

Aleksander Szendzielorz  
Tadeusz Teluk

Instytut Elektroenergetyki  
i Sterowania Układów

"WPLYW WARUNKÓW EKSPLOATACYJNYCH NA WŁASNOŚCI I PEWNOŚĆ PRACY  
KABLI ELEKTROENERGETYCZNYCH 6 kV W IZOLACJI I OSŁONACH PCV"

Streszczenie. W celu określenia wpływu czynników eksploatacyjnych (np. pola cieplnego, różnych typów ziemi, zawartości wilgoci w ziemi, roztworów kwasowych i zasadowych i czasu) na zmiany własności elektrycznych, mechanicznych, cieplnych fizycznych i chemicznych kabli - ułożono w czterech typach ziemi trzy różne kable 6 kV produkcji krajowej w izolacji i osłonach PCV. Kable te poddano badaniom i na podstawie wyników pomiarów zebranych na przestrzeni ok. dwóch lat sprezy czowano wnioski o dużym znaczeniu dla wytwórci kabli, biur projektowych i personelu eksploatującego sieci kable. Równocześnie przeprowadzono szczegółowe badania zjawiska migracji wilgoci, występującego w różnych typach ziemi w pobliżu powierzchni kabli i określono wpływ tego zjawiska na dopuszczalną obciążalność prądową i pracę tych kabli.

### 1. Przedmiot badań

Badaniom poddane zostały w latach 1969-1971 kable elektroenergetyczne 6 kV w izolacji i osłonach polwinitowych,

- o przekroju żył  $3 \times 25 \text{ mm}^2$ , typu YAKYFoy (rys. 1),
- " - -"-  $3 \times 120 \text{ mm}^2$ , typu YAKYy (rys. 2),
- " - -"-  $3 \times 185 \text{ mm}^2$ , typu YAKYFpy (rys. 3).

Kable te zostały wyprodukowane w Polsce w latach 1968-1969.

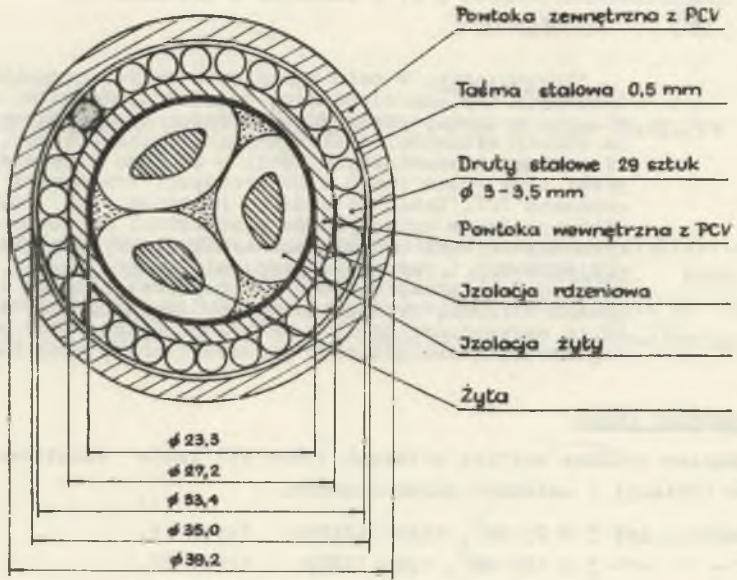
Jako izolacji użyto polwinitu suspensyjnego typu Sjne, a oponę i osłony wykonano z polwinitu typu SOns; obydwa spełniają wymagania normy PN-68/3076-05.

Kable wykonane zostały zgodnie z wymaganiami normy - PN-68/E-90303.

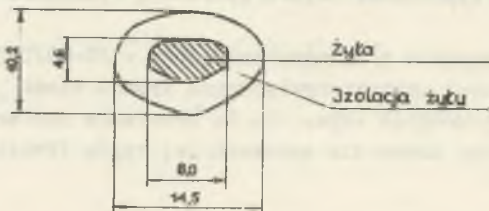
Kable ułożono w czterech charakterystycznych typach ziemi zgodnie z wymaganiami normy PN-61/E-05125 (rys. 4). Na podstawie pomiarów własności ziemi zestawiono wyniki badań dla czterech jej typów (Tablica 1).

