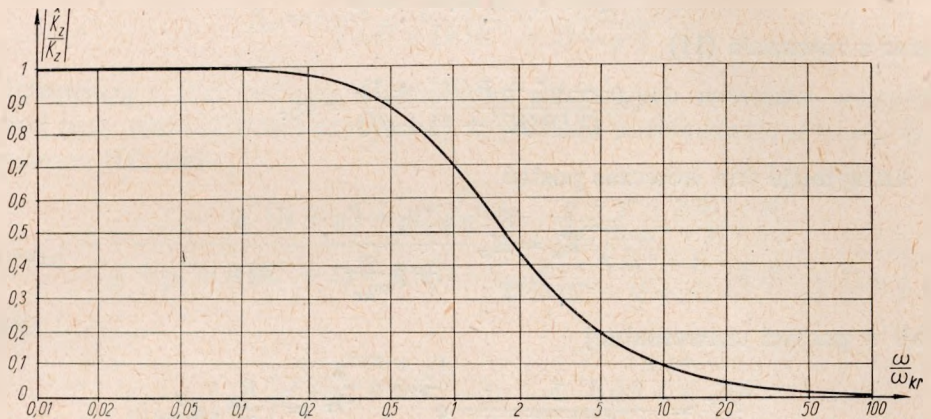
Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono wykresy modułu i kąta fazowego zastępczego współczynnika amplifikacji układu (odniesione do wartości początkowej) przy zmianach częstotliwości względnej od 0,01 do 100.

W przypadku wzmacniacza nieobciążonego lub gdy oporność obciążająca jest bardzo duża wobec oporności wewnętrznej, równanie charakterystyki współczynnika amplifikacji jest jednocześnie równaniem charakterystyki wzmocnienia napięciowego, ponieważ oporność wewnętrzna układu nie odgrywa roli, a napięcie wyjściowe jest równe sile elektromotorycznej  $\hat{E} = -\tilde{K}_z \hat{U}_s$ . Jednak w praktyce takie przybliżenie rzadko może być stosowane, gdyż nawet w przypadkach, gdy impedancja przyłożona z zewnątrz do zacisków wyjściowych układu jest bardzo duża, to sam układ (jak wy-

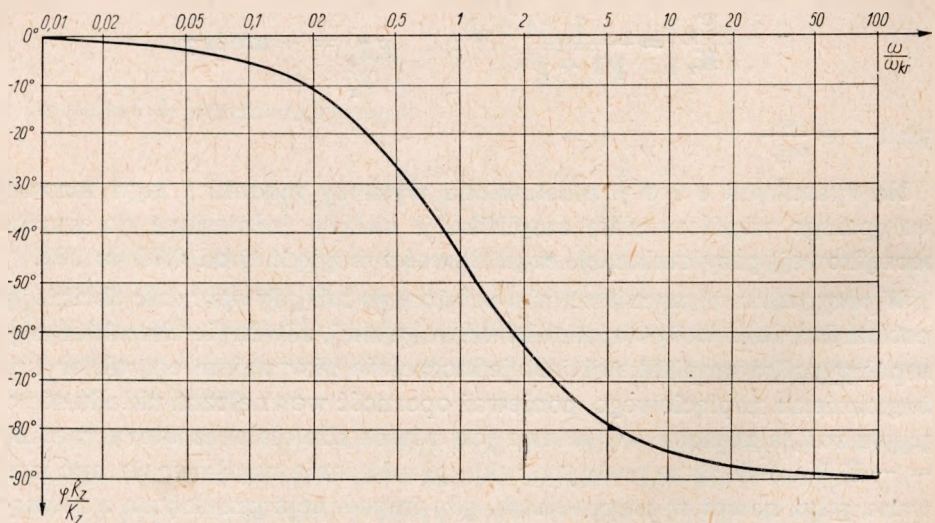
kazano w rozdz. 4) zawiera pomiędzy zaciskami wyjściowymi pewną pojemność, której nie można dowolnie zmniejszyć.

W sposób analogiczny do poprzedniego można również przedstawić równanie wewnętrznej impedancji wzmacniacza (10). Przekształcając równanie (10) i podstawiając  $\omega_{kr}$  z równania (11), otrzymuje się wyrażenie:

$$z = \frac{\varrho''(R + \varrho')}{\varrho' + \varrho'' + R(K'' + 1)} \cdot \frac{1}{1 + j \frac{\omega}{\omega_{kr}}} + \frac{\varrho'' R}{R(K'' + 1) + \varrho''} \cdot \frac{\frac{\omega}{\omega_{kr}}}{\frac{\omega}{\omega_{kr}} - j}$$



Rys. 8. Uniwersalna charakterystyka modułu współczynnika amplifikacji



Rys. 9. Uniwersalna charakterystyka kąta fazowego współczynnika amplifikacji

Uwzględniając oznaczenia (12) i (13)

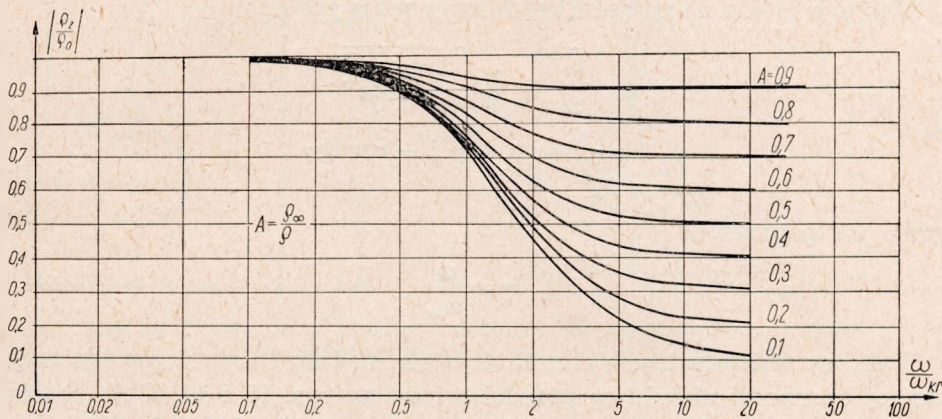
$$\frac{\varrho''(R + \varrho')}{\varrho' + \varrho'' + R(K'' + 1)} = \varrho_0, \quad \frac{\varrho'' R}{\varrho'' + R(K'' + 1)} = \varrho_\infty$$

oraz wprowadzając dodatkowe oznaczenie

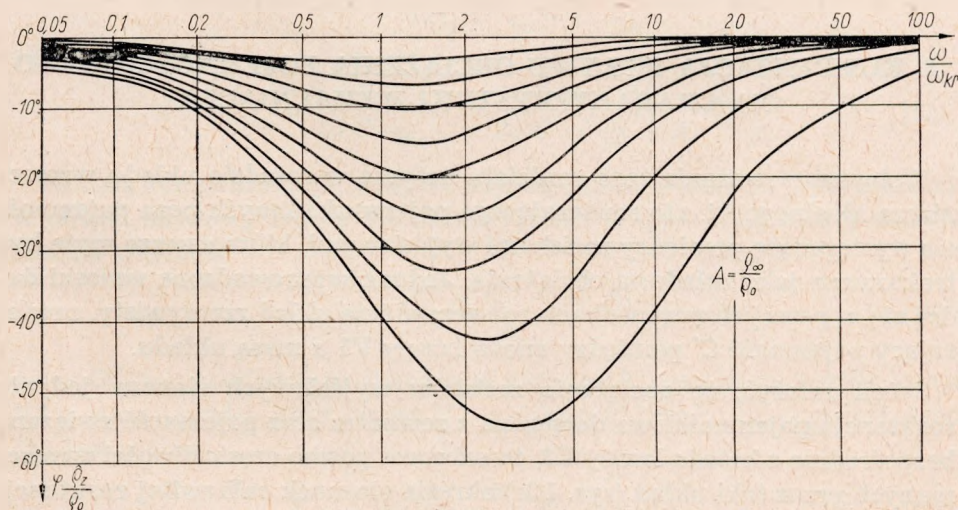
$$\frac{\varrho_\infty}{\varrho_0} = A$$

otrzymuje się

$$\hat{\varrho}_z = \varrho_0 \frac{1}{1 + j \frac{\omega}{\omega_{kr}}} + \varrho_\infty \frac{1}{1 - j \frac{\omega_{kr}}{\omega}}$$



Rys. 10. Uniwersalna charakterystyka modułu oporności wewnętrznej



Rys. 11. Uniwersalna charakterystyka kąta fazowego oporności wewnętrznej

albo w postaci uniwersalnej

$$\frac{\hat{e}_z}{e_0} = \frac{1}{1 + j \frac{\omega}{\omega_{kr}}} + A \cdot \frac{1}{1 - j \frac{\omega_{kr}}{\omega}} \quad \text{lub} \quad \frac{\hat{e}_z}{e_0} = \frac{1 + j \frac{\omega}{\omega_{kr}} \cdot A}{1 + j \frac{\omega}{\omega_{kr}}}$$

lub

$$\frac{e_z}{e_0} = \frac{1 + A + j \left( A \frac{\omega}{\omega_{kr}} - \frac{\omega_{kr}}{\omega} \right)}{2 + j \left( \frac{\omega}{\omega_{kr}} - \frac{\omega_{kr}}{\omega} \right)} = \left| \frac{\hat{e}_z}{e_0} \right| \cdot e^{j\varphi}$$

Stąd wyrażenia na moduł i kąt fazowy mają postać

$$\left| \frac{\hat{e}_z}{e_0} \right| = \sqrt{\frac{1 + \gamma^2 A^2}{1 + \gamma^2}}$$

$$\varphi_{\frac{\hat{e}_z}{e_0}} = \text{arc tg } \gamma A - \text{arc tg } \gamma$$

gdzie jak poprzednio

$$\gamma = \frac{\omega}{\omega_{kr}}$$

Wykresy uniwersalnych charakterystyk modułu i kąta fazowego wyjściowej oporności układu są przedstawione na rys. 10 i 11. Obie rodziny charakterystyk wykonano w przedziale zmienności  $\gamma$  od 0,01 do 100, przyjmując jako parametr wartości stosunku  $A$  w granicach od 0,1 do 1.

## 8. KOMPENSACJA WPLYWU OBCIĄŻENIA POJEMNOSCIOWEGO NA CHARAKTERYSTYKI WZMACNIACZA

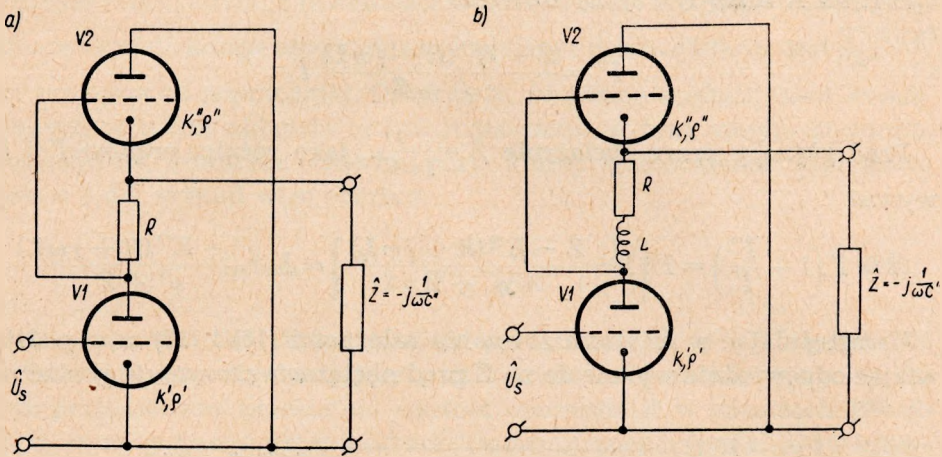
Wstępne rozważania tego rozdziału dotyczą w zasadzie układu wzmacniacza idealnego, tj. nie zawierającego pojemności innych poza pojemnością występującą pomiędzy zaciskami wyjściowymi, która zawsze może być traktowana jako składowa obciążenia. Jednak wyprowadzone wnioski dadzą się w pewnych przypadkach rozszerzyć i na układ rzeczywisty, zawierający pojemność  $C'$  pomiędzy anodą lampy V1 a masą układu.

Jeżeli założyć, że obciążenie zacisków wyjściowych stanowi jedynie reaktancja pojemnościowa dołączona z zewnątrz oraz pojemność związana bezpośrednio z katodą lampy V2, to wówczas pasmo częstotliwości wzmacnianych przez taki układ (rys. 12a) określa stosunek całkowitej reaktancji obciążającej  $\hat{Z} = \frac{1}{j\omega C'}$  do zastępczej oporności wewnętrznej  $e_z (= e_0)$ . W tym

przypadku  $C''$  oznacza więc sumę wszystkich pojemności występujących między katodą lampy V2 a masą układu.

Wzmocnienie napięciowe tego układu można obliczyć z zależności

$$\hat{k}_u = -K_z \frac{1}{1 + j\omega C'' \varrho_0}$$



Rys. 12. Wzmacniacz idealny z obciążeniem czysto pojemnościowym:  
a) układ niekompensowany, b) układ z kompensacją

Spadek charakterystyki wzmocnienia  $|\hat{k}_u| = f(f)$  o 3 dB następuje przy częstotliwości granicznej  $f_{gr}$  wyznaczonej równością:

$$2\pi f_{gr} C'' \varrho_0 = 1$$

skąd

$$f_{gr} = \frac{1}{2\pi C'' \varrho_0} = \frac{\varrho' + \varrho'' + R(K'' + 1)}{2\pi C'' \varrho'' (\varrho' + R)} \quad (15)$$

Metoda kompensacji [2] wpływu pojemności  $C''$  polega na wprowadzeniu w obwód anodowy lampy V1 indukcyjności  $L$  (rys. 12b), której wartość spełnia warunek

$$L = \frac{C'' \varrho'' (\varrho'' + K'' R)}{K''} \quad (16)$$

gdzie  $C''$ , jak powiedziano, jest sumą pojemności pomiędzy katodą lampy V2 a masą układu. Prąd lampy V1 w takim układzie, jak wykazał Amos [5], jest równy

$$\hat{I}' = \frac{K' \hat{U}_s}{\varrho' + R + j\omega L + \varrho'' + K'' R} \quad (17)$$

Na podstawie dwóch ostatnich zależności układu równań (1) prąd  $\bar{I}''$  zależy od prądu  $\bar{I}'$  następująco:

$$\bar{I}'' = \frac{\bar{Z} - K'' R}{\varrho'' + \bar{Z}} \bar{I}'$$

Dla układu kompensowanego równanie to będzie zawierało zamiast oporności  $R$  sumę  $R + j\omega L$ . Wówczas

$$\bar{I}'' = \frac{\bar{Z} - K''(R + j\omega L)}{\varrho'' + \bar{Z}} \bar{I}'$$

Prąd płynący przez obciążenie  $\bar{Z} = \frac{1}{j\omega C''}$ , jako różnica prądów  $\bar{I}'$  i  $\bar{I}''$ , wynosi

$$\bar{I} = \bar{I}' \left(1 - \frac{\bar{I}''}{\bar{I}'}\right) = \bar{I}' \left[1 - \frac{\bar{Z} - K''(R + j\omega L)}{\varrho'' + \bar{Z}}\right] = \bar{I}' \frac{\varrho'' + K''(R + j\omega L)}{\varrho'' + \bar{Z}}$$

Uwzględniając w ostatnim równaniu zależności (16) i (17) oraz podstawiając odpowiednie wyrażenie na  $\bar{Z}$  prąd obciążenia otrzymuje postać

$$\bar{I} = -K' \bar{U}_s \frac{1}{\varrho' + \varrho'' + R(K'' + 1) + j\omega \frac{\varrho'' C''(\varrho'' + K'' R)}{K''}} \cdot \frac{\varrho'' + K'' \left[ R + j\omega \frac{\varrho'' C''(\varrho'' + K'' R)}{K''} \right]}{\varrho'' + \frac{1}{j\omega C''}}$$

Równanie to przekształca się do postaci

$$\bar{I} = -K' \bar{U}_s \frac{1}{\frac{\varrho' + \varrho'' + R(K'' + 1)}{j\omega C''} + \frac{\varrho''(RK'' + \varrho'')}{K''}} \cdot \frac{(RK'' + \varrho'')(1 + j\omega C'' \varrho'')}{1 + j\omega C'' \varrho''}$$

która daje się ostatecznie uprościć jako

$$\bar{I} = -K' \frac{RK'' + \varrho''}{\varrho' + \varrho'' + R(K'' + 1)} \bar{U}_s \frac{1}{\frac{\varrho''(RK'' + \varrho'')}{K''[\varrho' + \varrho'' + R(K'' + 1)]} + \frac{1}{j\omega C''}} \quad (18)$$

Jak widać z równania (18), wzmacniacz idealny z kompensacją pojemności obciążającej może być zastąpiony schematowo układem prostym, w którym zastępczy współczynnik amplifikacji

$$K_{z \text{ komp}} = K' \frac{RK'' + \varrho''}{\varrho' + \varrho'' + R(K'' + 1)}$$



nie różni się od współczynnika wzmacniacza niekompensowanego. Nowy układ różni się od poprzedniego wielkością zastępczej oporności wewnętrznej, która wynosi obecnie

$$Q_{z \text{ komp}} = \frac{\varrho'' (RK'' + \varrho'')}{K'' [\varrho' + \varrho'' + R(K'' + 1)]} \quad (19)$$

Porównanie ostatniego równania z wyrażeniem na oporność wewnętrzną wzmacniacza niekompensowanego wskazuje, że nowa wielkość jest  $\frac{K''(R+\varrho')}{RK''+\varrho'}$  razy mniejsza od poprzedniej. Oznacza to, że pasmo częstotliwości wzmacnianych w takim układzie będzie rozszerzone w tym samym stosunku. Częstotliwość graniczna układu, przy której wzmocnienie napięciowe spada o 3 dB, wynosi więc obecnie

$$f_{gr \text{ komp}} = \frac{[\varrho' + \varrho'' + R(K'' + 1)] K''}{2 \pi C'' \varrho'' (RK'' + \varrho'')} \quad (20)$$

Jeśli do równania (19) na miejsce parametrów  $\varrho'$ ,  $\varrho''$ ,  $K''$  podstawimy wartości liczbowe odpowiadające parametrom lamp modulacyjnych i założyc przyjmowaną przeciętnie wartość oporności  $R$  w granicach 100 do 200  $\Omega$ , to obliczona wartość oporności wewnętrznej wypada rzędu kilkudziesięciu omów, a przy zastosowaniu pentody jako lampy  $V1$  może spaść nawet do wartości kilku omów. Układ taki byłby więc zdolny zapewnić przenoszenie pasma częstotliwości wzmacnianych o szerokości dochodzącej do kilkudziesięciu MHz przy obciążeniu go nawet dość znaczną pojemnością, np. 100 pF. Niestety efekt ten nie jest łatwo potwierdzić eksperymentalnie. W praktyce bowiem pojemność  $C'$  anody lampy  $V1$  względem masy znacznie wcześniej zakrzywia charakterystykę wzmacniacza zanim zacznie ujawniać się wpływ reaktancji obciążającej obwód wyjściowy. Niemniej jednak przy odpowiednim doborze lamp i montażu zapewniającym minimalną wartość pojemności  $C'$ , tj. przy odpowiednio wielkiej częstotliwości krytycznej układu, kompensacja wpływu obciążenia pojemnościowego może rozszerzyć pasmo wzmacnianych częstotliwości. Poprawy takiej należy spodziewać się wówczas, gdy częstotliwość graniczna dla wzmocnienia napięciowego idealnego układu niekompensowanego (15) wypada stosunkowo blisko częstotliwości krytycznej zastępczego współczynnika amplifikacji (11). Zazwyczaj jednak nawet przy względnie dużych wartościach  $C''$  w porównaniu z  $C'$  częstotliwość graniczna wzmacniacza idealnego wypada powyżej częstotliwości krytycznej rzeczywistego układu, o czym można się przekonać podstawiając do równań (11) i (15) spotykane w praktyce wartości liczbowe.

