

Gerard BARTODZIEJ

Wiktor KIŚ

Instytut Elektroenergetyki
i Sterowania Układów
Politechniki ŚląskiejOBLICZANIE OBCIĄŻALNOŚCI PRĄDOWEJ DŁUGOTRWAŁEJ LINII KABLOWEJ
LOKALNIE NIEJEDNORODNEJ

Streszczenie. Zaproponowano łatwy sposób obliczania obciążalności prądowej długotrwałej linii kablowej z lokalną niejednorodnością warunków ułożenia kabla. Warunki odprowadzania ciepła z kabla elektroenergetycznego nie są na ogół jednakowe wzdłuż całej trasy linii kablowej. Zasadnicze niejednorodności parametrów cieplnych występują przeważnie lokalnie i obejmują stosunkowo krótkie odcinki kabla. Niejednorodność taką tworzy np. odcinek kabla w obrębie przepustu kablowego, gdzie warunki odprowadzania ciepła bywają znacznie gorsze niż w innych miejscach linii kablowej. Stwierdzono, że lokalne pogorszenie warunków odprowadzania ciepła może znacznie obniżyć obciążalność prądową długotrwałą całej linii kablowej. Zbudowano uproszczony model obwodowy elektryczny rozpatrywanych zjawisk cieplnych i zaproponowano odpowiedni algorytm obliczeń numerycznych. W obliczeniach uwzględniono zależność mocy źródeł ciepła od temperatury, pominięto natomiast nieliniowość oporów cieplnych. Parametry modelu dają się wyznaczyć w sposób prosty, przy użyciu łatwo dostępnych danych. Przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń oraz wnioski.

1. Wprowadzenie

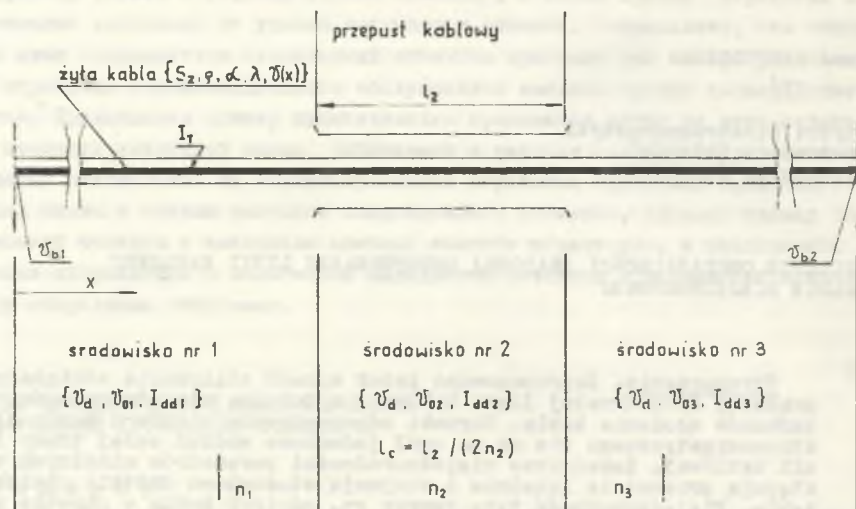
Dobierając kabel elektroenergetyczny do określonych warunków eksploatacyjnych należy spełnić między innymi wymaganie:

$$I_{dd} \geq I_{obl} \quad (1)$$

Wartość prądu obliczeniowego I_{obl} jest wówczas zadana, natomiast wartość graniczna prądu dopuszczalnego długotrwałe I_{dd} zależy jednocześnie od parametrów kabla i warunków jego ułożenia. Odpowiednie przepisy [1] podają wartości I_{dd} przy ściśle określonych warunkach otoczenia (I_{ddn}) oraz zestawienie współczynników korekcyjnych dla przeliczenia na warunki inne. Odnosi się to jednak do przypadków, gdy kabel ułożony jest w środowisku jednorodnym pod względem warunków wymiany ciepła.