## Przekrój kabla YAKYFou 3 × 25 mm<sup>2</sup>

Skala 2:1



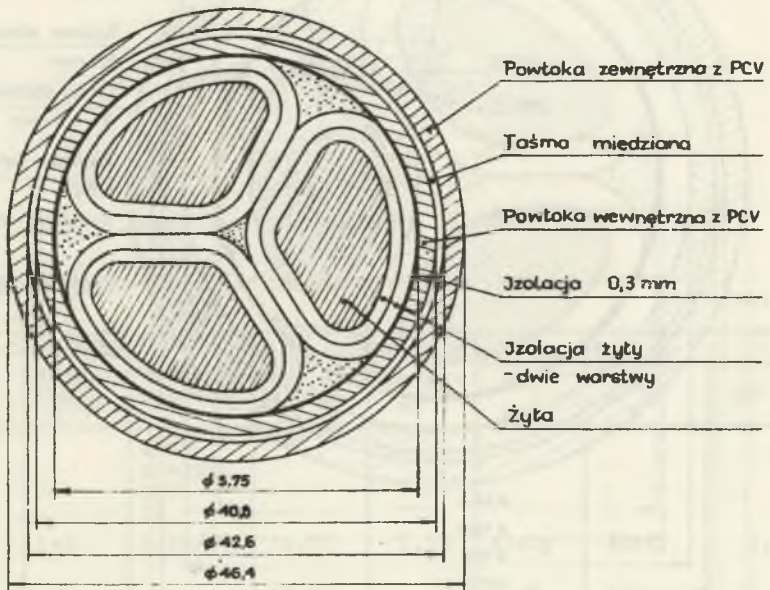
## Przekrój żyły



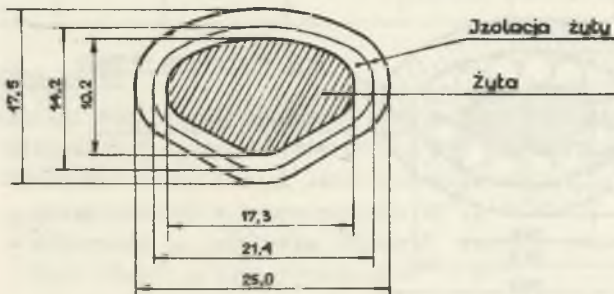
Rys. 1

**Przekrój kabla YAKYy 3 × 120 mm<sup>2</sup>**

Skala 2:1

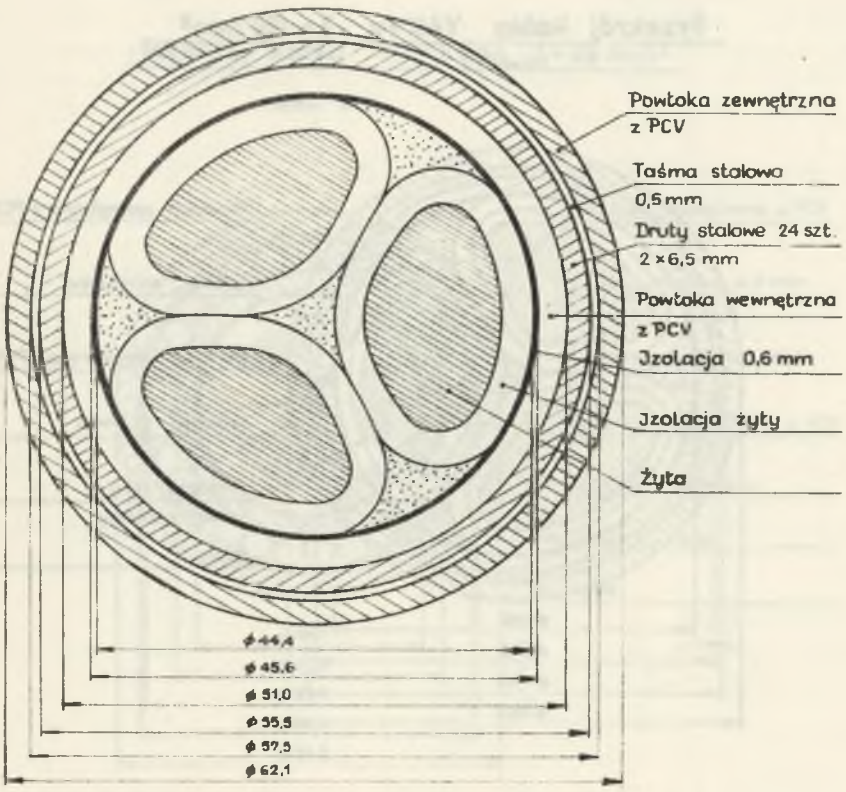


**Przekrój żyty**

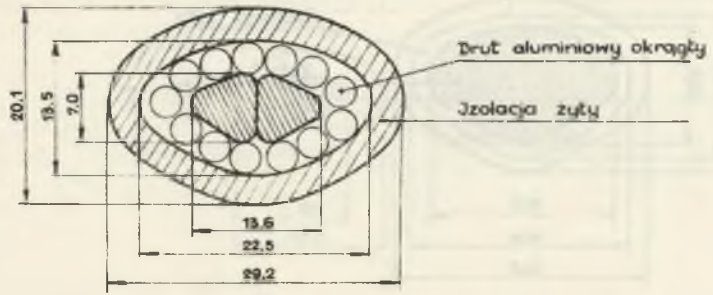


Rys. 2

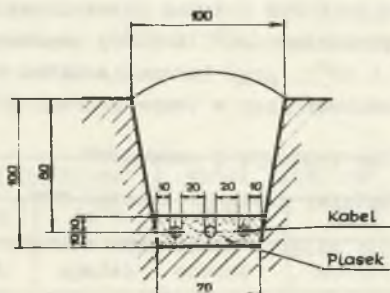
Przekrój kabla YAKYFpy 3 × 185 mm<sup>2</sup>  
 Skala 2:1



Przekrój żyty



Rys. 3



Rys. 4

Tablica 1

Rodzaj ziemi	Zawartość $\text{CaCO}_3$ %	Uziarnienie w %	Wilgotność naturalna %	Gęstość $\times 10^3 \text{ kg/m}^3$	Zawartość		
					$\text{SO}_4$ %	Mg %	pH
Gлина	1-3	żwir piasek pył ił	14,05	2,13	ślady	ślady	7,0
Żużel	3-5	- - -	20,90		0,07	0,01	7,2
Piasek gliniasty	1	2/63/29/ 6	11,50	1,77	ślady	ślady	6,5
Piasek	1	-/98/2/-	2,97	1,57	"-"	"-"	6,0

## 2. Zakres badań

Badaniami kompleksowymi objęto następujące wielkości:

- własności fizykochemiczne próbek PCV izolacyjnego i osłonowego przed ułożeniem kabli i po 2 latach eksploatacji,
  - wodochłonność w temperaturach  $20^\circ$  i  $60^\circ\text{C}$
  - odporność na działanie 2%-wych wodnych roztworów kwasu (HCL) i żużu (NaOH) w temperaturach  $20^\circ$  i  $60^\circ\text{C}$ ,