W takich przypadkach dokładność, z jaką zależność (20) pozwala określić częstotliwość graniczną nie jest wystarczająca, z czego wynika, że

w schemacie zastępczym wzmacniacza skompensowanego powinien być uwzględniony także wpływ pojemności  $C'$ .

Współczynniki takiego układu można wyznaczyć w sposób analogiczny jak poprzednio wychodząc z zależności podobnych do układu równań (4), w których jednak zamiast oporności regulacyjnej  $R$  zostanie podstawiona impedancja szeregowo połączonych oporności i indukcyjności  $R + j\omega L$ . W szczególnym przypadku, gdy wartość indukcyjności  $L$  jest dobrana zgodnie z warunkiem (16), współczynniki układu skompensowanego  $\hat{K}_{zk}$  i  $\hat{Q}_{zk}$  można przedstawić w postaci następującej:

$$\left. \begin{aligned} \hat{K}_{zk} &= K_0 \frac{1 + j \frac{\omega}{\omega''}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega' \omega''} \frac{K_0}{K'} \frac{K'' + 1}{K''} + j \left[ \frac{\omega}{\omega_{kr}} + \frac{\omega}{\omega''} \frac{K_0}{K'} \frac{K'' + 1}{K''} \right]} \\ \hat{Q}_{zk} &= Q_0 \frac{1 - \frac{\omega^2}{\omega' \omega''} \frac{S_0}{S''} \frac{1}{K'} + j \left[ A \frac{\omega}{\omega_{kr}} + \frac{\omega}{\omega''} \frac{S_0}{S''} \frac{1}{K'} \right]}{1 - \frac{\omega^2}{\omega' \omega''} \frac{K_0}{K'} \frac{K'' + 1}{K''} + j \left[ \frac{\omega}{\omega_{kr}} + \frac{\omega}{\omega''} \frac{K_0}{K'} \frac{K'' + 1}{K''} \right]} \end{aligned} \right\} \quad (21a, b)$$

gdzie, poza oznaczeniami stosowanymi poprzednio, wprowadzono symbol  $S_0$  jako stosunek zastępczego współczynnika amplifikacji  $K_0$ <sup>1)</sup> do zastępczej oporności wewnętrznej  $Q_0$

$$S_0 = \frac{K_0}{Q_0} = \frac{K'(K''R + Q'')}{Q''(Q' + R)}$$

oraz charakterystyczne dla układu częstotliwości kątowe oznaczone odpowiednio przez:

$$\left. \begin{aligned} \omega' &= \frac{1}{C' Q'} \\ \omega'' &= \frac{1}{C'' Q''} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Charakterystyka wzmocnienia układu może być wówczas wyznaczona na podstawie równania

$$\hat{I} = -K_{zk} \hat{U}_s \frac{1}{\hat{Q}_{zk} + Z} \quad (23)$$

w którym

$$Z = -j \frac{1}{\omega C''}$$

<sup>1)</sup> Symbol  $K_0$  wprowadzono do równań (21) w celu ujednocnienia formy. Oznacza on początkowy (tj. dla  $\omega = 0$ ) zastępczy współczynnik amplifikacji układu oznaczony poprzednio przez  $K_z$  i zdefiniowany wyrażeniem (3a).

Wobec tego

$$\bar{k}_u = -\bar{K}_{zk} \frac{1}{1 + j\omega C'' \hat{q}_{zk}} \quad (24)$$

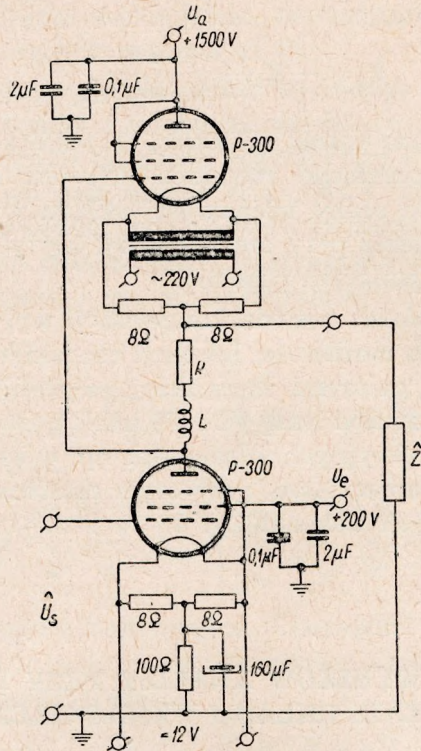
Ze względu na złożoną postać zależności (21) obliczenie charakterystyki wzmocnienia na podstawie równania (24) jest dość pracochłonne. W praktyce jednak do oceny właściwości układu wystarczy zazwyczaj określić jego wzmocnienie przy częstotliwości krytycznej i ewentualnie w jednym lub dwóch punktach poza nią.

Należy dodać, że opisana metoda kompensacji wpływu obciążenia nie wyczerpuje wszystkich możliwości korekcji charakterystyki częstotliwościowej układu. Poza dalszymi komplikacjami dwójnika regulacyjnego wtrąconego pomiędzy zaciski lamp V1 i V2 istnieją możliwości stosowania innych elementów korekcyjnych włączanych np. w szereg z pojemnością obciążającą wyjście wzmacniacza, przy czym ostateczny wybór wartości elementów korekcyjnych dokonywany bywa zazwyczaj drogą eksperymentu.

## 9. ZASTOSOWANIE WYNIKÓW ANALIZY PRZY PROJEKTOWANIU I OCENIE UKŁADU WZMACNIACZA

Wyniki analizy wykorzystano i sprawdzono praktycznie przy projektowaniu i badaniu wzmacniacza zbudowanego do celów doświadczalnych. Założenia zostały oparte na wymaganiach stawianych typowym modulatorom wizyjnym przeznaczonym do modulacji stopni mocy w.cz. o średnim lub dużym poziomie energetycznym fali nośnej, gdzie międzyszczytowa wartość napięcia wyjściowego sygnału wizyjnego jest rzędu 700 V. Układ zbudowano na pentodach nadawczych typu P-300 (Braun-Boveri), które, jak wynika ze schematu podanego na rys. 13 użyto w połączeniu pentodowym dla lampy V1 i triodowym dla lampy V2. Z danych przedstawionych na rys. 3 i 7 wynika, że tylko taka kombinacja zastosowanych lamp umożliwi osiągnięcie założonej wartości wzmocnienia ok. 10 V/V w pasmie częstotliwości o szerokości rzędu 5 MHz. Obliczenia przeprowadzono posługując się stałymi lamp uzyskanymi z bezpośrednich pomiarów przeprowadzonych dla wybranego punktu pracy układu. Wartości te są podane w tabl. 1.

Na podstawie wzorów wyprowadzonych dla zastępczego współczynnika amplifikacji i zastępczej oporności wewnętrznej układu niekompensowanego oraz jego charakterystyk uniwersalnych obliczono wzmocnienie układu przy obciążeniu znaną reaktancją pojemnościową. Wyniki obliczeń



Rys. 13. Schemat wzmacniacza użytego do badań

Tablica 1

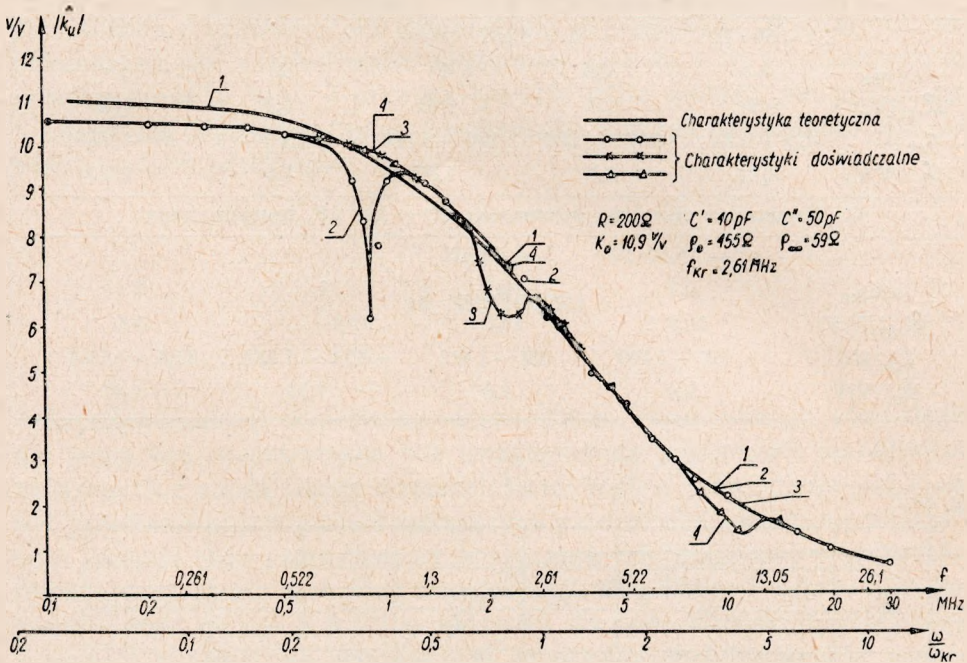
	Lampa P-300	
	jako pentoda: V1	jako trioda: V2
Współczynnik amplifikacji	$K' = 120 \text{ V/V}$	$K'' = 5 \text{ V/V}$
Oporność wewnętrzna	$\rho' = 14500 \Omega$	$\rho'' = 500 \Omega$

Tablica 2

$\omega/\omega_{kr}$	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10
$f \text{ (MHz)}$	0,261	0,522	1,3	2,61	5,22	13,05	26,1
$\frac{ \hat{e}_z }{e_0} \cdot e^{-j\varphi}$	$0,98e^{-j7^\circ}$	$0,96e^{-j10^\circ}$	$0,89e^{-j24^\circ}$	$0,72e^{-j39^\circ}$	$0,46e^{-j51^\circ}$	$0,25e^{-j51^\circ}$	$0,16e^{-j35^\circ}$
$ \hat{K}_z /K_0$	0,99	0,98	0,89	0,7	0,44	0,2	0,1
$ \hat{K}_u /K_0$	0,99	0,97	0,82	0,59	0,34	0,145	0,07
$ \hat{K}_u  \text{ (V/V)}$	10,8	10,6	8,95	6,55	3,74	1,58	0,76
$ \hat{K}_u  \text{ (dB)}$	0,1	0,3	1,7	4,6	9,2	17,0	23,2

(tabl. 2) przedstawiono w postaci teoretycznej krzywej wzmocnienia. Krzywa ta potraktowana jako linia odniesienia dla charakterystyki zdjętej doświadczalnie pozwoliła ujawnić nieregularności przebiegu mierzonego pochodzące od wpływów impedancji nie uwzględnionych w schemacie wzmacniacza.

Na rysunku 14 przedstawiającym krzywe: obliczeniową i zdjęte doświadczalnie jest uwidoczniony skutek oddziaływania indukcyjności zawartej w katodowej gałęzi obwodu lampy wzmacniającej. Indukcyjność ta, tworząc obwód równoległy z pojemnością blokującą, stanowi przy-

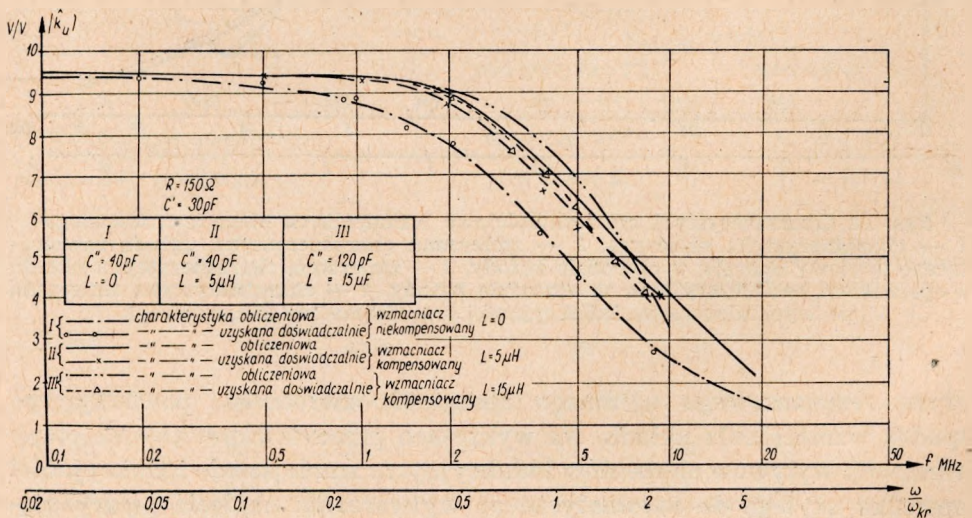


Rys. 14. Charakterystyki częstotliwościowe wzmacniacza niekompensowanego  
 1 — charakterystyka obliczona, 2 — zmierzona charakterystyka układu zawierającego drutowy opornik w obwodzie katody, 3 — zmierzona charakterystyka układu z opornikiem bezindukcyjnym w obwodzie katody, 4 — charakterystyka zmierzona po wyeliminowaniu indukcyjności transformatora żarzeniowego

czynę rezonansowego ujemnego sprzężenia zwrotnego, powodującego spadek wzmocnienia układu. Na wykresach przedstawiono kolejne etapy eliminacji wpływów elementów indukcyjnych: zmniejszenie indukcyjności opornika użytego do automatycznego wytwarzania napięcia polaryzującego siatki czynnej, usunięcie transformatora zasilającego obwód żarzenia lampy i zmniejszenie indukcyjności przewodu łączącego oraz odpo-

Tablica 3

Założenia wyjściowe					
$R = 150 \Omega, C' = 30 \text{ pF}, \omega_{kr} = 26,3 \cdot 10^6, f_{kr} = 4,2 \text{ MHz}, \omega' = 2,3 \cdot 10^6$					
A. Wzmacniacz obciążony pojemnością $C'' = 40 \text{ pF}$ , niekompensowany					
$\omega/\omega_{kr}$	0,2	0,5	1	2	5
$f \text{ (MHz)}$	0,84	2,1	4,2	8,4	21
$ \hat{K}_z/K_0 $	0,98	0,89	0,7	0,44	0,2
$\hat{Q}_z (\Omega)$	436 - j 77	377 - j 160	256 - j 204	134 - j 163	73 - j 88,5
$ \hat{k}_u  \text{ (V/V)}$	9,0	7,65	5,3	2,94	1,25
B. Wzmacniacz obciążony pojemnością $C'' = 40 \text{ pF}$ , kompensowany					
$\omega'' = 50 \cdot 10^6$		$L = 5 \mu\text{H}$			
$\omega/\omega_{kr}$	0,2	0,5	1	2	5
$ \hat{K}_{zk}  \text{ (V/V)}$	9,5	9,7	9,41	5,5	1,82
$\hat{Q}_{zk} (\Omega)$	453 - j 83	387 - j 205	186 - j 318	-17,2 j -70	55 - j 0,11
$ \hat{k}_u  \text{ (V/V)}$	9,33	8,7	7,05	4,8	1,75
C. Wzmacniacz obciążony pojemnością $C'' = 120 \text{ pF}$ , kompensowany					
$\omega'' = 16,66 \cdot 10^6$		$L = 15 \mu\text{H}$			
$\omega/\omega_{kr}$	0,2	0,5	1	2	
$ \hat{K}_{zk}  \text{ (V/V)}$	10,3	16,0	13,1	5,0	
$\hat{Q}_{zk} (\Omega)$	461 - j 100	402 - j 411	-83,5 - j 227	23,8 - j 18,8	
$ \hat{k}_u  \text{ (V/V)}$	9,4	9,0	7,55	4,45	



Rys. 15. Charakterystyki częstotliwościowe wzmacniacza kompensowanego dla różnych pojemności obciążających i odpowiednich indukcyjności korekcyjnych

wiadający im efekt stopniowego przesuwania się częstotliwości odsprężenia w kierunku górnej granicy pasma sygnałów wzmacnianych (0,9 MHz, 2,5 MHz, 10 MHz). W pasmie częstotliwości pracy układu poza obszarem rezonansowego odsprężenia stwierdzono całkowitą zgodność przebiegu krzywej teoretycznej i doświadczalnej.

W drugim etapie badań układ wzmacniacza zmodyfikowano w celu powiększenia częstotliwości krytycznej układu, redukując zarówno pojemności szkodliwe związane z anodą lampy wzmacniającej, jak też zmniejszając wartość oporności regulacyjnej. Dla kilku założonych wartości pojemności obciążającej zaciski wyjściowe układu wyznaczono odpowiednie wartości indukcyjności kompensujących i obliczono częstotliwościowe charakterystyki wzmocnienia napięciowego. Wyniki obliczeń dokonanych dla częstotliwości krytycznej układu i w jej okolicach są przedstawione w tabl. 3 oraz na rys. 15, gdzie zostały one porównane z krzywymi doświadczalnymi. Stwierdzono zasadniczą zgodność obu porównywanych przebiegów.

## 10. WNIOSKI

Szerokopasmowe właściwości wzmacniacza regulowanego równolegle nie mogą być rozpatrywane bez uwzględnienia pojemności szkodliwych związanych z anodą lampy wzmacniającej. Wpływ tych pojemności może być przedstawiony w postaci zastępczych parametrów układu wyrażonych jako funkcja jego częstotliwości krytycznej, zdefiniowanej jako częstotliwość, przy której zastępczy współczynnik amplifikacji układu niekompensowanego maleje o 3 dB w stosunku do swej wartości początkowej. Równania parametrów wzmacniacza wyprowadzone dla układu zastępczego, zarówno w przypadku wzmacniacza niekompensowanego, jak i przy kompensacji, pozwalają przewidywać na drodze obliczeniowej kształt charakterystyk częstotliwościowych ze stosunkowo dużą dokładnością wystarczającą w praktyce.

Częstotliwość krytyczna układu, stosownie do narzuconych wymagań, może być ustalana przez dobór odpowiedniej wartości regulacyjnej (jako kompromis w stosunku do uzyskiwanego wzmocnienia układu). Zastosowanie prostego układu kompensacji za pomocą dobranej indukcyjności włączonej w szereg z opornością regulacyjną pozwala około dwukrotnie rozszerzyć pasmo wzmacnianych częstotliwości w stosunku do częstotliwości granicznej wzmacniacza niekompensowanego.

W celu uzyskania dostatecznej zgodności przebiegów pomierzonych i obliczonych parametry lamp wzmacniacza w wybranym punkcie pracy oraz wartości pojemności szkodliwych i obciążających powinny być określone na podstawie pomiarów przeprowadzonych z możliwie dużą dokładnością.