  - odporność cieplna metodą termogravimetryczną za pomocą termowagi Stantona ( $180^\circ\text{C}$ ),

- odporność na niskie temperatury ( $-5^{\circ}\text{C}$ ),
- wytrzymałość na rozciąganie i wydłużenie przy zerwaniu.

b) własności elektryczne

rezystancja izolacji żył i osłon polwinitowych, stała dielektryczna izolacji w temperaturach  $20^{\circ}\text{C}$  i  $60^{\circ}\text{C}$ , współczynnik stratności ( $\text{tg } \delta$ ) w temper.  $20^{\circ}\text{C}$  i  $60^{\circ}\text{C}$ , prąd ładowania kabla w temperaturach  $20^{\circ}\text{C}$  i  $60^{\circ}\text{C}$ , prąd ziemnozwarciowy w temperaturach  $20^{\circ}\text{C}$  i  $60^{\circ}\text{C}$ ,

c) własności cieplne izolacji i osłon PCV

opór cieplny właściwy izolacji i osłon PCV,

d) zjawisko migracji wilgoci zachodzące w ziemi (4 typy) otaczającej badane kable.\*

### 3. Wyniki badań i wnioski

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań sformułowano wnioski określające tylko niektóre zależności i wynikające z nich konsekwencje dla eksploatacji

a) Badania własności fizykochemicznych

Pomiary wykonano na specjalnie wg normy przygotowanych próbkach PCV izolacyjnego i osłonowego przed ułożeniem kabli w ziemi i po 2-letniej eksploatacji

Ze wzrostem czasu przebywania próbki w kąpielii wodnej zaobserwowano wyraźny wzrost wodochłonności. Najniższą wodochłonność wykazały próbki w roztworze kwasu i ługu, przy czym najniższy przyrost ciężaru wystąpił w roztworze wodnym kwasu solnego. Przyrost ten jest dwukrotnie niższy niż w czystej wodzie. Zjawisko to będące efektem elektrochemicznym związane jest z blokadą warstw powierzchniowych jonami użytych do kąpielii elektrolitów. Efekty te zaobserwowano zarówno w odniesieniu do osłony, jak i powłoki PCV, natomiast w mniejszym stopniu w przypadku izolacji.

Dalszym zaobserwowanym zjawiskiem jest występowanie anizotropowej sorpcji wody. Powłokę charakteryzuje większa wrażliwość na działanie kąpielii aniżeli osłonę.

Ze wzrostem temperatury próbki stwierdzono wzrost wodochłonności, przy czym w temperaturze  $60^{\circ}\text{C}$  stan prawie ustalony wystąpił już po ok. 5 go-

\*

- Uwagi: 1) Pomiary zjawisk cieplnych wykonano w punktach podanych na rys. 7 za pomocą termopar firmy "Degassa".
- 2) Pomiar  $\text{tg } \delta$  i stałej dielektrycznej wykonano wysokonapięciowym mostkiem Scheringa.
- 3) Pomiar rezystancji izolacji przyrządem "Megger" 2,5 kV.

dzinach, a temperaturze 20°C po 10 godzinach przebywania próbek w kąpielach.

Zmiany wodochłonności PCV, w zależności od temperatury i stosowanych kąpielach wodnych, roztworów wodnych kwasu oraz ługu, wykazują w kablach poddanych okresowej eksploatacji podobny przebieg jaki wykazywały przed eksploatacją. Zaobserwowane kierunki tych zmian wywołane warunkami eksploatacji przedstawia tablica 2.

Tablica 2

	Kabel 3x185 mm <sup>2</sup>		Kabel 3x120 mm <sup>2</sup>		Kabel 3x25 mm <sup>2</sup>	
	20°C	60°C	20°C	60°C	20°C	60°C
Osłona PCV	wzrost	spadek	wzrost	wzrost	mały	wzrost
Powłoka PCV	spadek	spadek	spadek	spadek	bez zmian	bez zmian
Izolacja PCV	wzrost	mały wzrost	wzrost	wzrost	-	-

Wzrost chłonności wody po okresie eksploatacji pozostaje w bezpośrednim związku z zjawiskiem mikrospękań polwinitu w procesie jego starzenia. Trudno natomiast wyjaśnić spadek wodochłonności powłok po okresie eksploatacji we wszystkich typach kabli.

Ogólnie nie stwierdzono wyraźnego wpływu warunków eksploatacyjnych na własności mechaniczne PCV podanego działania wody i wodnych roztworów kwasu i ługu.

Wyraźny wpływ okresu eksploatacji zaznaczył się na odporności cieplnej wyrażającej się ubytkiem masy polwinitu pod działaniem pola cieplnego o temperaturze 180°C (0,5-1,3) %.

Świadczy to o spadku odporności cieplnej spowodowanym procesem starzenia w okresie eksploatacji kabli. Brak wyraźnych prawidłowości w przebiegu opisanych zmiany własności polwinitów przypisać należy pewnej niejednorodności w budowie chemicznej i fizycznej.

Zaobserwowana wysoka lotność plastyfikatora w podwyższonych temperaturach sugeruje możliwość stopniowego zmniejszania się jego zawartości w polwincie. Prowadzi to w konsekwencji do wzrostu temperatury przemiany zeszklenia w polwincie i wpływa niekorzystnie na własności dielektryczne (współczynnik stratności) w temperaturach pracy kabli.