#### WYKAZ LITERATURY

1. *Cooper V.J.*: Shunt regulated Amplifiers. *Wireless Engineer*, May, 1951.
2. *Cooper V.J.*: High — Power Television — Transmitter Technique, with particular reference to the Transmitter at Holme Moss. *PIEE*. Part III a, Vol. 99, No 18, 1952.
3. *Cooper V.J.*: New amplifier techniques. *Journal Brit. IRE*. July, 1952, Vol. 12, No 7.
4. *Frik-Vacek*: Zaklady televisni vysilacove techniky. Slaboproudny obzor. Brezen 1953.
5. *Amos S.W., Birkinshaw D.C.*: *Television Engineering*. Volume four. Ilifee & Sons Ltd. London 1958.

C. *Ogulewicz*

#### ШИРОКОПОЛОСНЫЕ СВОЙСТВА ПАРАЛЛЕЛЬНО РЕГУЛИРОВАННОГО УСИЛИТЕЛЯ

(Анализ схемы видеомодулятора)

#### Резюме

Схема параллельно регулируемого усилителя с катодным основанием была проанализирована с точки зрения свойств широкополосного пропускания. Работу идеального усилителя (без учета паразитных емкостей схемы) сведено к эквивалентной схеме типового лампового усилителя, в котором параметры лампы: коэффициент усиления и внутреннее сопротивление, выраженные в зависимости от постоянных схемы, имеют характер действительных величин. В случае встречаемых в практике схем формулы выведенные для коэффициентов эквивалентной схемы являются зависимыми от частоты работы. Поэтому введено понятие критической частоты схемы, при которой модуль эквивалентного коэффициента усиления уменьшается на 3 дБ. Уравнения описывающие коэффициенты схемы, выраженные в зависимости от критической частоты, представлено графически в виде универсальных характеристик рассматриваемой схемы усилителя.

На примере идеального усилителя был проанализирован простой способ компенсации влияния нагружающей емкости, а затем приведены тоже уравнения для характерного случая компенсированного усилителя, в котором учтены рассеянные емкости.

В заключении сравнено результаты теоретического анализа с результатами измерений экспериментальной схемы, построенной на типовых элементах, встречаемых в модуляторах видеосигнала. Результаты сравнения доказывают целесообразность применения приведенных коэффициентов при проектировании и оценке усилителей вышеуказанного типа.



S. Ogulewicz

WIDE-BAND PERFORMANCE OF THE SHUNT-REGULATED AMPLIFIER  
(Analysis of the video modulator circuit)

S u m m a r y

The wide-band properties of the shunt-regulated amplifier are analysed. The functioning of the ideal amplifier (without influence of the stray capacitances) is represented as the typical valve amplifier, whose tube parameters — its amplification factor and its a.c. anode — impedance expressed in terms of circuit constants represent real values. Formulae for equivalent circuit factors in practical conditions depend on the working frequency. The notation of critical circuit frequency at which the equivalent amplification factor falls by 3 dB is brought into. Equations for circuit factors are presented in graphs as universal characteristics of the analysed amplifier circuit. A simple method of compensation of the loading capacitance is being discussed in the example of the ideal amplifier and equations are given for the particular case of the compensated amplifier taking into account influence of the distributed capacities.

Finally the results of the theoretical analysis are compared with those of measurements of an experimental amplifier build of typical elements. The comparison shows the usefulness of the given factors for the desingins and the evaluation of this kind of amplifier.

S. Ogulewicz

AMPLIFICATEUR À RÉGLAGE PARALLÈLE  
(Analyse du circuit du modulateur vidéo)

R é s u m é

L'analyse du circuit de l'amplificateur à réglage parallèle (shuntregulated amplifier) a été faite sous l'aspect de son aptitude d'amplifier des signaux à large bande.

Le circuit de l'amplificateur idéal (non influencé par des capacités parasites) est présenté sous forme d'un schéma équivalent de l'amplificateur typique, dont les paramètres de tube (coefficient d'amplification et résistance interne) ont le caractère des grandeurs réelles dépendant des constantes du circuit.

Dans les conditions pratiques du fonctionnement les formules pour les paramètres du circuit dépendent de la fréquence du travail. On a donc introduit la notion de la fréquence critique de l'amplificateur pour laquelle le coefficient d'amplification du circuit équivalent diminue de 3 dB.

Les équations en fonction de la fréquence critique sont obtenues et présentées sous forme des caractéristiques universelles du circuit.

Prenant comme base l'amplificateur idéal on a discuté la méthode de compensation de l'influence de la capacité de sortie par une inductance. On a donné aussi des équations pour le cas particulier de l'amplificateur compensé, prenant en considération les capacités parasites du circuit.

On a comparé enfin les résultats de l'analyse théorique et des mesures de l'amplificateur à réglage parallèle construit comme un modulateur vidéo typique.

Les résultats de comparaison montrent l'utilité des formules proposées pour l'étude et l'examen de l'amplificateur en question.

*S. Ogulewicz*

## BREITBÄNDIGE EIGENSCHAFTEN DES PARALLELGEREGELTEN VERSTÄRKERS

(Analyse der Schaltung des Videomodulators)

### Zusammenfassung

Die Schaltung des parallelgesteuerten Kathodenbasisverstärkers ("shunt-regulated cathode-cathode amplifier") wird unter dem Gesichtspunkt seiner Eigenschaften bei Breitbandübertragung untersucht. Die Wirkung des idealen Verstärkers (unter Vernachlässigung schädlicher Schaltungskapazitäten) wird auf die Ersatzschaltung eines typischen Röhrenverstärkers zurückgeführt, in welcher die in Abhängigkeit von der Konstanten der Schaltung ausgedrückten Röhrenkennwerte — Verstärkungsfaktor und innerer Widerstand — real sind. Die für die Koeffizienten der Ersatzschaltung abgeleiteten Formeln hängen für die in der Praxis vorkommenden Schaltungen von der Arbeitsfrequenz ab. Es wird daher der Begriff der kritischen Frequenz der Schaltung eingeführt. Die in Abhängigkeit von der kritischen Frequenz ausgedrückte, Schaltungsparameter beschreibenden Gleichungen, werden zeichnerisch als universelle Kennlinien der untersuchten Verstärkerschaltung dargestellt.

An dem Beispiel des idealen Verstärkers wird eine einfache Anordnung zur Kompensation des Einflusses der Belastungskapazität erörtert und dann auch Gleichungen angegeben für den Sonderfall eines kompensierten Verstärkers mit Berücksichtigung der Streukapazitäten.

Zum Schluss werden die Ergebnisse der theoretischen Analyse mit denjenigen der Messreihe an einer aus typischen, in Videomodulatoren gebräuchlichen Einzelteilen aufgebauten Versuchsschaltung verglichen. Der Vergleich weist auf die Zweckmäßigkeit hin, die obengenannten Koeffizienten beim Entwurf und Bewertung von Verstärkerschaltungen der untersuchten Art zu verwenden.

OLIMPIA SKIBA-ROGALSKA

620.193:621.315.2.021

## KOROZJA OŁOWIU W WARUNKACH OCHRONY KATODOWEJ

Rękopis dostarczono do Komitetu Redakcyjnego 25. 8. 1964 r.

Badano warunki, w jakich ołowiana powłoka kabla ulega niszczeniu w trakcie stosowania ochrony katodowej. W doświadczeniach stosowano jako elektrolity grunty naturalne. W gruntach polaryzowano katodowo ołów nie pokryty osłoną ochronną oraz odcinki kabla w osłonie włóknistej i opancerzeniu stalowym. Prowadzono polaryzację do wysokich ujemnych potencjałów. W warunkach polowych badano stan ołowianych powłok kablowych chronionych katodowo.

W wyniku badań opracowano wskazówki dotyczące racjonalnego stosowania ochrony katodowej w odniesieniu do obołowionych kabli ziemnych i kanałowych.

### 1. WSTĘP

Artykuł niniejszy jest drugą częścią (dokończeniem) opisu badań nad tzw. korozją katodową ołowianej powłoki kabla.

Celem pracy było zorientowanie się, w jakich warunkach ołowiana powłoka kabla ulega niszczeniu w trakcie stosowania ochrony katodowej.

W pierwszej części pracy [1] omówiono zasady tzw. korozji katodowej i podano przegląd współczesnych pojęć na temat korozji w warunkach ochrony katodowej. Badania opisane w pierwszej części pracy miały charakter orientacyjny i polegały na obserwowaniu zjawisk zachodzących na katodzie ołowianej przy zmieniających się potencjałach polaryzacji. Doświadczenia prowadzone były przy użyciu sztucznego, ciekłego elektrolitu.

Przy dalszych badaniach zastosowano elektrolity glebowe, wybierając najbardziej typowe rodzaje gruntów, w jakich normalnie układane są kable telekomunikacyjne. W elektrolitach tych polaryzowano katodowo próbki ołowiu kablowego do stosunkowo dużych ujemnych potencjałów.

Zebrane dotychczas wyniki pozwoliły na wyciągnięcie wniosków co do niszczenia kabli w pewnych warunkach ochrony katodowej i na opracowanie wskazówek dotyczących racjonalnego stosowania ochrony katodowej.

Sugerowanych w pierwszej części badań nad określaniem wartości pH w najbliższym otoczeniu kabla chronionego katodowo nie przeprowadzono, gdyż badania póltechniczne z odcinkami kabli w osłonach włóknistych i opancerzeniu wykazały, że katodowa alkalizacja środowiska nie wpływa w sposób wyraźny na korozję ołowiu.

## 2. PRZYCZYNY NISZCZENIA KABLI W WARUNKACH OCHRONY KATODOWEJ

Ochrona katodowa jako metoda zabezpieczenia konstrukcji metalowych przed korozją przeszła już swój inkubacyjny okres w ciągu ostatnich 30 lat i nie jest dziś rozpatrywana w kołach fachowców jako ciekawostka techniczna. W wielu krajach przewiduje się ją, obok tradycyjnych a nawet nowoczesnych osłon ochronnych, już przy projektowaniu konstrukcji w celu zabezpieczenia tworzywa konstrukcyjnego przed niszczeniem na skutek wpływów otoczenia.

Badania laboratoryjne i obserwacje konstrukcji metalowych chronionych katodowo wykazują, że w pewnych warunkach, mimo stosowania ochrony katodowej, konstrukcja ulega niszczeniu.

Niszczenie to przypisywano dużym gęstościom prądu ochrony, alkalicznemu środowisku, jakie wytwarza się wokół konstrukcji będącej w stanie katodowym itd. Alkaliczne środowisko tworzące się w trakcie polaryzacji katodowej jest szczególnie niebezpieczne dla metali takich, jak ołów lub aluminium. Metale wymienione ulegają niszczeniu zarówno w kwasach, jak i alkaliach. Stąd zachowanie się ołowiu w warunkach ochrony katodowej jest przedmiotem ciągłych badań.

Wielu badaczy zajmujących się zagadnieniem korozji katodowej ołowiu podkreśla, że korozja tego typu zachodzi szczególnie łatwo w elektrolitach zawierających sole metali alkalicznych, np. NaCl [1], [2], przy czym intensywność korozji zależy od koncentracji soli i od składu ołowiu, a także od gęstości prądu ochrony. Tłumaczy się to tym [3], że w czasie polaryzacji katodowej jony wodoru wędrują do katody, gdzie redukują się do gazowego wodoru. Ten ostatni ulatnia się ze środowiska przykatodowego. Miejsce zanikających jonów wodorowych przy katodzie zajmują równoważne elektrycznie jony sodu  $\text{Na}^+$ . Jony te tworzą z jonami wodorotlenowymi  $\text{OH}^-$ , pozostałymi po zredukowaniu jonu wodorowego  $\text{H}^+$ , ług NaOH będący powodem silnego alkalizowania środowiska. W neutralnym roztworze chlorku sodu obserwowano np. bardzo silną korozję ołowiu.

Badania polaryzacji katodowej ołowiu w różnych gruntach wskazywały, że korozja katodowa w zwykłych niezasolonych gruntach zachodziła przy bardzo różnych wartościach potencjałów, np. w torfie i glinie przy  $-4$

do  $-5$  V. W gruntach suchszych obserwowano ją dopiero przy potencjałach rzędu  $-10$  V. W gruntach słonych korozja katodowa występowała już przy potencjale  $-1,5$  V względem siarczano-miedziowej elektrody odniesienia.

Można stąd wyciągnąć wniosek, że w normalnych niezasolonych gruntach potencjał ochrony może dochodzić do wartości ujemnych rzędu kilku woltów.

Ponieważ w gruntach zasolonych i w wodach słonych istnieje największe prawdopodobieństwo wystąpienia korozji katodowej, to dla konstrukcji ułożonych w takich środowiskach nie należy stosować ochrony katodowej z obcym źródłem prądu. Przy takim sposobie ochrony łatwo może wystąpić efekt „przechronienia” i związane z tym zjawisko niszczenia ołowiu.

Stwierdzono, że ołów z dodatkiem antymonu jest bardziej odporny na korozję katodową niż ołów miękki.

Badania prowadzone przez *Schwerdfegera* i in. [4], [5] wykazały, że na skutek ochrony katodowej na powierzchni metalu zanurzonego w elektrolicie odkładają się naturalne osłony ochronne z węglanów lub krzemianów. Osłony te, jak dowodzą autorzy, są całkowicie odporne na korozję w słonej wodzie. Ochronna osłona utworzona z osadów katodowych na powierzchni konstrukcji metalowej utrzymuje się w wielu przypadkach przez dłuższy okres czasu po wyłączeniu prądu ochrony.

Naturalne osłony ochronne wytworzone w trakcie działania polaryzacji katodowej są zjawiskiem dodatnim, gdyż nie tylko chronią metal przed wpływami otoczenia, ale także przyczyniają się do zmniejszenia zapotrzebowania prądu ochrony.

Naturalne osłony ochronne pokrywające szczelnie powierzchnię metalu przyczyniają się do uodpornienia go na wpływy środowiska zmienionego wskutek polaryzacji katodowej. Tym się prawdopodobnie tłumaczy fakt, że ołów nie zawsze koroduje w przypadku stosowania ochrony katodowej w środowiskach słonych przy zbyt ujemnych potencjałach polaryzacji.

Niezbyt duże gęstości prądu ochrony zastosowane w pierwszym okresie pracy urządzeń ochrony katodowej sprzyjają powstawaniu bardziej zwartej i silniej przylegającego do powierzchni osadu katodowego.

Osady katodowe mają jeszcze tę zaletę, że przedłużają okres depolaryzacji konstrukcji metalowej po wyłączeniu prądu ochrony. Okres ten trwa w zależności od warunków od kilku do kilkudziesięciu minut. W ten sposób krótkotrwałe przerwy w dopływie prądu ochrony nie wpływają jeszcze w sposób wyraźny na zmiany potencjału ochrony.

Na marginesie można dodać, że okres depolaryzacji konstrukcji po wyłączeniu ochrony katodowej wykorzystano w nowej technice ochrony, mianowicie w tak zwanej ochronie katodowej z relaksacją potencjału [6],

w której ilość elektryczności dostarczana konstrukcji dla jej katodowego spolaryzowania jest regulowana automatycznie, w zależności od warunków lokalnych.

W praktyce stosowania ochrony katodowej szkody występują przede wszystkim na konstrukcjach pozbawionych osłon ochronnych [7]. Zauważono np. uszkodzenia rurociągów stalowych, gdy znajdowały się one w alkalicznym gruncie suchym. Zjawisko to spostrzeżono również w trakcie własnych badań na kablach nie posiadających osłony ochronnej, tłumacząc je niedostateczną ochroną.

Na skutek okresowych suszy mogą wystąpić w niektórych miejscach ograniczenia w dopływie prądu ochrony. Wtedy na pewnych odcinkach konstrukcji ochrona katodowa jest niewystarczająca i w sprzyjających warunkach może występować korozja.

W skalistych miejscowościach górskich, gdzie oporności gruntu są rzędu dziesiątków tysięcy lub kilku milionów omów/cm, mogą również wystąpić przerwy w dopływie prądu ochrony na skutek okresowego wysuszenia dróg przewodzących. W takich przypadkach krótkie odcinki konstrukcji pozbawione ochrony katodowej chroni się za pomocą taśm magnezowych.

Prądy ochrony katodowej prowadzą, jak już wspomniano, do nagromadzenia anionów w warstwie granicznej metal-elektrolit glebowy. Obok węglanów, krzemianów i fosforanów gromadzą się tam także jony siarczanowe. Wydawać mogłoby się, że te ostatnie stwarzają korzystne warunki dla pracy bakterii glebowych, a tym samym dla korozji biologicznej.

W praktyce korozja biologiczna w warunkach ochrony katodowej nie występuje, gdyż alkaliczna strefa przykatodowa, w której pH dochodzi do wartości powyżej 9, uniemożliwia działalność bakterii glebowych. Dlatego niekiedy korzystne jest podwyższenie gęstości prądu ochrony w celu uzyskania odpowiedniej alkalizacji środowiska.

Goldstein [8] w swoich badaniach nad ochroną katodową dochodzi do wniosku, że jony wapnia znajdujące się w otoczeniu konstrukcji chronionej mają duży wpływ na potencjał spolaryzowanej konstrukcji. Z przeprowadzonych przez niego badań wynika, że konstrukcja metalowa zakopana w gruncie obfitującym w związki wapnia może być „niedochroniona” katodowo przy potencjale przyjmowanym ogólnie jako kryterium ochrony. W gruntach z nadmiarem soli wapnia zaobserwował on powolne przesuwanie się potencjału ochrony w kierunku wartości dodatnich. W związku z tym potencjał ochrony należy tak dobierać, aby wartość jego była o 20—30% wyższa od wartości przyjmowanych na ogół jako kryterium ochrony (a więc zamiast  $-0,85$  V należy przyjąć potencjał ochrony  $-1,0$  do  $-1,1$  V względem siarczano-miedziowej elektrody odniesienia).

*Galimberti* [9] w badaniach nad korozją ołowiu pod wpływem prądu zmiennego dowodzi, że polaryzacja katodowa nawet przy niewielkich gęstościach prądu przeciwdziała korozji ołowiu powodowanej prądami zmiennymi. W takich przypadkach zwykle wystarczy galwaniczne połączenie ołowiu z metalami anodowymi takimi, jak cynk, żelazo albo magnez. W obecności prądu zmiennego na anodzie magnezowej może jednak wystąpić zjawisko prostowania, co w konsekwencji doprowadzi do anodowej polaryzacji ołowiu, a co za tym idzie do jego korozji. Zjawisko to może być mylnie interpretowane jako korozja katodowa.

Dokładna analiza warunków lokalnych przed zainstalowaniem ochrony katodowej na kablu zapobiegnie ujemnym skutkom niewłaściwego doboru materiału anodowego.

Rodzaj gruntu ma duży wpływ na działanie ochrony katodowej. Oprócz wspomnianego wyżej wapnia, wartość potencjału potrzebnego dla pełnej ochrony katodowej mogą warunkować: oporność właściwa gruntu i stopień jego napowietrzenia [10]. Słabsze działanie polaryzujące obserwuje się np. w gruntach dobrze napowietrzonych, suchych o dużej oporności właściwej. Wiąże się to, oczywiście, z łatwym przenikaniem depolaryzatora (tłenu) do powierzchni katody. Stosując więc ochronę katodową na długich konstrukcjach przechodzących przez różne rodzaje gruntu może się zdarzyć, że pewne odcinki konstrukcji będą miały niewystarczającą ochronę i będą korodować.

Rozkład potencjałów mierzonych ogólnie przyjętymi metodami wzdłuż konstrukcji może nie wskazać na obecność procesów korozyjnych. Odczytane na przyrządzie wartości pomiarowe mogą się mieścić w granicach przyjętego kryterium ochrony. Przyczyna tego stanu rzeczy leży w niewłaściwie przeprowadzonym pomiarze potencjału konstrukcji chronionej.

Sprawa błędów pomiarowych przy kontroli urządzeń chronionych katodowo jest bardzo ważna, często bowiem uszkodzenia korozyjne występujące na konstrukcji chronionej przypisuje się korozji katodowej przyjmując, że potencjał ochrony jest zbyt ujemny.

### **3. POMIAR POTENCJAŁU KABLA W TRAKCIE OCHRONY KATODOWEJ**

#### **3.1. Wyjaśnienia wstępne**

Przy ochronie katodowej metal chroniony jest polaryzowany przez prądy ochrony do takich potencjałów, przy których reakcje korozyjne są niemożliwe z energetycznego punktu widzenia. Jako najbardziej miarodajne kryterium ochrony konstrukcji przyjęto potencjał ochrony [1], [11], [13],

[14]. Zagadnienie mierzenia potencjału na elektrodzie, przez którą przepływa prąd, a więc na kablu chronionym musi być specjalnie omówione. Wydaje się, że problem ten nie powinien nasuwać żadnych trudności, gdyż pomiary tego rodzaju stosowane są bardzo często przy laboratoryjnych badaniach elektrochemicznych. Praktyka jednak wykazuje, że wynik pomiaru potencjału konstrukcji, przez którą przepływa prąd ochrony, jest prawie zawsze obciążony błędem wynikającym ze spadku napięcia na drodze między konstrukcją a elektrodą odniesienia. Błąd jest tym większy, im większe jest natężenie prądu ochrony. Przy ochronie katodowej błąd objawia się tym, że zmierzona, nazwijmy ją „pozorna” wartość potencjału jest bardziej ujemna, niż wartość rzeczywista potencjału ochrony [15]. Stąd ocena pełnej ochrony katodowej może być mylnie interpretowana. W praktyce zdarza się, że pozorny potencjał kabel-ziemia jest bardziej ujemny, a potencjał rzeczywisty, wolny od omowego spadku napięcia, ma wartość bardziej dodatnią w stosunku do potencjału przyjmowanego jako kryterium ochrony.

Według współczesnych pojęć elektrochemii polaryzacja elektrod ma trzy zasadnicze przyczyny:

1) nadnapięcie przejścia przez granicę faz (metal-elektrolit) nośników ładunku;

2) polaryzacja koncentracyjna powstająca na skutek tego, że przy przepływie prądu zmieniają się koncentracje czynników biorących udział w reakcjach elektrodowych;

3) tak zwana polaryzacja opornościowa, która z jednej strony ma swoje źródło w spadku napięcia na oporności właściwej elektrolitu pomiędzy konstrukcją a elektrodą odniesienia, z drugiej strony — w źle przewodzących błonkach pokrywających konstrukcję metalową lub osłonach ochronnych. W obu przypadkach polaryzacja opornościowa nie bierze udziału w reakcjach chemicznych.

Dla potencjału ochrony katodowej, a tym samym działania ochronnego, miarodajnymi wielkościami są jedynie polaryzacja przejścia i polaryzacja koncentracyjna, nazywane często polaryzacją elektrochemiczną w odróżnieniu od opornościowej.

Metody eliminowania omowego spadku napięcia (tak zwanej polaryzacji opornościowej) polegają w głównej mierze na wykorzystaniu stałych czasu poszczególnych rodzajów polaryzacji. Zagadnieniem stałych czasu przy ochronie katodowej zajmował się *Schwenk* [11], [12]. Stwierdził on, że przy nagłej zmianie prądu polaryzującego zmienia się prawie momentalnie polaryzacja opornościowa, czyli omowy spadek napięcia, natomiast polaryzacja elektrochemiczna zmienia się o wiele wolniej. Ponadto obli-



czył on, że błąd pomiarowy spowodowany polaryzacją elektrochemiczną jest niewielki, nie przekraczający mianowicie 50 mV.

Błędu wynikającego z polaryzacji opornościowej można by uniknąć, gdyby udało się elektrodę odniesienia umieścić w warstwie granicznej, to znaczy w miejscu, w którym metal styka się ze środowiskiem elektrolitycznym. Elektrodę odniesienia można przybliżyć tylko w warunkach laboratoryjnych do powierzchni konstrukcji chronionej przez zastosowanie sondy kapilarnej. Wg *Barnartta* [16] optymalne ustawienie sondy będzie w odległości równej podwójnej średnicy sondy. Przy takim ustawieniu błąd pomiarowy powodowany omowym spadkiem napięcia jest minimalny.

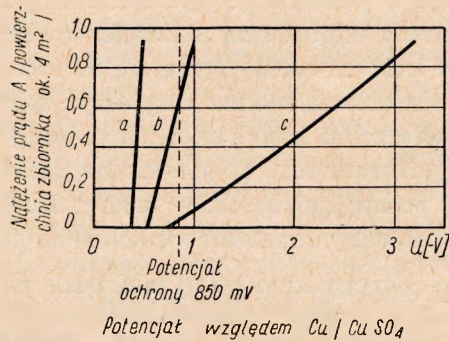
Jednak w praktyce ochrony katodowej mierzenie potencjału za pomocą tego rodzaju sondy jest nierealne. Zwykle przy pomiarze potencjału konstrukcji chronionej elektrodę umieszcza się możliwie blisko konstrukcji, to jest na powierzchni ziemi, na osi konstrukcji. Ale i tak mierzony potencjał jest obciążony zawsze błędem wynikającym z omowego spadku napięcia na oporności ziemi.

W przypadku ważnych konstrukcji podziemnych elektrodę odniesienia w specjalnym porowatym naczyniu zakopuje się na stałe w najbliższym otoczeniu konstrukcji [17], wyprowadzając przewód na powierzchnię ziemi do punktu pomiarowego. Jest to o tyle korzystne, że potencjał kabla mierzy się zawsze w tym samym miejscu, unikając błędów powodowanych różnym usytuowaniem elektrody pomiarowej. Robienie wykopów w celu ustawienia elektrody w pobliżu kabla jest raczej niewygodne.

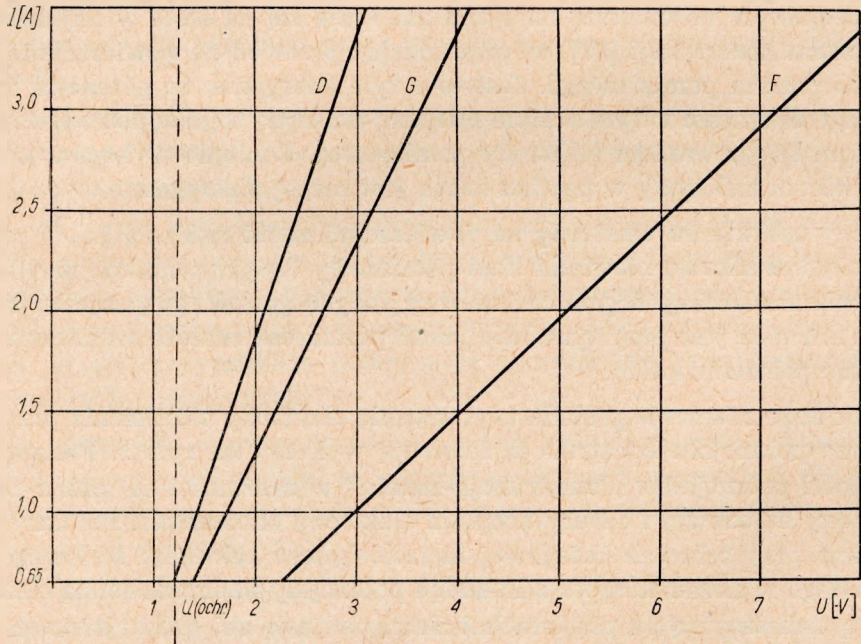
Przy ustawianiu elektrody na powierzchni ziemi nad osią kabla popełnia się stosunkowo niewielki błąd pomiarowy (w przypadkach niedużych oporności właściwych gruntu i niezbyt dużych gęstości prądu polaryzującego). Ważne jest przy tym, aby przed pomiarem znaleźć szukaczem dokładne położenie kabla.

Jak duże znaczenie posiada usytuowanie elektrody odniesienia przy pomiarze potencjału konstrukcji, ilustrują wykresy na rys. 1. Podają one wartości potencjałów „konstrukcja-ziemia” w zależności od zmian prądu ochrony katodowej i od usytuowania elektrody odniesienia. Pomiary wykonano przy ochronie katodowej niez izolowanego zbiornika stalowego zakopanego w ziemi. Krzywa *a* ilustruje potencjały mierzone sondą elektrodową umieszczoną na powierzchni ziemi nad osią zbiornika; krzywa *b* — potencjały mierzone sondą umieszczoną w odległości 1 m od osi zbiornika; krzywa *c* — potencjały mierzone sondą pomiarową ułożoną bezpośrednio w ziemi przy ścianie zbiornika. Z rysunku widać, że ze wzrostem natężenia prądu w obwodzie ochrony oraz odległości pomiędzy konstrukcją chronioną a elektrodą odniesienia błąd pomiarowy szybko wzrasta.

Podobne pomiary przeprowadzono na doświadczalnym odcinku kabla koncentrycznego chronionego katodowo, zmieniając natężenie prądu w ob-



Rys. 1. Charakterystyki prądowo-napięciowe niezolowanego zbiornika stalowego zakopanego w ziemi w zależności od usytuowania elektrody odniesienia [11]  
*a* — mierzone sondą na powierzchni ziemi nad środkiem zbiornika, *b* — mierzone sondą umieszczoną na powierzchni ziemi w odległości 1 m od środka zbiornika,  
*c* — mierzone sondą umieszczoną bezpośrednio przy zbiorniku

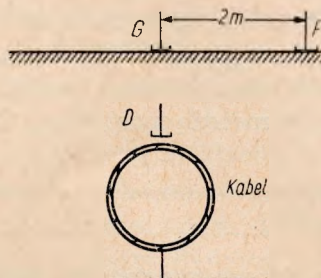


Rys. 2. Charakterystyki prądowo-napięciowe kabla współosiowego w osłonie ochronnej i opancerzeniu (ulożonego w glebie piaszczystej) w zależności od usytuowania elektrody odniesienia. Kabel chroniony katodowo przy potencjale ochrony  $-1,2$  V względem siarczano-miedziowej elektrody odniesienia  
*D* — elektroda odniesienia zakopana bezpośrednio nad kablem, *G* — elektroda odniesienia ustawiona na powierzchni ziemi nad osią kabla, *F* — elektroda odniesienia ustawiona na powierzchni ziemi w odległości 2 m w bok od osi kabla

wodzie ochrony od 0,65 A do 3,5 A. Wyniki przedstawiono na wykresie (rys. 2).

Początkowy potencjał ochrony kabla zmierzony za pomocą elektrody zakopanej bezpośrednio nad kablem wynosił  $-1,2$  V przy natężeniu prądu 0,65 A.

Pomiary potencjału wykonane elektrodą odniesienia zakopaną bezpośrednio nad kablem w ziemi ilustruje krzywa *D*. Krzywa *G* odpowiada elektrodzie ustawionej na powierzchni ziemi na osi kabla oraz krzywa *F* elektrodzie odniesienia ustawionej na powierzchni ziemi w odległości 2 m od osi kabla. Miejsce usytuowania elektrody odniesienia pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Schemat usytuowania elektrody odniesienia przy pomiarach potencjałów na kablu współosiowym

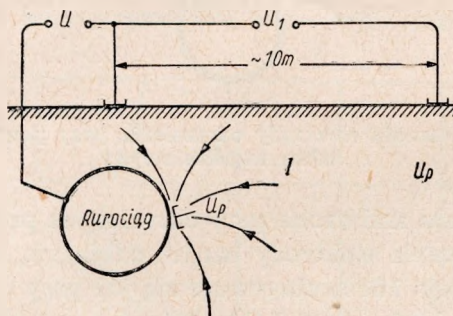
Wartości potencjału zmierzone przy określonym prądzie ochrony w zależności od usytuowania elektrody bardzo odbiegają od siebie. Dużą różnicę dochodzącą do ok. 100% obserwuje się już przy odsunięciu elektrody odniesienia o 2 m w bok od osi kabla. W miarę wzrostu natężenia prądu różnica ta pogłębia się jeszcze bardziej.

### 3.2. Metody oznaczania potencjału rzeczywistego, wolnego od omowego spadku napięcia

Różne stałe czasu poszczególnych rodzajów polaryzacji wykorzystywane były od dawna w kinetyce reakcji elektrodowych do określania etapów reakcji. *Schwenk* określił stałe czasu ważne dla procesów zachodzących przy ochronie katodowej; np. stała czasu dla polaryzacji opornościowej dla metalu niez izolowanego zanurzonego w roztworze wodnym wynosi około  $10^{-7}$  sek. Stała czasu dla polaryzacji opornościowej w przypadku metalu posiadającego dobrą, nieporowatą izolację jest rzędu  $\sim 10^{-4}$  sek. Tego samego rzędu jest stała czasu polaryzacji przejścia nośników ładunku przez warstwę graniczną, natomiast stała czasu polaryzacji koncentracyjnej wynosi od kilku sekund do kilkunastu godzin [13]. Przez zastosowanie oscylografu z zanikającą poświatą udało się *Schwenkowi* wykazać, że po-

laryzacja powodowana przejściem ładunków dla katodowo spolaryzowanych powierzchni żelaznych w ziemi jest stosunkowo mała, nie przekracza mianowicie 50 mV. Skok potencjału jest więc w głównej mierze określany bardzo szybką polaryzacją opornościową. Metody oznaczania potencjału rzeczywistego konstrukcji opierają się na tym zjawisku. Są to metody wyłączeniowe i przełączeniowe, polegające na tym, że pomiar potencjału elektrody dokonywany jest przy chwilowym wyłączeniu prądu ochrony względnie przy zmianie natężenia prądu ochrony. Do pomiarów używa się przyrządów wskazówkowych z wyłącznikiem czasowym regulowanym w granicach do 1 sekundy. Dla przerywania lub obniżania katodowego prądu ochrony używa się nastawnych wyłączników czasowych. W przypadku obecności prądów błądzących zalecane są czasy włączenia i wyłączenia prądu ochrony, w granicach 1—5 minut.

Do mierzenia potencjału rzeczywistego, wolnego od omowego spadku napięcia *Pearson* zastosował metodę mostkową [17].



Rys. 4. Schemat ustawienia elektrod pomiarowych do obliczania spadku napięcia w ziemi [15]

Tablica 1

Wartości liczbowe do przykładowego obliczenia potencjału rzeczywistego konstrukcji ( $U_p$ )

Prąd w obwodzie ochrony [A]	Potencjał konstrukcji [V]	Różnica potencjałów między elektrodami odniesienia [V]
$I$	$U = -1,4$	$U_1 = 0,16$
$I + \Delta I$	$U' = -1,5$	$U'_1 = 0,18$
Przyrosty napięć $\Delta U$ i $\Delta U_1$	$\Delta U = 0,1$	$\Delta U_1 = 0,02$
$U_p = 1,4 - 0,16 \cdot \frac{0,1}{0,02} = 0,6 \text{ V}$		

Omowy spadek napięcia w glebie można także wyliczyć matematycznie znając spadek napięcia na powierzchni ziemi. Przykład takiego obliczania podał *Sudrabin* [cyt. 15] dla rurociągu ułożonego w zasolonej suchej glebie. Schemat ideowy ustawienia elektrod przy pomiarze potencjału wg *Sudrabina* podano na rys. 4, zaś w tabl. 1 zestawiono wartości liczbowe do przykładowego obliczenia potencjału rzeczywistego  $U_p$ .

W przykładzie opisanym przez *Sudrabina* potencjał zmierzony na źle izolowanym rurociągu (przy ustawieniu elektrod odniesienia na powierzchni ziemi) wynosił  $-1,4$  V względem siarczano-miedziowej elektrody odniesienia. Mimo tak wysokiej wartości ujemnej potencjału występowały uszkodzenia korozyjne na chronionym katodowo rurociągu.

W glebach o wysokiej oporności przy złej izolacji konstrukcji w wartości zmierzonego potencjału duży udział stanowi omowy spadek napięcia w glebie. W podanym przykładzie omowy spadek napięcia wynosił  $0,8$  V, tzn. że potencjał rzeczywisty wolny od omowego spadku napięcia był  $-0,62$  V względem niepolaryzującej elektrody siarczano-miedziowej.

Obliczenia przeprowadzono na podstawie następujących rozważań. Płynący w glebie prąd ochrony  $I$  jest w takim stosunku do zmiany prądu  $\Delta I$ , jak napięcie  $U_1$  mierzone pomiędzy dwiema elektrodami pomiarowymi (ustawionymi w odległości ok. 10 m od siebie) do zmiany napięcia  $\Delta U_1$ ; stąd

$$I = \Delta I \frac{U_1}{\Delta U_1}$$

Ponieważ zmiana natężenia prądu  $\Delta I$  i wywołana przez nią zmiana potencjałów  $\Delta U$  nie zmienia właściwego napięcia polaryzacji na granicy faz rurociąg-gleba, to zależność tych dwu wielkości określa oporność  $R$  pomiędzy rurociągiem i elektrodą odniesienia

$$R = \frac{\Delta U}{\Delta I}$$

Znając  $I$ ,  $R$  i potencjał konstrukcji  $U$ , można już łatwo wyliczyć potencjał rzeczywisty  $U_p$

$$U_p = U - IR = U - U_1 \frac{\Delta U}{\Delta U_1}$$

Pomiary porównawcze wykonywane różnymi metodami dawały, z wyjątkiem metody przełączeniowej, wyniki niepowtarzalne. Ten stan rzeczy ma swoje źródło w niemożności ustawienia krótkiego czasu przełączenia przy stosowaniu mostka Pearsona i przy ustawianiu zera w obecności prądów błądzących.

Obecnie są prowadzone za granicą badania zmierzające do technicznego ulepszenia aparatury pomiarowej. W związku z tym należy się spodziewać,

że problem właściwego pomiaru rzeczywistego potencjału konstrukcji będzie w praktyce pomyślnie rozwiązany.

W zakończeniu rozważań teoretycznych należy jeszcze raz podkreślić, że korozja kabla w warunkach ochrony katodowej może mieć różnorodne przyczyny, najczęściej jednak jest to normalna korozja anodowa występująca w miejscach niedostatecznej polaryzacji katodowej.

Zwykle pomiary potencjałów stosowane szeroko w praktyce ochrony katodowej nie wskażą miejsc „niedochronionych”, gdyż nie eliminują one spadku napięcia na oporności środowiska.

Spadek napięcia posiadający niekiedy duży udział w zmierzonej wartości potencjału konstrukcji chronionej prowadzi często do fałszywej interpretacji potencjału ochrony.