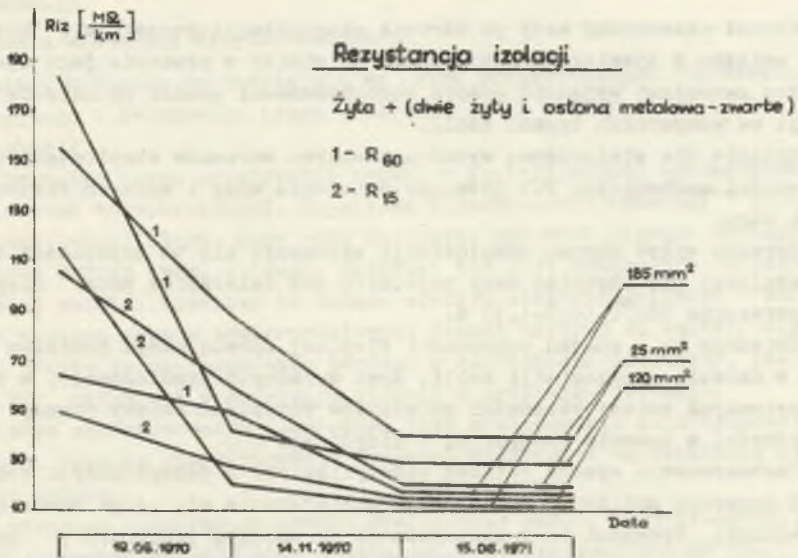
#### b) Badanie własności elektrycznych

Badane kable wykazywały znaczny spadek rezystancji izolacji i osłon w zależności od czasu ułożenia w ziemi. Stwierdzono, że w okresie ok. 2 lat rezystancja izolacji i osłon zmalała od wartości początkowej (pomiar przed ułożeniem kabli w ziemi).

kabel YAKYy	3 x 120 mm <sup>2</sup>	R <sub>15</sub>	117	$\frac{M\Omega}{km}$
		R <sub>60</sub>	176	"-
kabel YAKFoy	3 x 25 mm <sup>2</sup>	R <sub>15</sub>	465	"-
		R <sub>60</sub>	620	"-
kabel YAKYFpy	3 x 185 mm <sup>2</sup>	R <sub>15</sub>	50	"-
		R <sub>60</sub>	68	"-

(R<sub>15</sub>, R<sub>60</sub> oznaczają rezystancję izolacji w temperaturach 15° i 60°C do wartości-pomiary po 2 latach od ułożenie kabli w ziemi).

kabel YAKYy	3 x 120 mm <sup>2</sup>	R <sub>15</sub>	26	$\frac{M\Omega}{km}$
		R <sub>60</sub>	46	"-
kabel YAKYFoy	3 x 25 mm <sup>2</sup>	R <sub>15</sub>	60	"-
		R <sub>60</sub>	90	"-
kabel YAKYFpy	3 x 185 mm <sup>2</sup>	R <sub>15</sub>	20	"-
		R <sub>60</sub>	50	"-



Rys. 5

Przebieg wyników pomiarowych przedstawiono na rys. 5.

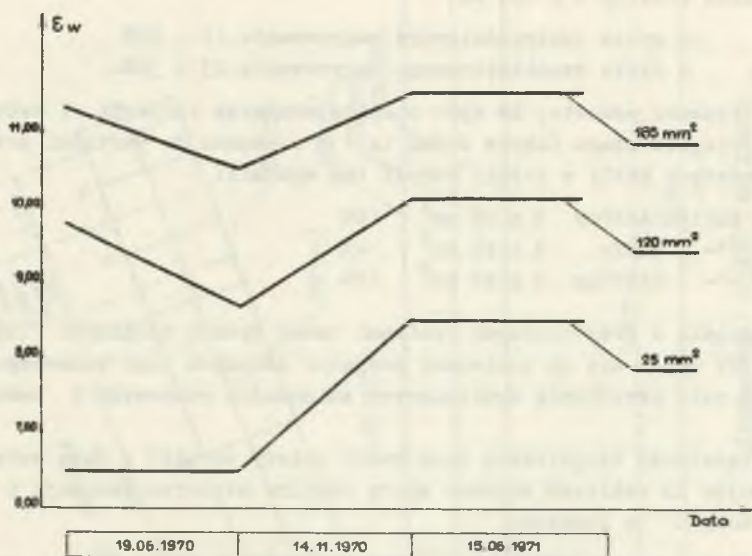
W związku z stosunkowo krótkim okresem trwania badań nie ustalono asymptotycznej wartości rezystancji izolacji i osłon polwinitowych; — na podstawie rys. 5 należy jednak wnosić, że maleje ona w następnych latach



eksploatacji do  $(5 \pm 30) \frac{M\Omega}{km}$ . Wartości rezystancji izolacji PCV w stanie nagrzanym ( $60^{\circ}C$ ) odbiegają od wymagań normy.

Pomierzone wartości współczynnika stratności dielektrycznej kształtują się na poziomie 0,1 nie stwierdzono poważniejszych zmian w okresie eksploatacji. Natomiast we wszystkich przypadkach kabli zaobserwowano ze wzrostem temperatury izolacji maleńie współczynnika stratności od wartości 0,08.

O zmienności stałej dielektrycznej izolacji PCV w funkcji 2 letniego okresu eksploatacji można wnosić na podstawie rys. 6. Otrzymane z pomiarów wartości stałych dielektrycznych rys. 6. Otrzymane z pomiarów wartości stałych dielektrycznych izolacji PCV są wysokie i wynoszą 8,5 - 11,5. Przyczyną tego zróżnicowania wartości są różne czynniki kształtujące własności polwinitu w zakładzie wytwórczym PCV, jak i w zakładzie produkcji kabli.



Rys. 6

Zaobserwowano znaczne różnice stałej dielektrycznej izolacji w okresie badania podanych kabli, a mianowicie:

dla kabla	3 x 185 mm <sup>2</sup>	typu YAKYFpy	11 ± 1,0
- " -	3 x 120 mm <sup>2</sup>	typu YAKYy	9,5 ± 1,5
- " -	3 x 25 mm <sup>2</sup>	typu YAKYFoy	7,0 ± 2,0

przy czym dominuje tendencja wzrostu stałej dielektrycznej. W związku z tym należy się liczyć ze znacznym wzrostem prądu ładowania i prądu ziemnozwarciowego w początkowym okresie eksploatacji kabli.

W związku z pewną zmiennością stałej dielektrycznej izolacji polwinitowej w kablach w funkcji temperatury, należy się spodziewać zmian prądu ziemnozwarciowego w zależności od pory dnia oraz roku.

c) Badanie własności cieplnych izolacji i osłon PCV

Wyżej wymienione kable ułożone w gruncie piaszczysto-gliniastym wykazywały duże przyrosty oporu cieplnego właściwego izolacji i osłon w funkcji temperatury, a mianowicie:

w kablu YAKYFoy	3 x 25 mm <sup>2</sup>	
	w cyklu dwutygodniowego nagrzewania	4 - 33%
	w cyklu dwumiesięcznego nagrzewania	15 - 33%
w kablu YAKYy	3 x 120 mm <sup>2</sup>	
	w cyklu dwutygodniowego nagrzewania	6 - 30%
	w cyklu dwumiesięcznego nagrzewania	18 - 37%
w kablu YAKYFpy	3 x 185 mm <sup>2</sup>	
	w cyklu dwutygodniowego nagrzewania	18 - 20%
	w cyklu dwumiesięcznego nagrzewania	23 - 30%.

Stwierdzono ponadto, że opór cieplny właściwy izolacji i osłon wzrastał z biegiem czasu (okres dwóch lat) w stosunku do wartości przed ułożeniem badanych kabli w ziemi, wzrost ten wynosił:

dla kabla YAKYFoy	3 x 25 mm <sup>2</sup>	16%
"- " YAKYy	3 x 120 mm <sup>2</sup>	14%
"- " YAKYFpy	3 x 185 mm <sup>2</sup>	18%