## 4. BADANIA LABORATORYJNE I POLOWE

### 4.1. Kierunek i cel badań

W badaniach laboratoryjnych i polowych nad intensywnością tzw. korozji katodowej zwrócono uwagę na następujące czynniki:

— wpływ środowiska alkalicznego wytwarzanego w czasie polaryzacji katodowej ołowiu;

— wpływ nadmiernego wydzielania wodoru na zachowanie się tradycyjnych osłon ochronnych na kablu;

— wpływ warunków gruntowych na wyniki pomiaru potencjału i ocenę kryterium ochrony katodowej;

— wpływ niewłaściwie dobranego kryterium ochrony na zachowanie się kabla w trakcie ochrony katodowej.

Celem badań było ustalenie warunków, w jakich kabel obołowiony może korodować, mimo zastosowania polaryzacji katodowej. Dla uzyskania szybkich efektów nadmiernej ochrony katodowej stosowano w badaniach laboratoryjnych duże gęstości prądu i w związku z tym duże przesunięcia potencjału w kierunku ujemnym. Do badań użyto ołów stosowany w przemyśle kablowym zarówno miękki, jak i twardy. Polaryzację katodową próbek ołowiu prowadzono w różnych rodzajach gruntów naturalnych oraz w wyciągach wodnych tych gruntów.

### 4.2. Badania laboratoryjne

Badania prowadzone były w dwu etapach: w pierwszym badano charakterystyki elektrochemiczne i zmiany korozyjne na próbkach ołowiu nie posiadających osłony ochronnej, w drugim etapie badano charaktery-

styki elektrochemiczne i zmiany korozyjne na odcinkach kabli posiadających papierowo-jutową osłonę ochronną i opancerzenie stalowe.

Próbki katod zastosowanych w etapie pierwszym były wykonane z ołowiu miękkiego o następującym składzie:

Ag — 0,002‰	Cu — 0,002‰
As — 0,001‰	Fe — 0,001‰
Sb — 0,003‰	Zn — 0,001‰
Sn — 0,001‰	Bi — 0,010‰
ołów do 100‰	

Z ołowiu miękkiego przygotowano próbki w kształcie krążków z wyprowadzonym po jednej stronie przewodem kontaktowym. Próbki zatapiano w żywicy epoksydowej odsłaniając na działanie elektrolitu powierzchnię 0,78 cm<sup>2</sup>. Powierzchnię ołowiu przed przystąpieniem do badań spolerowano i przemyto rozpuszczalnikiem. Układ badaniowy składał się z komórki elektrolitycznej o wymiarach 10 × 20 × 15 cm, źródła prądu stałego, sta-

Tablica 2

**Własności fizyko-chemiczne gruntów  
użytych do badań elektrochemicznych nad korozją ołowiu  
w warunkach polaryzacji katodowej**

Rodzaj gruntu	Zawar- tość wilgoci %	pH	CaCO <sub>3</sub>	Zawartość jonu		H <sub>2</sub> S	Utlenial- ność w % tlenu
				Cl' %	NO <sub>3</sub> ' %		
Torfiasty	78,02	5,6	nie wykryto	0,007	0,00656	nie wykryto	41,44
Bagienny	59,95	4,1	nie wykryto	0,005	0,00146	nie wykryto	28,01
Gliniasty	15,31	5,5	nie wykryto	0,004	0,00063	nie wykryto	2,08
Gliniasto- -piaszcz.	12,00	7,2	średnio wapienny	0,005	0,00063	nie wykryto	1,52
Piaszczysty	17,90	7,0	nie wykryto	0,002	0,00044	nie wykryto	0,43

bilizatora prądowego i przyrządów pomiarowych. Jako elektrolity były stosowane grunty o wilgotności naturalnej, wyciągi wodne z tych gruntów (charakterystyki gruntów użytych do badań podano w tabl. 2), a także roztwory chlorku sodu o zakresie wartości pH spotykanym w gruntach naturalnych. Anodę węglową ustawiono w elektrolicie w odległości 14 cm od katody. Pomiar potencjału katody był dokonywany przy użyciu kalomelowej nasyconej elektrody odniesienia, ustawionej w najbliższym otoczeniu badanej próbki ołowiu oraz woltomierza lampowego o dużej opor-

Tabela 3

Zmiany potencjału katody przy stałej gęstości prądu dla różnych elektrolitów  
(gęstość prądu 10 mA/cm<sup>2</sup>)

Elektrolit glebowy	Potencjał ołowiu [V] <sup>1)</sup>			Wyciąg wodny z gruntu	Potencjał ołowiu [V] <sup>1)</sup>			1% roztwór chlorku sodowe- go	Potencjał ołowiu [V] <sup>1)</sup>		
	przed zastosowa- niem polaryza- cji katodo- wej	po włą- czeniu prądu polary- zującego	po 24 godz polary- zacji katodo- wej		przed zastosowa- niem polaryza- cji katodo- wej	po włą- czeniu prądu polary- zującego	po 24 godz polary- zacji katodo- wej		przed zastosowa- niem polaryza- cji katodo- wej	po włą- czeniu prądu polary- zującego	po 24 godz polary- zacji katodo- wej
Torfiasty	-0,55	-13,8	-2,5	torfiastego	-0,45	-9,8	-8,5	pH 3,3	-0,50	-1,65	-1,67
Bagienny (murszowy)	-0,45	-48,3	-4,8	bagiennego	-0,43	-33,0	-28,0	pH 7,0	-0,45	-1,65	-1,83
Gliniasty	-0,51	-13,5	-3,8	gliniastego	-0,46	-27,0	-14,0	pH 8,7	-0,55	-1,61	-1,57
Gliniasto- -piaszczysty	-0,51	-12,6	-6,0	gliniasto-piasz- czystego	-0,48	-11,0	-14,8				
Piaszczysty	-0,50	-177,0	-3,0	piaszczystego	-0,47	-35,0					

<sup>1)</sup> Względem kalomelowej elektrody odniesienia.



Tablica 4

## Zmiany pH elektrolitów w środowisku przykatodowym po zakończeniu badań

Elektrolit	Wartość pH wyjściowego przed zastosowaniem polaryzacji katodowej	Wartość pH końcowego po wyłączeniu prądu polaryzującego
Grunt torfiasty	5,6	10,6
Grunt bagienny (murszowy)	4,1	10,7
Grunt gliniasty	6,5	11,3
Grunt gliniasto-piaszczysty	7,2	11,4
Grunt piaszczysty	7,0	8,7
Wyciąg wodny z gruntu torfiastego	5,6	6,6
Wyciąg wodny z gruntu bagiennego	4,1	6,5
Wyciąg wodny z gruntu gliniastego	6,5	8,4
Wyciąg wodny z gruntu gliniasto-piaszczystego	7,2	9,4
Wyciąg wodny z gruntu piaszczystego	7,0	8,1
1% roztwór chlorku sodu	3,3	8,6
1% roztwór chlorku sodu	7,0	9,9
1% roztwór chlorku sodu	8,7	9,5

ności wewnętrznej. Komórkę elektrolityczną przykrywano plastikową przezroczystą płytką, co miało zabezpieczyć glebę przed zmianami wilgotności.

Ołów polaryzowano prądem 10 mA/cm<sup>2</sup>, utrzymując w czasie doświadczenia możliwie stałą gęstość prądu. W każdym elektrolicie badania prowadzono aż do ustalenia się wartości potencjałów, po czym dopływ prądu wyłączano i oznaczano wartości pH w próbkach elektrolitu pobranych z otoczenia katody. Średnie wartości potencjałów na początku polaryzacji katodowej i po upływie 24 godzin dla różnych elektrolitów podano w tabl. 3. W tabl. 4 zestawiono średnie wartości pH zmierzone po zakończeniu badań w środowisku przykatodowym.

Próbki ołowiu miękkiego poddane w ciągu 24 godz polaryzacji katodowej miały powierzchnię mozaikową, pokrytą niekiedy fluoryzującą błonką. Na wielu próbkach zauważono wżery korozyjne. W elektrolitach glebowych w czasie doświadczenia zbierała się woda wokół katody, a w okolicy anody zaobserwowano wysychanie gruntu. W gruntach przepuszczalnych (piaski) woda rozplywała się na pewnej przestrzeni i prawdopodobnie dlatego w piaskach obserwowano zwykle niższe pH po zakończeniu doświadczenia.

Zauważono, że w glebach piaszczystych przy polaryzacji próbki ołowiu prądem o gęstości 10 mA/cm<sup>2</sup> potencjał próbki natychmiast po zastosowa-

niu polaryzacji przesuwiał się do bardzo wysokich ujemnych wartości ( $-177$  V względem kalomelowej elektrody odniesienia). Mimo tak znacznego przesunięcia potencjału próbki ołowiu nie zauważono bardziej intensywnej w porównaniu z innymi próbkami korozji.

Początkowy potencjał polaryzacji badanych próbek kształtował się różnie w zależności od rodzaju gruntu, z upływem czasu potencjał ten obniżał się (wartość bezwzględna) i wielkość jego stabilizowała się przy pewnej minimalnej wartości.

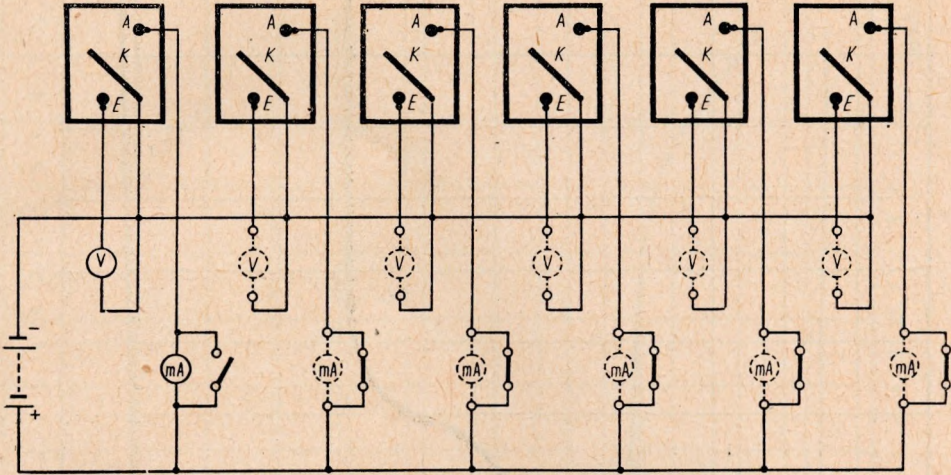
Stosując jako elektrolity wyciągi wodne gruntów nie zauważono wyraźnego przesuwania się potencjału w stronę wartości dodatnich. W wielu przypadkach potencjał obniżał się pod koniec doświadczenia. Zmiany były nieregularne. Powierzchnia ołowiu pokrywała się cienką błonką. Wydzielający się w trakcie reakcji elektrolitycznych wodór przerywał tę błonkę odsłaniając aktywną powierzchnię metalu. Tym prawdopodobnie tłumaczy się nieregularne zmiany potencjału.

W przypadku roztworów chlorku sodu o różnej wartości pH stosowanych jako elektrolit potencjał ołowiu nigdy nie osiągał wysokich wartości ujemnych po doprowadzeniu prądu polaryzującego. Wartość jego w czasie doświadczenia prawie nie zmieniała się. Odczyn elektrolitu, niezależnie od pH wyjściowego, przechodził w alkaliczny.

Z przeprowadzonych prób wynika, że próbka ołowiu zachowuje się w elektrolitach ciekłych inaczej niż w gruntach. Utrudniona w porównaniu z cieczami dyfuzja jonów i tlenu w gruntach daje zupełnie inne zależności elektrochemiczne. Dlatego też interpretacji wyników uzyskanych przy zastosowaniu elektrolitów ciekłych nie można bezkrytycznie przenosić do przypadku metalu ułożonego w gruncie.

W następnym etapie badań przeprowadzono próby z odcinkami kabla obołowionego w osłonie ochronnej jutowo-papierowej i opancerzeniu stalowym. Powłoka kabla była wykonana z ołowiu twardego o zawartości antymonu  $0,65\%$ . Powłoka kabla była połączona elektrycznie z opancerzeniem stalowym. Od miejsca lutowania opancerzenia z powłoką wyprowadzono izolowany, przewód, który łączono z ujemnym biegunem źródła prądu. Dodatni biegun był połączony z anodą węglową umieszczoną w ziemi w odległości  $40$  cm od kabla. Poddawana polaryzacji katodowej powierzchnia kabla wynosiła  $430$  cm<sup>2</sup>, a powierzchnia anody węglowej  $13$  cm<sup>2</sup>. Schemat pomiarowy układu złożonego z sześciu komórek elektrolitycznych pokazano na rys. 5.

Przed włączeniem prądu polaryzującego badano pH wyciągu wodnego gruntu, wilgotność gruntu oraz potencjał statyczny kabla. Jako źródła prądu wykorzystywano trzy stacje katodowe zasilane z sieci. Napięcie wyjściowe na zaciskach stacji katodowych było utrzymywane mniej wię-



Rys. 5. Schemat układu pomiarowego do badania korozji kabla w warunkach ochrony katodowej

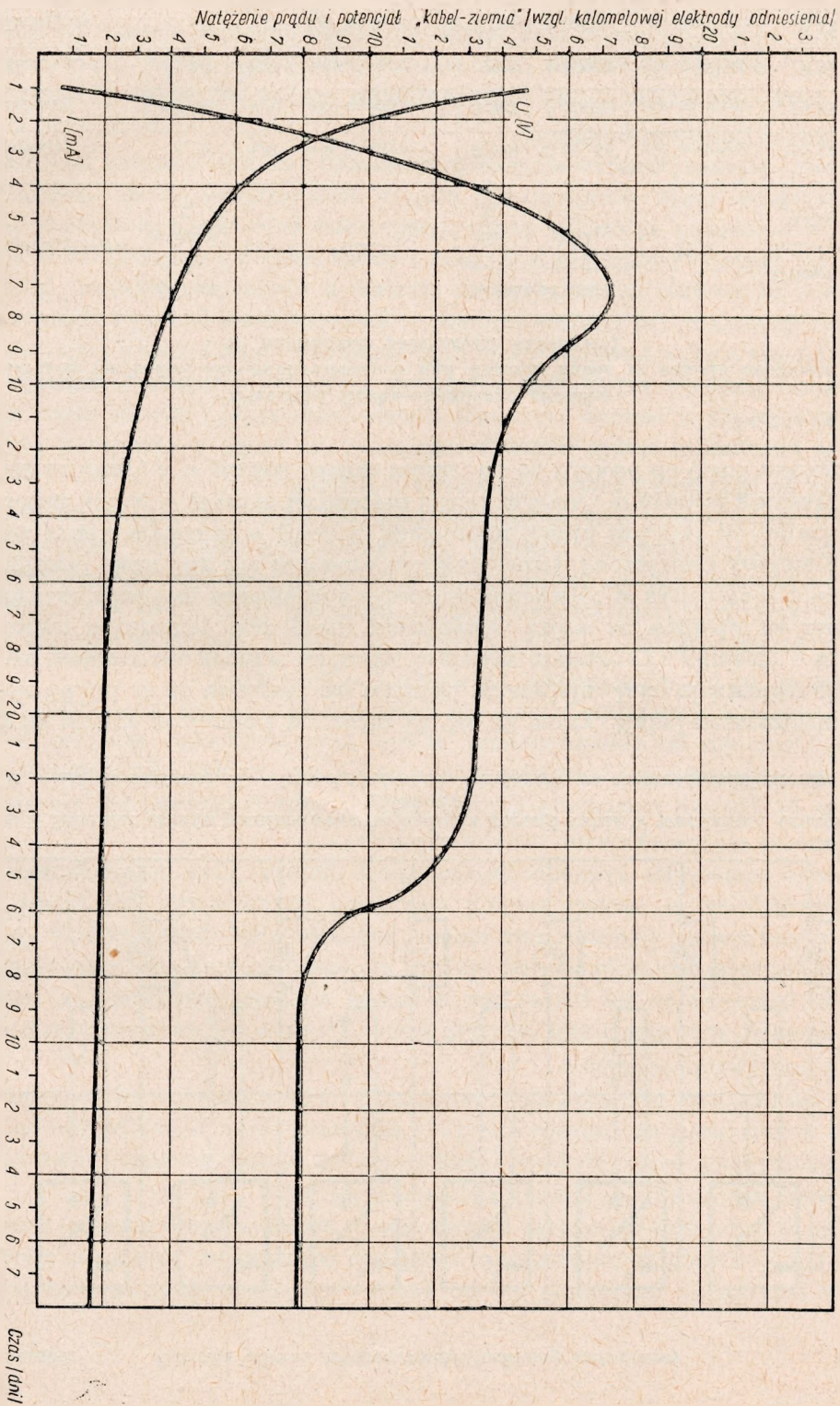
A — anoda węglowa, K — katoda-kabel, E — kalomelowa elektroda odniesienia

cej na stałym poziomie i wynosiło 16, 20, 22 woltów. Kabel polaryzowano około 50 dni aż do ustalenia się wartości potencjału. Jako elektrolity glebowe zastosowano grunty: torfiasty, bagienny (murszowy), gliniasty o wilgotności naturalnej oraz grunt piaszczysty, który ze względu na dużą oporność właściwą zawilgaczano sztucznie, dolewając w sąsiedztwie anody węglowej około litr 3<sup>0</sup>/o roztworu soli kuchennej. Początkowa średnia gęstość prądu wynosiła w gruncie bagiennym 0,0015 mA/cm<sup>2</sup> powierzchni powłoki kabla, w gruncie torfiastym 0,0021 mA/cm<sup>2</sup>, w gruncie gliniastym 0,032 mA/cm<sup>2</sup>, a w piasku bardzo różnie, bo od 0,00004 do 0,006 mA/cm<sup>2</sup>.

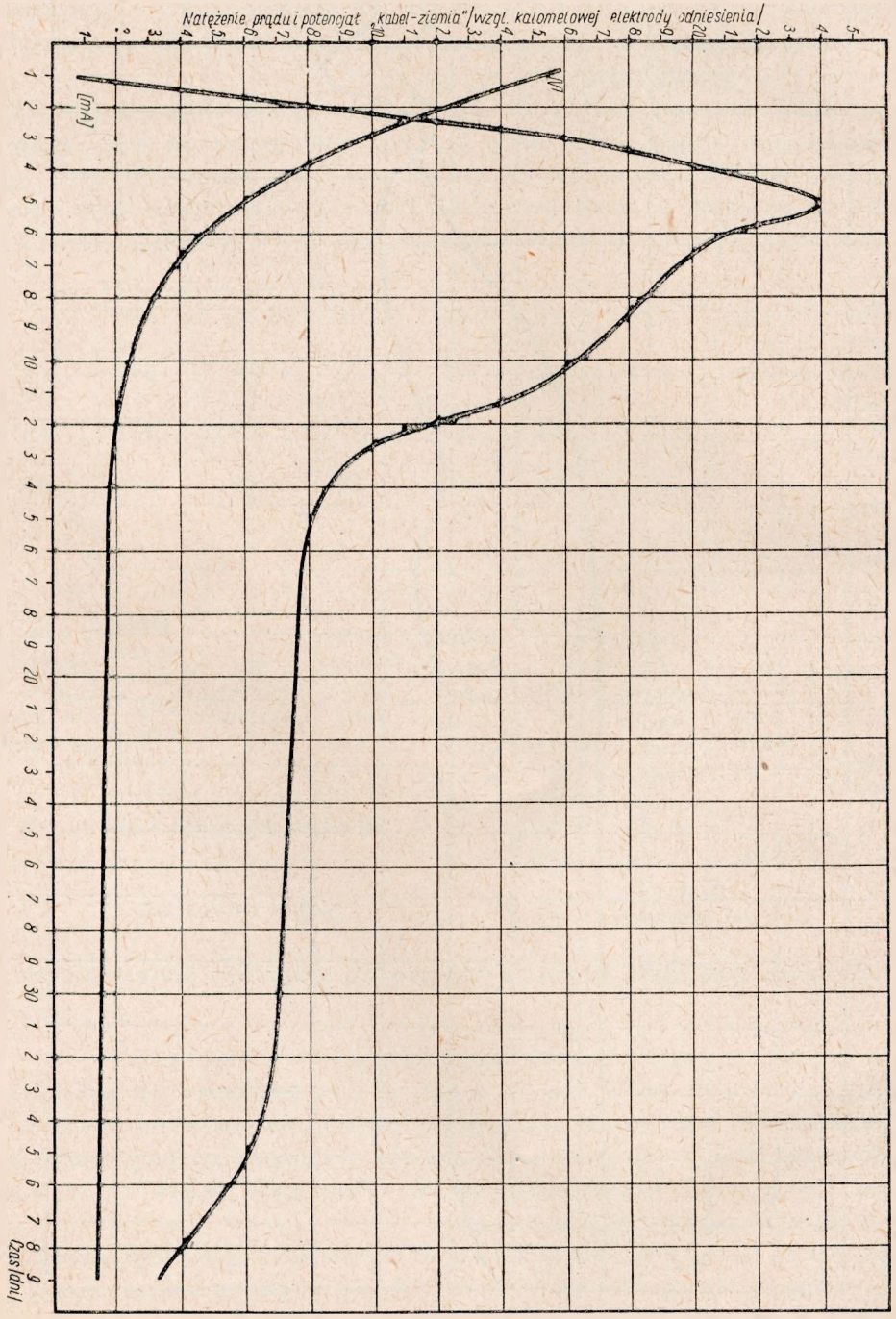
Tablica 5

**Własności fizyko-chemiczne gruntów  
użytych do badań elektrochemicznych nad korozją kabla w osłonie ochronnej  
w warunkach polaryzacji katodowej**

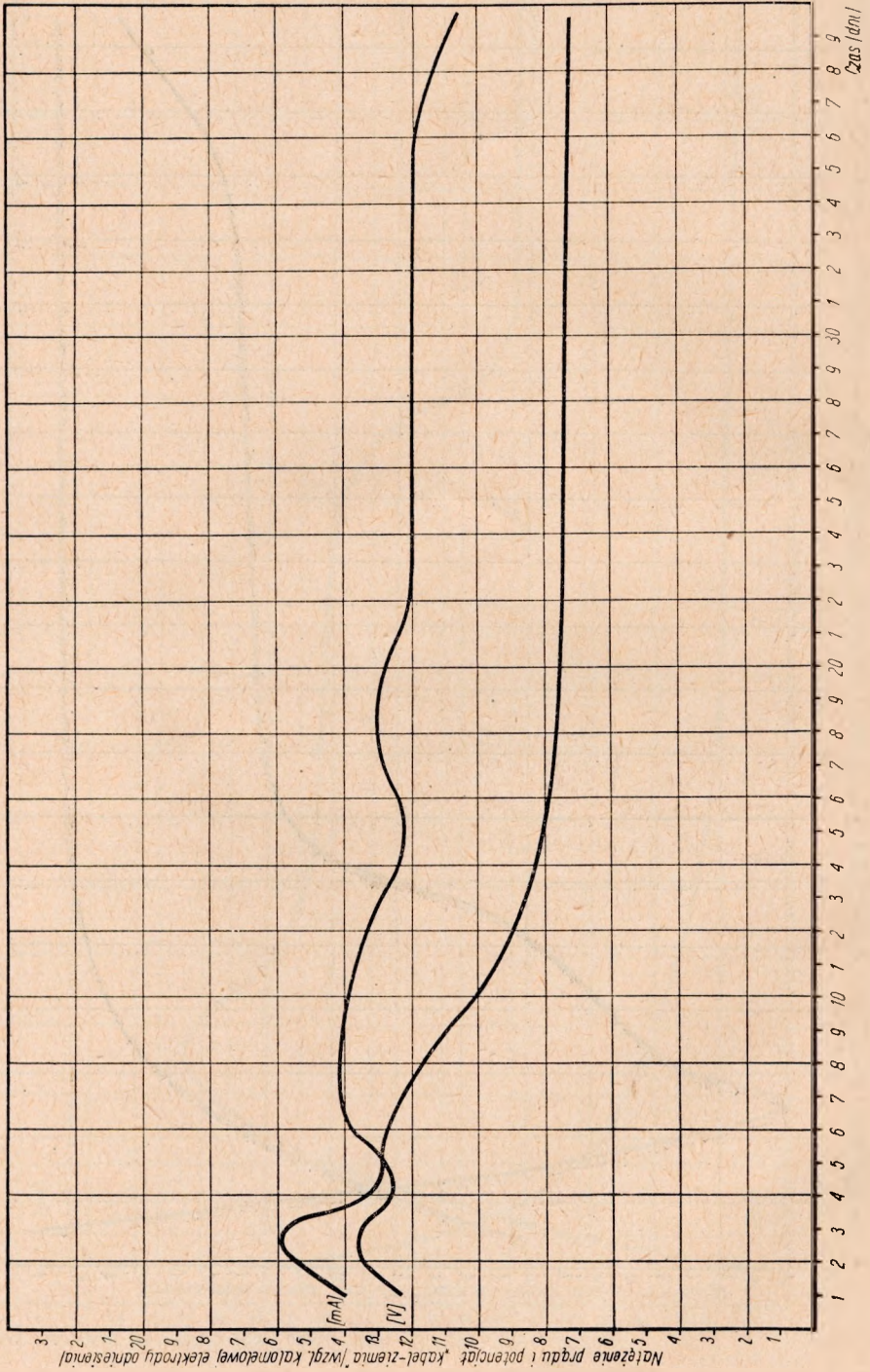
Rodzaj gruntu	Zawartość wilgoci %	pH	CaCO <sub>3</sub>	Zawartość jonu		H <sub>2</sub> S	Utlenialność w % tlenu
				Cl' %	NO <sub>3</sub> ' %		
Torfiasty	75,32	6,0	nie wykryto	0,048	0,00168	nie wykryto	55,44
Bagienny	67,00	4,5	nie wykryto	0,007	0,00038	nie wykryto	39,81
Gliniasty	25,40	7,0	wapienny	0,007	0,00020	nie wykryto	1,35
Piaszczysty	17,90	7,0	nie wykryto	0,002	0,00044	nie wykryto	0,43



Rys. 6. Wykres zmian potencjału i napięcia prądu w funkcji czasu dla kabla zakopanego w gruncie bagienym



Rys. 7. Wykres zmian potencjału i natężenia prądu w funkcji czasu dla kabla zakopanego w gruncie torfistym



Rys. 8. Wykres zmian dla potencjału i natężenia prądu w funkcji czasu dla kabla zakopanego w gruncie gliniastym

Własności fizykochemiczne gruntów użytych do badań podano w tabl. 5. Wykresy na rys. 6, 7 i 8 ilustrują zmiany potencjału kabla i natężenia prądu w funkcji czasu dla różnych gleb.

Po zakończeniu doświadczeń badano powtórnie zawartość wilgoci w gruntach przy katodzie oraz wartość pH. Zawartość wilgoci przed i po doświadczeniu, jak również wartość pH środowiska przykatodowego, dla trzech rodzajów gruntów, podano w tabl. 6, a początkowe i końcowe wartości potencjału kabla i gęstości prądu na kablu — w tabl. 7.

Tablica 6

**Wilgotność elektrolitów glebowych i wartość pH środowiska przykatodowego**

Rodzaj gruntu	Średnia wilgotność gruntu		Uby- tek wilgo- ci w trak- cie badań %	w grun- cie przed włącze- niem prądu polary- zującego	Średnia wartość pH			
	przed włącze- niem prądu %	w war- stwie przy- katodo- wej po wyłącze- niu prądu %			po wyłączeniu prądu polaryzującego			
					w war- stwie gruntu przy ka- todzie	w taśmie papiero- wej	w obwo- ju juto- wym we- wnętrz- nym	w obwo- ju juto- wym zewnętr- nym
Bagien- ny (mur- szowy)	61,6	59,1	2,5	4,5	5,0	9,3	10,0	8,1
Torfia- sty	76,7	57,6	19,1	6,0	6,5	8,4	8,5	7,5
Glinia- sty	27,0	24,5	2,5	7,0	7,5	8,4	9,0	6,2
Piasz- czysty	17,9	10,9	7,0	7,0	7,8	—	—	—

Analizując wykresy zmian potencjałów (rys. 6, 7 i 8) można zauważyć, że potencjał kabla w czasie przepływu prądu polaryzującego stale opada (wartość bezwzględna) stając się z upływem czasu bardziej dodatni. Po kilkudziesięciu dniach polaryzacji potencjał ten ustala się przy pewnej minimalnej wartości, przy czym dla gruntów bagiennych i torfiastych wartości te są bardziej dodatnie, niż dla gliny.

Podobne zależności spotykano również przy polaryzacji ołowiu miękkiego bez osłony ochronnej dla różnych rodzajów gruntów (rys. 9). Minimalne zmiany potencjału obserwowano w przypadku gruntów gliniastych, gliniasto-piaszczystych i torfiastych.

Tablica 7

**Wartości potencjałów i gęstości prądu na kablu polaryzowanym  
w różnych gruntach**

Rodzaj gruntu	Średni potencjał kabla [V] względem kalomelowej elektrody odniesienia			Średnia gęstość prądu mA/cm <sup>2</sup>	
	przed włączeniem prądu polaryzującego	wstępny po włączeniu prądu polaryzującego	po 40 dniach polaryzacji	wstępna po włączeniu prądu polaryzującego	po 40 dniach polaryzacji
Bagienny	-0,51	-14,70	- 1,80	0,0015	0,0060
Torfiasty	-0,52	-15,90	- 1,40	0,0021	0,0070
Gliniasty	-0,54	-12,50	-10,70	0,0320	0,0174

W piaskach potencjał kabla od bardzo wysokich wartości ujemnych -177 V opadał do -3,0 V względem kalomelowej, nasyconej elektrody odniesienia.

Przy polaryzacji kabla w osłonie ochronnej natężenie prądu w obwodzie w ciągu pierwszych dni szybko wzrastało. Po osiągnięciu pewnej maksymalnej wartości następował powolny spadek, niezależnie od ustabilizowanego wcześniej potencjału kabla.

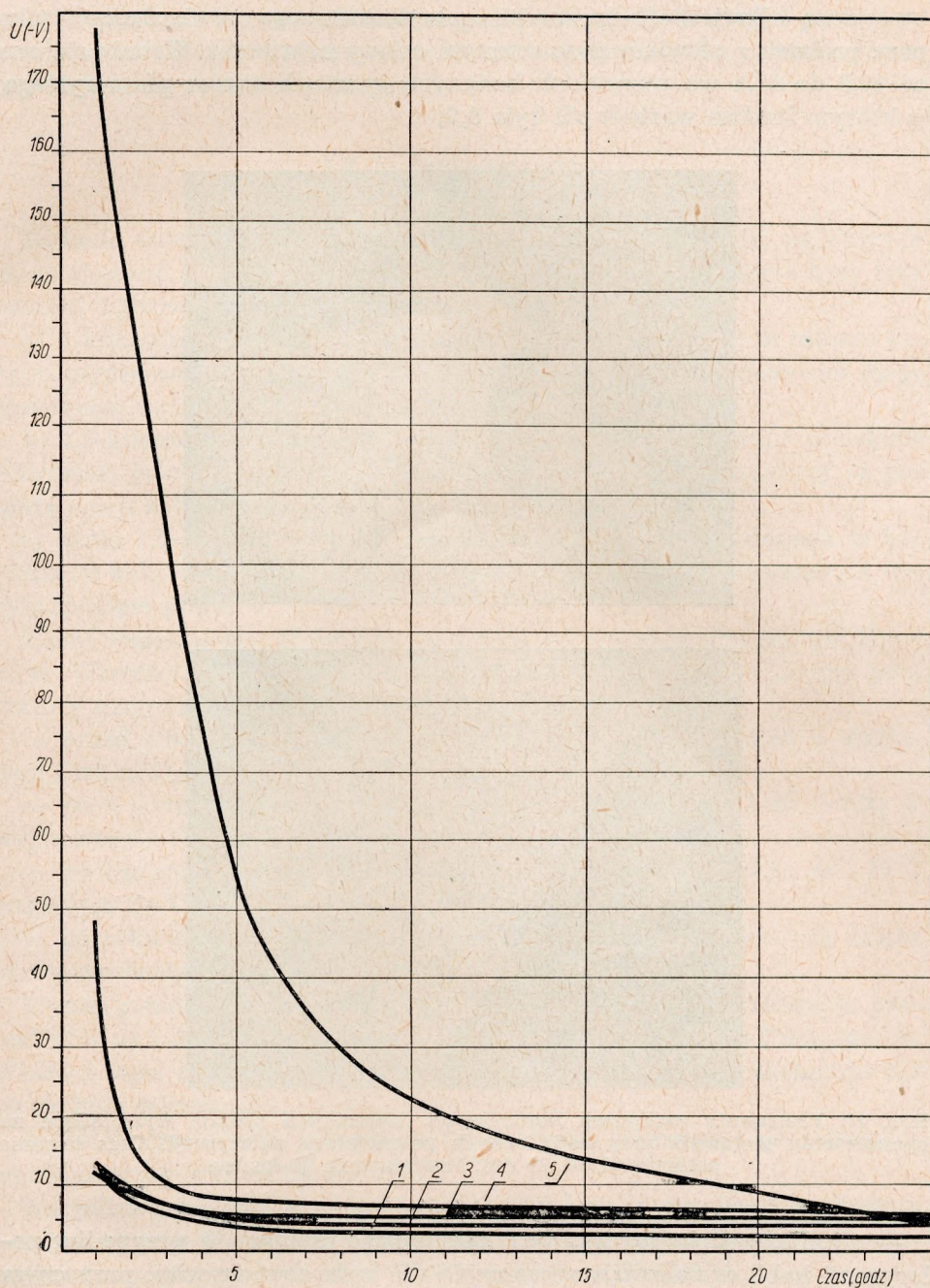
Obserwacje mikroskopowe próbek kabla w osłonie, prowadzone po wyłączeniu prądu polaryzującego, nie wykazały śladów korozji na kablu. Na ołowianej powłoce kabli polaryzowanych w gruncie bagiennym i torfiastym stwierdzono tylko cienką fluoryzującą błonkę tlenkową. Ślady korozji zaobserwowano natomiast na opancerzeniu kabla i to zarówno na taśmach zewnętrznych, jak i wewnętrznych. Taśmy opancerzenia połączone były elektrycznie z powłoką ołowianą, ponadto posiadały na swojej powierzchni polewę asfaltową, a mimo to ulegały niszczeniu we wszystkich badanych gruntach w przypadku nadmiernych potencjałów polaryzacji. Fragmenty skorodowanej taśmy opancerzenia, owijającej kabel ułożony w gruncie bagiennym pokazano na rys. 10.

W warunkach laboratoryjnych potencjał kabla mierzono w trakcie przepływu prądu przez elektrodę ołowianą. W celu zmniejszenia błędu spowodowanego omowym spadkiem napięcia elektrodę pomiarową umieszczano bezpośrednio nad kablem w ziemi, ponadto do pomiarów stosowano woltomierz o dużej oporności wewnętrznej (powyżej 9 MΩ).

Wyniki badań laboratoryjnych można zreasumować następująco:

— w trakcie badań laboratoryjnych nie obserwowano korozji ołowiu w warunkach nadmiernej polaryzacji katodowej;

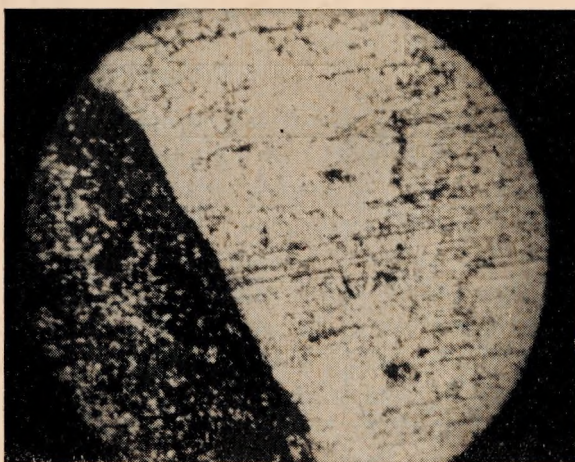




Rys. 9. Wykres zmian potencjału polaryzacji ołowiu bez osłony ochronnej w zależności od rodzaju gruntu

1 — grunt torfiasty, 2 — grunt gliniasty, 3 — grunt gliniasto-piaszczysty, 4 — grunt bagienny, 5 — grunt piaszczysty

— dużą alkaliczność środowiska przykatodowego stwierdzono tylko przy próbach z ołowiem pozbawionym osłony ochronnej. Wahala się ona od 10,6 do 11,4 we wszystkich badanych gruntach oprócz piaszczystego, w którym średnia wartość pH była 8,7;



Rys. 10. Fragmety uszkodzeń korozyjnych (ciemniejsze plamy) występujące na opancerzeniu stalowym przy nadmiernych potencjałach polaryzacji. Czas trwania polaryzacji ok. 50 dni. Powiększenie 80-krotne

— alkaliczność środowiska przykatodowego osiągnana w przypadku polaryzacji kabli w osłonach ochronnych nie była zbyt wysoka, przy czym stwierdzono ją tylko w wewnętrznych warstwach osłony ochronnej (pH od 8,4 do 10,0). Odczyn ziemi przylegającej bezpośrednio do kabla był prawie nie zmieniony;

— w piaskach i gruntach dobrze przepuszczających wodę i powietrze początkowe wysokie ujemne wartości potencjałów szybko opadały prawdopodobnie na skutek depolaryzacji.

### 4.3. Badania terenowe

Badania terenowe polegały na obserwacji odcinków kabli, na których zainstalowano urządzenia ochrony katodowej. Badaniami objęte były trzy odcinki doświadczalne, a mianowicie:

a) 4-kilometrowy odcinek kabla współosiowego ziemnego w osłonie jutowo-papierowej i opancerzeniu stalowym, chroniony protektorami magnezowymi, cynkowymi i aluminiowymi;

b) 1,5-kilometrowy odcinek kabla współosiowego ziemnego w osłonie ochronnej jutowo-papierowej i opancerzeniu stalowym, chroniony za pomocą stacji katodowej z obcym źródłem prądu;

c) około 1,5-kilometrowy odcinek kabla miejscowego ułożonego w kanalizacji kablowej, również chroniony za pomocą stacji katodowej z obcym źródłem prądu.

Kabel współosiowy, chroniony od trzech lat protektorami (a), nie koroduje. Wartości potencjałów dla odcinka, na którym zainstalowano protektory magnezowe przedstawiają się następująco:

— przed włączeniem ochrony katodowej od  $-0,64$  do  $-0,68$  V względem  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$

— po 6 godz od włączenia ochrony katodowej od  $-0,73$  do  $-0,93$  V względem  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$

— po 7 miesiącach od włączenia ochrony katodowej od  $-0,92$  do  $1,10$  V względem  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$

— po roku od zainstalowania ochrony katodowej obserwowano dalsze przesunięcia się potencjałów w kierunku wartości ujemnych.