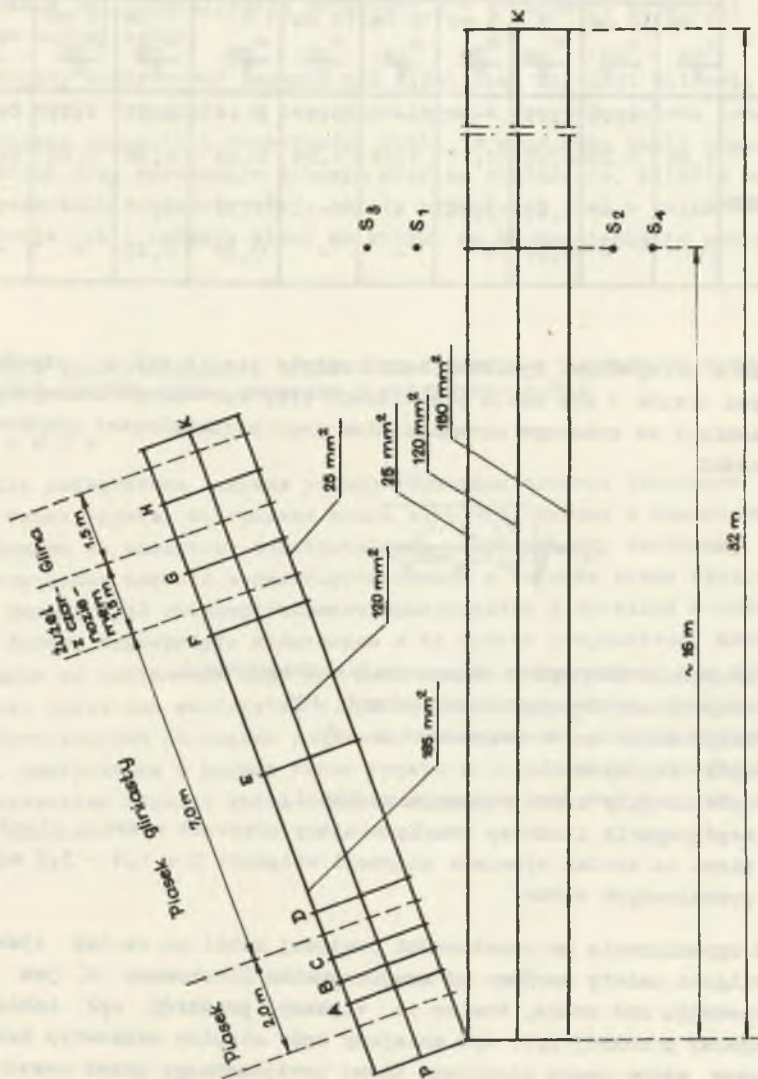
W związku z przytoczonymi wynikami badań oporów cieplnych izolacji i osłon PCV uważa się za konieczne podjęcie dalszych prac badawczych mających na celu określenie wymienionych zmienności czasowych i temperaturowych.

Obciążalność długotrwałą tych kabli należy ustalić z dużą ostrożnością przyjmując do obliczeń większe opory cieplne właściwe izolacji i osłon od pomierzonych w fabryce.

d) Zajawisko migracji wilgoci w ziemi otaczającej kable badano za pomocą ponad 110 czujników termometrycznych umieszczonych na badanych kablach i w otaczającej je ziemi (rys. 7).

Na zjawisko migracji wilgoci wywierają zasadniczy wpływ: średnica zewnętrznej warstwy polwinitu i własności gruntu. Ilustrację tego wpływu przedstawiono w tablicy 3.

W przypadku ziemi piaszczysto-gliniastej opór cieplny właściwy 5 cm warstwy gruntu przylegającej bezpośrednio do badanego kabla, jest od 1,7 do ok. 4-krotnie większy od oporu cieplnego średniego ziemi, a w przypadku żużla hutniczego z czarnoziemem oraz piasku krotność ta dochodzi do 12.



Ułożenie kabli w ziemi

Rys. 7

Tablica 3

Zestawienie średnich oporności cieplnych właściwych gruntów wyznaczonych na podstawie pomiarów z dwumiesięcznego nagrzewania kabli ułożonych w ziemi

Kabel typ ziemi	YAKFoy 3 x 25mm <sup>2</sup>			YAKYy 3 x 120 mm <sup>2</sup>				YAKYFpy 3x185mm <sup>2</sup>		
	5 cm $\frac{\theta_{cm}}{W}$	10 cm $\frac{\theta_{cm}}{W}$	c $\frac{\theta_{cm}}{W}$	5 cm $\frac{\theta_{cm}}{W}$	10 cm $\frac{\theta_{cm}}{W}$	15 cm $\frac{\theta_{cm}}{W}$	c $\frac{\theta_{cm}}{W}$	5 cm $\frac{\theta_{cm}}{W}$	10 cm $\frac{\theta_{cm}}{W}$	c $\frac{\theta_{cm}}{W}$
Piasek	-	1,09	0,49	-	-	0,91	0,41	5,01	1,75	0,44
Piaszczysto- gliniasty	1,66	1,20	0,55	1,71	1,21	1,06	0,63	2,32	0,89	0,62
Żużel z czar- noziemem	-	-	1,06	3,76	-	-	1,38	12,59	-	1,27
Gliniasty	-	-	0,61	-	-	-	0,30	0,45	-	-