Wyniki pomiarów wykonanych po trzech latach od zainstalowania protektorów na kablu pokrywają się z wynikami uzyskanymi po 7 miesiącach. Widać z tego, że stabilizacja pracy elektrod magnezowych następuje już po siedmiu miesiącach.

Średnie przesunięcie potencjału (w kierunku ujemnym) po zainstalowaniu ochrony wynosi ca 250 mV.

Wszystkie mierzone wartości potencjałów leżą w granicach kryterium przyjmowanego dla ochrony katodowej kabla w opancerzeniu, a mianowicie są bardziej ujemne niż  $-0,85$  V względem  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ .

Kabel ułożony jest w gruncie o małej oporności właściwej. Spadek napięcia na oporności elektrolitu glebowego jest niewielki, ze względu na małe prądy w obwodzie ochrony (rzędu 50 mA) i małą oporność elektro-

litu. Wartości potencjałów zmierzone przy użyciu sondy elektrodowej umieszczonej w pobliżu kabla oraz na powierzchni ziemi nad osią kabla nie wykazują większych odchyień. Ponieważ na badanym odcinku kabla nie wykryto oddziaływania prądów błądzących, przyjmuje się, że zastosowana ochrona katodowa zapewnia konstrukcji warunki zachowania jej w stanie nienaruszonym.

Na odcinku kabla chronionym protektorami cynkowymi i aluminiowymi nie zaobserwowano również korozji. Średnie przesunięcie potencjału (w kierunku ujemnym) po zainstalowaniu ochrony wynosi ca 100 mV. Wszystkie mierzone wartości potencjałów mieszczą się w granicach kryterium ochrony, to znaczy w granicach  $-0,85$  V względem Cu/CuSO<sub>4</sub>. Odcinek kabla chroniony protektorami cynkowymi i aluminiowymi ułożony jest podobnie, jak odcinek chroniony protektorami magnezowymi w gruncie bagiennym, nawilgoconym o małej oporności właściwej. W ciągu dwu lat od zainstalowania protektorów na odcinku chronionym protektorami cynkowymi występuje stopniowe obniżanie potencjału, natomiast na odcinku chronionym protektorami aluminiowymi — nieznaczne przesuwanie się potencjału w kierunku wartości mniej ujemnych.

Na doświadczalnym 1,5-kilometrowym odcinku kabla współosiowego w osłonie jutowo-papierowej i opancerzeniu stalowym zastosowano ochronę za pomocą stacji katodowej z obcym źródłem prądu (pkt. b).

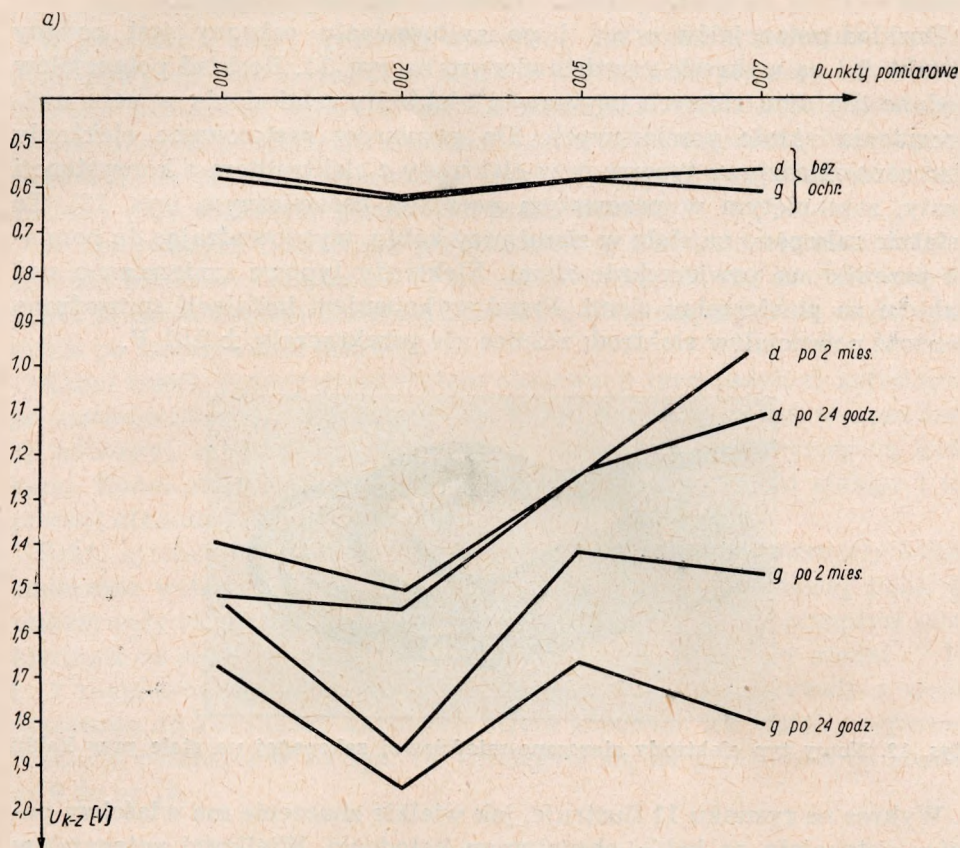
Jako uziom anodowy wykorzystano stare istniejące w pobliżu uziemienie masztu antenowego. Uziemienie to na swojej drodze w ziemi prawdopodobnie łączy się z rurociągiem wodnym. Kabel był ułożony w gruncie piaszczystym, suchym dobrze napowietrzonym.

Tablica 8

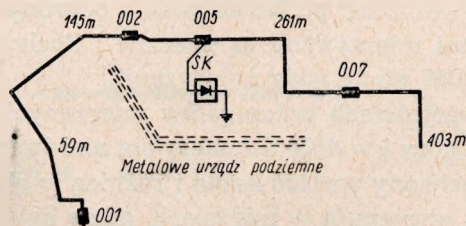
**Wpływ lokalizacji elektrody odniesienia  
na wynik pomiaru rozkładu potencjałów wzdłuż kabla**

Czas wykonania pomiaru	Lokalizacja elektrody Cu/CuSO <sub>4</sub>	Nr punktu pomiarowego			
		001	002	005	007
		Wartości potencjałów powłoki kabla w stosunku do Cu/CuSO <sub>4</sub> (V)			
Przed ochroną	górze	-0,58	-0,63	-0,58	-0,60
	dół	-0,56	-0,62	-0,58	-0,56
Po 24 godz ochrony	górze	-1,68	-1,95	-1,67	-1,80
	dół	-1,52	-1,55	-1,24	-1,11
Po 2 mies ochrony	górze	-1,53	-1,87	-1,42	-1,47
	dół	-1,40	-1,51	-1,25	-0,95

U w a g a : Lokalizacja elektrody „górze” — na powierzchni ziemi nad kablem  
„dół” — bezpośrednio nad kablem w ziemi.



b)

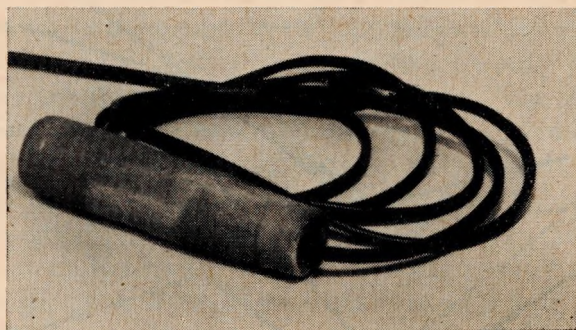


Rys. 11. Wpływ lokalizacji elektrody odniesienia na rozkład potencjału wzdłuż kabla a) wykresy potencjałów, b) schemat usytuowania kabla i stacji katodowej (SK) oraz punktów pomiarowych

Krzywe *d* odnoszą się do potencjałów mierzonych za pomocą elektrody odniesienia umieszczonej w ziemi przy kablu, krzywe *g* do potencjałów mierzonych za pomocą elektrody umieszczonej na powierzchni ziemi nad kablem

Oporność właściwa gruntu  $\sim 3500 \Omega\text{m}$ , napięcie wyjściowe stacji wynosiło  $\sim 13 \text{ V}$ , natężenie prądu w obwodzie ochrony  $\sim 0,65 \text{ A}$ .

Rozkład potencjałów przed i po zastosowaniu ochrony jest podany w tabl. 8 i na wykresie przedstawionym na rys. 11. Rozkład potencjałów podano dla dwu różnych usytuowań elektrody odniesienia w celu uwidocznienia różnic pomiarowych. Do pomiarów zastosowano elektrody siarczano-miedziowe typowe oraz elektrody z elektrolitem o konsystencji pasty, zamkniętym w porowatym naczyniu ceramicznym (rys. 12). Te ostatnie zakopano na stałe w ziemi przy kablu, wyprowadzając do pomiaru przewód na powierzchnię ziemi. Elektrody typowe umieszczono nad kablem na powierzchni ziemi. Przed wykonaniem instalacji sprawdzono wartość potencjałów elektrod; różnice nie przekraczały  $\pm 0,01 \text{ V}$ .



Rys. 12. Nowy typ elektrody siarczano-miedziowej zakopanej na stałe przy kablu

Wykres na rysunku 11 ilustruje, jak wielkie znaczenie ma właściwy pomiar potencjału na kablu chronionym katodowo. Wielkości potencjałów kabla zmierzone elektrodami odniesienia *d* i *g* przed zastosowaniem ochrony katodowej, a więc mierzone na kablu, przez który nie płynie prąd, prawie nie różnią się między sobą. Natomiast po zastosowaniu ochrony różnice pomiędzy dwiema wartościami mierzonymi są znaczne i dochodzą do  $0,69 \text{ V}$  w punkcie pomiarowym 007 po 24 godz polaryzacji.

Nierównomierne różnice w wartościach potencjałów mierzonych elektrodą odniesienia umieszczoną u góry i w dole tłumaczy się nierównomiernym rozkładem gęstości prądu ochrony wzdłuż kabla i różnicą w głębokości ułożenia go. Większe różnice występują w miejscach, gdzie kabel zbliża się do metalowej konstrukcji podziemnej, a mianowicie w punktach 002 i 007.

Średnie przesunięcie potencjału kabla po zastosowaniu ochrony katodowej wynosiło  $740 \text{ mV}$ . Wartość potencjału po zastosowaniu ochrony katodowej we wszystkich punktach była bardziej ujemna, niż powszechnie przyjęta jako kryterium, wartość  $-0,85 \text{ V}$ . W ten sposób kabel na całym

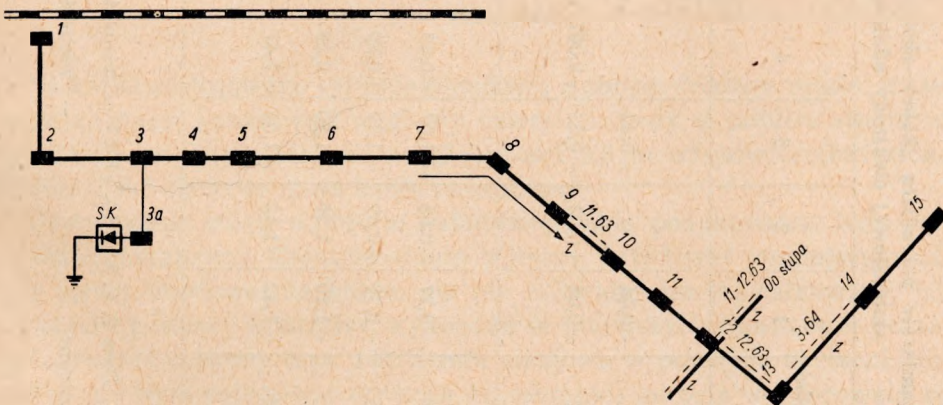
odcinku posiada odpowiednio niski potencjał ochrony, dzięki czemu nie ma niebezpieczeństwa korozji.

W gruntach o dużej oporności właściwej, jak widać z przykładu opisanego powyżej, jest szczególnie łatwo o mylną interpretację kryterium ochrony katodowej, opierając się na pomiarach wykonanych elektrodą umieszczoną na powierzchni ziemi nad konstrukcją chronioną. Nawet przy pionowym do osi kabla ustawieniu elektrody pomiarowej błąd może być znaczny przy większych gęstościach prądu ochrony.

W opisywanych dotychczas przypadkach a) i b) kontrolowano wpływ ochrony katodowej zastosowanej na kablach nowych, nie skorodowanych przed zainstalowaniem urządzeń ochrony i utrzymujących się w dobrym stanie po zastosowaniu ochrony.

Kabel trzeci, będący przedmiotem obserwacji (przypadek c) korodował po zastosowaniu ochrony katodowej. Kabel ten ułożony był w kanalizacji kablowej, zalewanej okresowo wodą deszczową zanieczyszczoną ściekami. Kabel zbliżał się do szyn trakcji elektrycznej prądu stałego i na pewnej długości biegł równoległe do nich.

Szkic sytuacyjny trasy kablowej podano na rys. 13. Potencjały kabla zmierzone wstępnie przed zainstalowaniem ochrony katodowej (tabl. 9) wskazywały na nieznaczny wpływ prądów błędnych. Ich przepływ miał kierunek od studni kablowej nr 7 do studni nr 9. W okolicy studni nr 11 i 12 znajdował się koński targ, z którego nieczystości spływały z wodą deszczową do kanalizacji kablowej. Strefa anodowa, jak widać z wykresu rozkładu potencjałów na rys. 14, rozciągała się na przestrzeni od studni nr 6 do nr 15.



Rys. 13. Szkic sytuacyjny trasy kabla chronionego za pomocą stacji katodowej umieszczonej przy studni 3a;

SK — stacja katodowa, 1 ... 15 — numery studni kablowych, z — miejsca i daty wymiany zniszczonych odcinków kabla

T a b l i c a 9

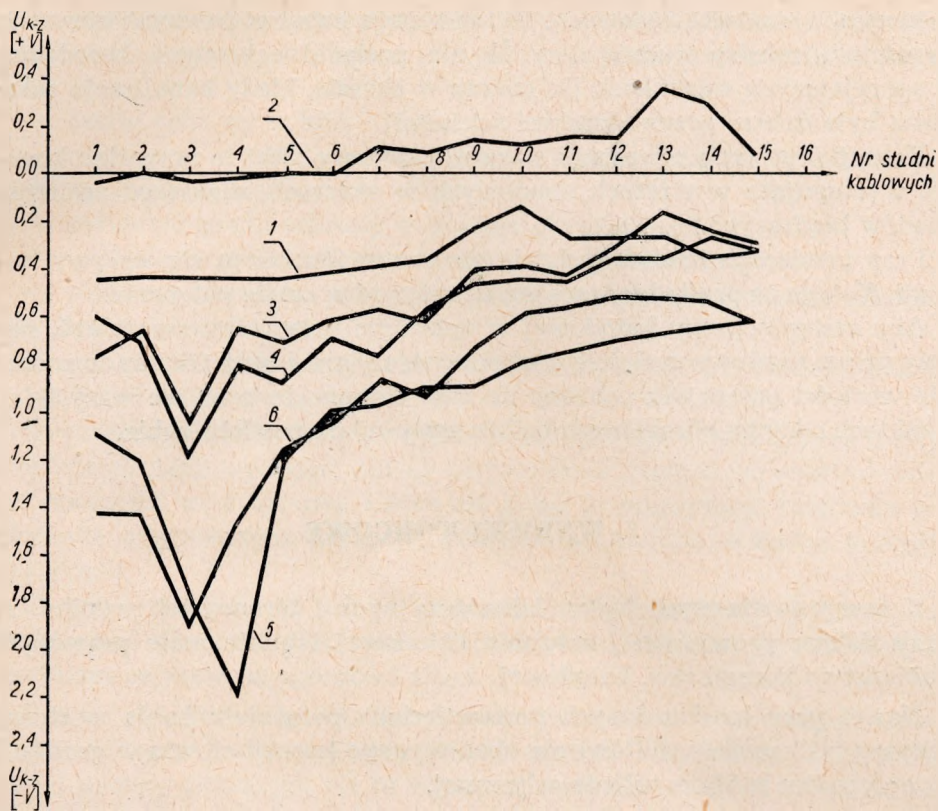
Wyniki pomiarów potencjału „kabel—ziemia” przed i po zainstalowaniu ochrony katodowej ( $U_{k-z}$  [V] względem siarczano-  
-miedziowej elektrody odniesienia mierzone przyrządem o oporności wewnętrznej 100 000  $\Omega/V$ )

Nr studni	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
2. V. 62	-0,44		-0,42		-0,43			-0,35	-0,23	-0,16	-0,26	-0,28	-0,26	-0,34	-0,32
14. VI. 63	-0,04	+0,02	-0,02	-0,007	+0,009	+0,014	+0,120	+0,100	+0,150	+0,130	+0,150	+0,150	+0,370	+0,289	+0,072
28. VI. 63	-0,77	-0,66	-1,07	-0,65	-0,71	-0,61	-0,57	-0,62	-0,41	-0,39	-0,42	-0,29	-0,17	-0,23	-0,29
12. VII. 63	-0,59	-0,69	-1,20	-0,80	-0,88	-0,60	-0,64	-0,56	-0,47	-0,44	-0,44	-0,36	-0,36	-0,24	-0,32
9. X. 63	-1,10	-1,20	-1,80	-2,20	-1,20	-1,00	-0,98	-0,90	-0,90	-0,80	-0,75	-0,70	-0,68	-0,64	-0,62
14. IV. 64	-1,42	-1,42	-1,92	-1,47	-1,18	-1,12	-0,87	-0,92	-0,72	-0,57	-0,56	-0,52	-0,52	-0,54	-0,72

Uwaga. Data 2. V. 62 i 14. VI. 63 — wartości wstępne przed zainstalowaniem ochrony.

Daty następne — wartości uzyskane po zainstalowaniu ochrony katodowej.





Rys. 14. Krzywe rozkładu potencjałów na kablu przed i po zainstalowaniu ochrony katodowej:

przed ochroną 1 — 2.V.1962, 2 — 14.VI.1963;  
 po zastosowaniu ochrony 3 — 28.VI.1963; 4 — 12.VII.1963, 5 — 9.X.1963,  
 6 — 14.IV.1964

Na kablu zastosowano ochronę katodową z obcym źródłem prądu, umieszczając stację katodową i węglowy uziom anodowy w pobliżu studni nr 3a. Uziom anodowy ułożono na głębokości 2,5 m od powierzchni ziemi w odległości około 40 m od kabla chronionego.

Usytuowanie stacji w strefie katodowej kabla podyktowane było warunkami lokalnymi. Zainstalowanie ochrony katodowej zmniejszyło zasięg strefy anodowej na kablu, ale nie zlikwidowało jej całkowicie, jak wykazały pomiary kontrolne wykonane w pierwszych miesiącach po zainstalowaniu ochrony (rys. 14). Strefa anodowa w pewnych okresach likwidowana była całkowicie (krzywa 5), niemniej korozja występowała na odcinkach pomiędzy studnią nr 9 a nr 15. Dalsze pomiary kontrolne (krzywa 6) oraz pomiary ciągle wykonane w niektórych studniach wykazały, że potencjał kabla na odcinku między studnią nr 7 a nr 15 przesuwał się

w kierunku wartości dodatnich. W ten sposób kabel w pewnych okresach na odcinku między studnią 7 a 15 nie posiadał ochrony i korodował w sprzyjających warunkach (to znaczy w okresie, kiedy kanalizacja zalewana była dobrze przewodzącymi ściekami).

Korozji tego typu nie można nazwać katodową. Jest to normalna korozja występująca w strefach anodowych w okresach większego nasilenia prądów błędzących.

Przy pomiarach kontrolnych nie zawsze uwidoczniają się wpływy korozji, dlatego że prądy błędzące mają zmienne w czasie natężenia.

Aby zasięg ochrony katodowej w opisanym przypadku rozszerzyć, należy uziom anodowy umieścić w okolicy strefy anodowej. Obniży to znacznie wartości potencjału ochrony do tego stopnia, że prąd we wszystkich punktach odcinka chronionego będzie wpływał do powłoki kabla.

## 5. WNIOSKI KOŃCOWE

Z przeprowadzonych badań laboratoryjnych i terenowych wynika, że przy dobrze prowadzonej ochronie katodowej istnieje małe prawdopodobieństwo korozji tzw. katodowej.

Nawet przy bardzo dużych przesunięciach potencjału kabla w stronę ujemną (kilkanaście woltów) nie obserwowano korozji ołowiu w gruntach w przypadku kabla w osłonie ochronnej.

Nie zauważono również odrywania się tradycyjnych osłon ochronnych w warunkach nadmiernej polaryzacji katodowej.

Działanie urządzeń ochrony katodowej zainstalowanych na kablu wymaga stałego dozoru.

Do kontroli urządzeń ochrony wystarczy na ogół sprawdzenie funkcjonowania ich w odstępach 1÷3 miesięcznych. Raz na kwartał należy kontrolować wartości potencjałów ochrony wzdłuż konstrukcji chronionej. Wartości pomiarowe należy nanosić na odpowiednie karty kontrolne. W karcie kontrolnej powinny być następujące dane:

- rodzaj konstrukcji chronionej;
- długość odcinka;
- okres eksploatacji;
- odgałęzienia kabla;
- sąsiedztwo innych podziemnych konstrukcji metalowych;
- rodzaj ochrony katodowej (drenaż prosty, polaryzowany, wzmocniony, stacja katodowa z obcym źródłem prądu, anody reakcyjne);
- rodzaj i liczba uziomów anodowych (w przypadku anod reakcyjnych rodzaj anody i odległość pomiędzy anodami);

- potencjał ochrony przyjęty dla danych warunków kabla przy projektowaniu ochrony (względem siarczano-miedziowej elektrody odniesienia);
- zasięg ochrony w km;
- miesięczne zużycie prądu w przypadku stosowania stacji katodowych z obcym źródłem prądu;
- natężenie prądu ochrony względnie gęstości prądu;
- napięcie na zaciskach urządzenia ochrony katodowej;
- mierzony okresowo potencjał ochrony (względem siarczano-miedziowej elektrody odniesienia).

Przy jakichkolwiek odchyleniach od założonych wartości należy znaleźć przyczynę i starać się ją usunąć.

Aby uniknąć błędów przy pomiarach kontrolnych, a tym samym fałszywej interpretacji wyników, należy do pomiarów używać przyrządów o dużej oporności wewnętrznej. Unika się przez to polaryzacji elektrody odniesienia, a tym samym zmian jej własnego potencjału na skutek przepływu prądu.

Elektrody odniesienia należy umieszczać przy pomiarach jak najbliżej konstrukcji chronionej w celu wyeliminowania błędów powodowanych spadkiem napięcia na oporności ziemi.

Trzeba zwrócić uwagę, że kabel może korodować w warunkach stosowania ochrony katodowej, gdy pewne odcinki konstrukcji będą miały mniej ujemny potencjał, niż to wynika z wartości zmierzonych na odcinku chronionym. Błąd pomiarowy wynika z omowego spadku napięcia w niektórych warunkach. W przypadkach takich kabel nie osiąga pełnej polaryzacji katodowej potrzebnej do zabezpieczenia konstrukcji przed korozją.

W obszarach prądów błądzących okresowe wahania potencjału w kierunku dodatnim mogą spowodować czasowy zanik ochrony katodowej na pewnych odcinkach konstrukcji, które uważa się za chronione katodowo.

W takich przypadkach konieczne jest większe przesunięcie potencjału w obszarach anodowych (nawet do kilkuset mV).

Jako kryterium ochrony należy przyjmować zarówno przesunięcie potencjału, jak i wartość  $-0,85$  V względem Cu/CuSO<sub>4</sub> dla kabla w opancerzeniu dla kabla gołego.

W strefach działania prądów zmiennych nie należy używać do ochrony kabla protektorów magnezowych lub aluminiowych. Efekt prostowania występujący na tych metalach może prowadzić do anodowej polaryzacji kabla i jego korozji, mimo stosowania ochrony katodowej.

Dokładna analiza warunków otoczenia pozwoli uniknąć komplikacji na skutek niewłaściwego zastosowania ochrony.

Pomiar potencjału rzeczywistego metodami eliminującymi omowy spadek napięcia może ujawnić źródła błędów pomiarowego, co pozwoli doprowadzić potencjał ochrony do wymaganej wartości.

Dokładna analiza minimalnych i maksymalnych potencjałów kabla w strefie działania prądów błędzących pozwoli na dobranie odpowiednio niskiego potencjału ochrony lub na racjonalniejsze usytuowanie uziomu anodowego.

#### WYKAZ LITERATURY

1. Skiba-Rogalska O.: Korozja ołowiu w warunkach ochrony katodowej. Prace Instytutu Łączności, 1962, nr 4 (29), s. 55—71.
2. Marczenko A. F.: Zaszczita swincowej obłoczki kabiełej swiazii ot poczwiennoj korozji. Swiazizdat, Moskwa 1960.
3. Skorczelletti W. W.: Tiejoreticzeskaja elektrohimiya. Goschimizdat, Leningrad 1963.
4. Schwerdtfeger W. J., Manuele R. J.: Coatings formed on steel by cathodic protection and their evaluation by polarization measurements. Corrosion 1963, t. 19, nr 2, s. 59—68.
5. Klas H.: Katodnaja zaszczita podzjemnych sooruzenij. Katodnaja zaszczita ot korozji. Zbiór referatów z Sympozjum ochrony katodowej we Frankfurcie n. Menem 11—12. II. 1958, tłum. pod red. Prituły W. A., Gosenergoizdat, Moskwa—Leningrad 1962.
6. Heuze B.: La relaxation du potentiel: base d'une nouvelle technique de protection cathodique. Corrosion et Anticorrosion, 1961, t. 9, nr 3, s. 80—86.
7. Hochwertige Schutzüberzüge — kathodischer Korrosionsschutz. Ein Überblick über die angelsächsische Entwicklung der letzten 30 Jahre. VDI-Z 1957, t. 99, nr 3, s. 97—98.
8. Goldstein H.: Der kathodische Korrosionsschutz in Wechselwirkung mit „Kalk“. Werkstoffe und Korrosion, 1962, t. 13, nr 5, s. 284—287.
9. Galimberti C. E.: Corrosion of lead by alternating current. Corrosion, 1964, t. 20, nr 5.
10. Solti M.: Über die Stromverteilung von kathodisch geschützten Anlagen in verschiedenen Bodenarten. Werkstoffe und Korrosion 1957, t. 8, nr 5, s. 256—260.
11. Schwenk W.: Die Bestimmung des Potentials stromdurchflossener Elektroden mit besonderer Berücksichtigung der Anwendung beim kathodischen Korrosionsschutz. Werkstoffe und Korrosion 1962, t. 13, nr 4, s. 212—218.
12. Schwenk W.: Erörterung des Aus- oder Umschalttechnik bei der Potentialmessung für den kathodischen Korrosionsschutz. Werkstoffe und Korrosion 1963, t. 14, nr 11, s. 944—947.
13. Baeckmann W., Heim G.: Gas und Wasserfach 1960, nr 101, s. 942—8, 986—94.
14. Kaesche H.: Werkstoffe und Korrosion 1959, t. 10, s. 227—239.
15. Baeckmann W.: Kontrollmessungen an kathodisch geschützten Rohrleitungen. Werkstoffe und Korrosion 1964, t. 15, nr 3, s. 201—211.
16. Barnartt S. J.: Elektrochem. Soc. 1961, t. 108, s. 102.
17. Pearson J. M.: Trans. Electrochem. Soc. 1942, t. 81, s. 485—510.

O. Skiba-Rogalska

### КОРРОЗИЯ СВИНЦА В УСЛОВИЯХ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ

#### Резюме

Исследовано условия, в которых свинцовая оболочка кабеля подвергается разрушению в процессе применения катодной защиты. В экспериментах применялись в качестве электролитов природные почвы. В почвах поляризовался катодно свинец без защитного прикрытия, а также отрезки кабеля с волокнистым прикровом и в стальной броне. Поляризация велась до высоких отрицательных потенциалов. В полевых условиях исследовалось состояние свинцовых кабельных оболочек защищаемых катодно.

В итоге исследований разработано указания, касающиеся рационального применения катодной защиты бронированных и голых освинцованных кабелей.

O. Skiba-Rogalska

### LEAD CABLE SHEATH CORROSION UNDER CATHODIC PROTECTION CONDITIONS

#### Summary

The conditions have been studied in which the cable sheath is corroded in spite of the cathodic protection. While testing natural soil was the electrolyte. The lead cable sheath without protective coating and armoured cable sections with fibrous coating were polarised in the ground. The polarisation was brought to high negative potentials. The lead cable sheaths under cathodic protection were tested in the field conditions.

As the results of those tests the instruction of the right cathodic protection of lead sheath buried cables and those in conduits has been given.

O. Skiba-Rogalska

### LA CORROSION DES CÂBLES SOUS PLOMB EN CONDITIONS DE LA PROTECTION CATHODIQUE

#### Resumé

Les conditions sont étudiées dans lesquelles l'enveloppe du câble sous plomb se détruit malgré la protection cathodique. Au cours des expériences, le sol naturel a servi d'électrolyte. Un câble sous plomb sans revêtement protectif et des sections du câble armé en revêtement fibreux ont été polarisés dans le sol. La polarisation négative jusqu'aux potentiels très élevés a été appliquée. Les enveloppes

des câbles sous plomb dans les conditions de la protection cathodique ont été étudiées dans le terrain.

En résultats de ces recherches les indications sont élaborées concernant l'application judicieuse de la protection cathodique aux câbles sous plomb enterrés ainsi qu'à ceux qui sont posés dans canalisation.

*O. Skiba-Rogalska*

## DIE BLEIKORROSION BEI KATHODISCHEM SCHUTZ

### Zusammenfassung

Es werden die Umstände untersucht, unter denen der Kabelbleimantel bei Anwendung des Kathodischen Schutzes Zerstörung erleidet. Als Elektrolyt wurden in den Experimenten Naturböden verwendet. Man polarisierte darin Blei ohne Schutzhülle sowie Kabelabschnitte in Faserstoffhülle und Stahlbewehrung. Die Polarisation wurde bis auf hohe Negativpotentiale gebracht und der Zustand der Kabelbleimäntel unter Betriebsbedingungen untersucht.

Als Ergebnis wurden Richtlinien für zweckmässige Anwendung des Kathodischen Schutzes an Erd- und Röhrenbleikablen festgelegt.

## Wspomnienie pośmiertne o profesorze mgr inż. Józefie Wójcikiewiczu

Przedwczesna śmierć profesora Józefa Wójcikiewicza, wieloletniego pracownika Instytutu Łączności i byłego zastępcy dyrektora do spraw naukowych, przyniosła wielką stratę nie tylko Instytutowi, ale i polskiej telekomunikacji.

Urodzony w Dąbrowie Górniczej 14. IX. 1905 r. rozpoczął naukę na terenie Rosji, a ukończył w Warszawie w 1925 r. (gimn. im. T. Reytana).

W 1931 r. kończy Wydział Elektryczny Politechniki Warszawskiej i wstępując w 1933 r. do organizowanego wówczas Państwowego Instytutu Telekomunikacyjnego wiąże się już na całe życie z polską telekomunikacją. Jako człowiek nieprzeciętnie zdolny, wnikliwy i sumienny, już w krótkim czasie ma poważne osiągnięcia w swej pracy, przyczyniając się między innymi do zmiany obowiązującej wówczas normy na elementy osprzętu liniowego telefonicznych linii napowietrznych.

Wkrótce potem przechodzi do zagadnień budowy kabli dalekosiężnych, stając się stopniowo jednym z najlepszych specjalistów w tym zakresie w kraju. Powołany do zorganizowania i kierowania badawczym Działem Kablowym w Państwowym Instytucie Telekomunikacyjnym proponuje wkrótce nowy typ pupinizacji (22/9 mH, co 1830 m) jeszcze przed opublikowaniem analogicznego zalecenia przez Międzynarodowy Komitet Doradczy do spraw Telefonii (CCIF).

Starsi z nas pamiętają Go z tych lat, gdy jako młody, pełen entuzjazmu, zamiłowany w technice inżynier bądź przemierzał niestrudzenie trasy budowy kabli, bądź na terenie laboratoriów fabrycznych przewodził już resortowym komisjom odbiorczym.

Ze względu na krystalizujący się kierunek jego specjalizacji zawodowej przechodzi w 1938 r. do Spółdzielni „Grupa Techniczna” na stanowisko kierownika Biura Studiów Wydziału Kablowego, na którym to stanowisku pozostaje do wybuchu wojny.

W oparciu o gruntowną znajomość zjawisk, zachodzących w kablach poszukuje najodpowiedniejszej w naszych warunkach metody montażu dalekosiężnych linii kablowych i uzasadnia w tym okresie możliwość zwiększenia udziału telefonicznego jednokrotnego systemu nośnego w budowanych wówczas liniach kablowych. Pozwoliło to na zwiększenie liczby łączy w już zbudowanych kablach o ponad 20%.

W okresie okupacji, pracując w Biurze Studiów byłych Państwowych Zakładów Tele- i Radiotechnicznych rozszerza zakres swojej specjalizacji, zajmując się zagadnieniami konstrukcji urządzeń teletransmisyjnych. Po upadku Powstania Warszawskiego zostaje wywieziony do obozu pracy

w Niemczech, skąd powraca w 1946 r., podejmując ponownie pracę w „Grupie Technicznej”, gdzie nadal zajmuje się zagadnieniami montażu kabli międzymiastowych.

Okres Jego powojennej działalności w tej instytucji (1946—1952) charakteryzuje się wprowadzaniem nowych sposobów wyrównywania symetrii elektrycznej telefonicznych kabli dalekosiężnych, a mianowicie metodą dodatkowych kondensatorów wyrównawczych, stosowania wyrównywania odcinków pupinizacyjnych przy częstotliwościach wyższych od częstotliwości granicznych, jak również całkowicie oryginalną metodą mieszaną, polegającą na jednoczesnym krzyżowaniu żył i dołączaniu dodatkowych kondensatorów wyrównawczych.

Przenosząc z kolei swoje zainteresowania na kable o rozszerzonym zakresie częstotliwości, przeznaczone do wprowadzanych w Polsce telefonicznych systemów nośnych zajmuje się, pracując w zespołach specjalistycznych Biura Kablowego Ministerstwa Łączności i Biura Studiów i Projektów Łączności ustalaniem typów nowo budowanych kabli, metod ich pupinizacji, metod pomiarowych i ustalaniem parametrów kabli niepupinizowanych, przeznaczonych do telefonii wielokrotnej.

Za osiągnięcia w tych dziedzinach zostaje Józef Wójcikiewicz dwukrotnie laureatem Nagrody Państwowej (w latach 1952 i 1953).

W 1952 r. powraca do pracy naukowo-badawczej w Instytucie Łączności, gdzie w 1954 r. zostaje powołany na stanowisko zastępcy dyrektora do spraw naukowych.

W wyniku wybitnych osiągnięć naukowo-badawczych Rada Państwa nadaje Mu w 1955 r. tytuł naukowy profesora nadzwyczajnego. W okresie swej pracy na stanowisku zastępcy dyrektora Instytutu Łączności profesor Józef Wójcikiewicz z cechującą Go energią i sumiennością zajmuje się nie tylko kierowaniem zespołem zakładów z zakresu jego specjalności, ale jednocześnie z dużym nakładem pracy porządkuje sprawy związane z tytułami naukowymi pracowników Instytutu. Pomoc, rada i cechująca Go życzliwość dla kolegów i pracowników sprawiły, że wielu pracowników samodzielnych i pomocniczych uzyskało należne im tytuły. Wyniki Jego działalności w tym zakresie zostały należycie ocenione, wskutek czego zostaje powołany na członka Komisji Kwalifikacyjnej Pracowników Nauki w Polskiej Akademii Nauk i funkcję tę pełni do końca swego życia.

W 1961 r. profesor Józef Wójcikiewicz, pragnąc dalej całkowicie poświęcić się pracy naukowej, ustępuje ze stanowiska zastępcy dyrektora i podejmuje osobiste studia nad zastosowaniem techniki falowodowej w teletransmisji, w wyniku których w sposób syntetyczny przedstawia podstawowe zagadnienia i perspektywy zastosowania tej nowej, nie wprowadzonej jeszcze techniki.

Jednocześnie od r. 1960 obejmuje dodatkowo obowiązki redaktora naczelnego wydawanego przez Instytut pisma naukowego „Prace Instytutu Łączności”. Jego wnikliwość, rzeczowość, fachowość, a przede wszystkim poczucie odpowiedzialności spowodowały, że pismo to osiągnęło wysoki poziom naukowy i znalazło uznanie u czytelników. Jest również członkiem Komisji Programowej Biuletynu Technicznego, wydawanego przez Ministerstwo Łączności. Przez szereg lat bierze czynny udział w pracach



Międzynarodowego Komitetu Doradczego do spraw Telegrafii i Telefonii (CCITT).

Profesor Józef Wójcikiewicz, jako wybitny specjalista i znawca przedmiotu, zajmuje się również pracą dydaktyczną, wykładając zarówno w czasie okupacji w Szkole Elektrycznej II stopnia, która była wówczas namiastką Politechniki, jak i po wyzwoleniu — w Wieczorowej Szkole Inżynierskiej.

Uznanie, jakim się cieszył w gronie specjalistów polskiej telekomunikacji oraz nieprzeciętne wyniki Jego działalności naukowej i technicznej znalazły wyraz w odznaczeniach: Krzyżem Oficerskim Odrodzenia Polski, Złotym Krzyżem Zasługi, Medalem X-lecia PRL i Odznaką 400-lecia Poczty.

Nieubłagana choroba powaliła Go w początkach 1964 r., lecz nie zdołała złamać Jego charakteru i znanej obowiązkowości. Do ostatnich dni swego życia starał się brać, w miarę swych możliwości, czynny udział w pracach i życiu Instytutu.

Odszedł od nas w dniu 13. X. 1964 r.

Pozostanie w naszej pamięci jako człowiek wielkiej prawości, stwarzający dookoła siebie właściwy klimat naukowo-techniczny, sprzyjający postępowi technicznemu i rozwojowi kultury.

KOMITET REDAKCYJNY

Cena zł 21,—