W związku z otrzymanymi wynikami badań należy się liczyć z utrudnieniem odpływu ciepła z żył kabla pracującego przy wyrównanym dobowym grafiku obciążenia i ze znacznym ograniczeniem jego obciążalności prądowej w myśl zależności

$$J_d = \sqrt{\frac{\vartheta_d - \vartheta_0}{R_{\vartheta} (S_k + K S_z)}}$$

gdzie

- $J_d$  - obciążalność prądowa dopuszczalna długotrwale,
- $\vartheta_d$  - temperatura dopuszczalna izolacji PCV
- $R_{\vartheta}$  - rezystancja żył w temperaturze  $\vartheta_d$ ,
- $S_k$  - opór cieplny kabla,
- $S_z$  - opór cieplny ziemi otaczającej kabel,
- $K$  - współczynnik liczbowy uwzględniający przyrost oporu cieplnego ziemi na skutek zjawiska migracji wilgoci:  $K = 1,0 - 3,0$  wg przeprowadzonych badań.

Stopień ograniczenia przepustowości prądowej kabli na skutek zjawiska migracji wilgoci zależy zarówno od współczynnika liczbowego  $K$ , jak również od przekroju żył kabla, bowiem im większy przekrój żył kabla, a tym samym im większy przekrój żył, tym mniejszy opór cieplny całkowity kabla i tym większy wpływ oporu cieplnego ziemi powiększonego przez wysychanie warstw przylegających do kabla. Wg przeprowadzonych badań ograniczenie przepustowości kabli na skutek zjawiska migracji wilgoci może dochodzić do 40%.

Podsumowanie

1. Badania własności kabli o izolacji i osłonach polwinitowych wykazały, że zastosowane w opisanych kablach materiały różnią się znacznie między sobą. Wskazuje to na pewną niedoskonałość procesów technologicznych w odniesieniu zarówno do surowca wyjściowego, jak i do produkcji kabli. Należałoby więc udoskonalić proces produkcji i podjąć dalsze badania nad optymalizacją struktury PCV w aspekcie własności koniecznych do budowy kabli.
2. Należy kontynuować badania nad zjawiskiem migracji wilgoci, zależnym od wielu czynników, w celu zapobiegania przyśpieszonemu procesowi starzenia izolacji i awaryjności kabli. W przypadku kabli pracujących w ziemi przy wyrównanym dobowym grafiku obciążenia, bliskim wartości dopuszczalnej długotrwałej, należy ograniczyć prąd w zależności od przekroju żył i rodzaju ziemi od kilku do kilkudziesięciu procent.

**ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ АГЕНТОВ НА СВОЙСТВА И НАДЕЖНОСТЬ РАБОТЫ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ 6кВ в изоляции и оболочках из РСВ****Резюме**

Для определения влияния эксплуатационных агентов теплового поля, разных типов грунта, содержания влаги в грунте, кислых и солевых растворов и времени на изменение электрических, механических, тепловых, физических и химических свойств кабелей—расположено в четырёх типах грунта три разные кабели 6 кВ государственного производства в изоляции и оболочках из РСВ. Эти кабели подвергнуто испытаниям и на основе результатов измерений, собранных на протяжении двух лет дано важные рекомендации для кабельных заводов, проектных институтов и персонала обслуживающего кабельные сети.

Одновременно проведены детальные исследования явления миграции влаги, выступающие в разных типах грунта вокруг внешней поверхности кабеля и определено влияние этого явления на допустимый ток нагрузки и работу этих кабелей.

AN EFFECT OF EXPLOITATION CONDITIONS ON PROPERTIES AND RELIABILITY  
OF 6 kV POWER CABLES IN PVC INSULATION AND COVERING

S u m m a r y

Three different, made in Poland, 6 kV cables in PCV insulation and covering were laid in four types of the ground for about two years in order to examine an effect of exploitation conditions (e.g.: thermic field, different types of ground, acidic and basic solutions and time) on their electric, mechanical, thermic, physical and chemical properties. The analysis of the results brought certain conclusions being of particular importance for cable manufacturers, designers and users. At the same time moisture migration near the cable surfaces was tested in details. The effect of this phenomenon on admissible current-carrying capacity and work of the cables was determined.