W praktyce na trasie kabli niemal zawsze występują jakieś lokalne niejednorodności, np. w postaci różnego rodzaju przepustów kablowych lub

miejsce z odmiennymi warunkami ułożenia oraz obliczeniową temperaturą otoczenia inną niż dla pozostałej części trasy kabla (rys. 1).



Rys. 1. Szkic sytuacyjny

linii kablowej z lokalną niejednorodnością środowiska ułożenia kabla. Oznaczenia: λ - przewodność cieplna jednostkowa materiału żyły kabla; ρ, α - rezystowność elektryczna i współczynnik temperaturowy rezystowności żyły; S_z - powierzchnia przekroju żyły; ψ_d - temperatura graniczna dopuszczalna długotrwale; $\psi(x)$ - rozkład temperatury żyły wzdłuż kabla; $\psi_{01}, \psi_{02}, \psi_{03}$ (krócej ψ_{0j}) - obliczeniowa temperatura otoczenia odpowiednio dla trzech środowisk ($j=1, 2, 3$); ψ_{b1}, ψ_{b2} - warunki brzegowe podane w postaci temperatury żyły kabla w dużej odległości od środowiska nr 2; I_r - prąd płynący w żyłę kabla; $I_{dd1}, I_{dd2}, I_{dd3}$ (krócej I_{dj}) - prąd graniczny dopuszczalny długotrwale linii kablowej ułożonej w warunkach środowiskowych jednorodnych odpowiednio nr $j=1, 2, 3$; l_1 - długość kabla w obrębie środowiska nr j ; n_2 - ilość wycinków utworzonych przez podział odcinka $l_2/2$ na jednakowe części (wartość n_2 jest przyjmowana); n_1, n_3 - ilość wycinków o długości l_1 wyodrębnionych odpowiednio z l_1 oraz l_3 (wartości $n_1=n_3$ są przyjmowane)

Fig. 1. Location sketch of a cable

line with the local heterogeneity of its surrounding medium. Denotations: λ - unit thermal conductivity of cable conductor; ρ, α - electrical resistivity and temperature coefficient of cable conductor resistivity; S_z - cross-section of cable conductor; ψ_d - maximum long-lasting admissible temperature; $\psi(x)$ - cable conductor temperature distribution along a cable; $\psi_{01}, \psi_{02}, \psi_{03}, (\psi_{0j})$ - calculation ambient temperature for three mediums respectively ($j=1, 2, 3$); ψ_{b1}, ψ_{b2} - boundary conditions specified by the temperature of cable conductor distant from the second medium; I_r - cable conductor current; $I_{dd1}, I_{dd2}, I_{dd3}, (I_{dj})$ - maximum long-lasting admissible current for a cable line working in homogeneous environmental conditions denoted as $j=1, 2, 3$ respectively; l_1 - length of cable within j -medium; n_2 - number of sectors set up by uniform segmentation of $l_2/2$ section (value of n_2 is assumed); n_1, n_3 - number of sectors with l_1 length isolated from l_1 and l_3 respectively (values of $n_1=n_3$ are assumed)

Wartość I_{dd} w takich warunkach zależy więc również od rozległości i parametrów cieplnych niejednorodności. Ilościowe ujęcie tych zależności może być przydatne w praktyce projektowej. Zachodzi przy tym potrzeba odwzorowania linii kablowej za pomocą parametrów możliwych do wyznaczenia w prosty sposób, przy użyciu łatwo dostępnych danych.

2. Metoda wyznaczania obciążalności prądowej długotrwałej linii kablowej lokalnie niejednorodnej

Definicja obciążalności długotrwałej granicznej (wartości prądu dopuszczalnego długotrwałe I_{dd}) wiąże tę wielkość z najwyższą temperaturą dopuszczalną długotrwałe ϑ_d [1]. Wyznaczanie I_{dd} w przypadku kabla ułożonego w warunkach niejednorodnych wymaga więc sprawdzania rozkładów temperatury wzdłuż żył kabla, przy różnych wartościach przepływającego prądu I_r .

W praktyce zdarza się często, że wzdłuż trasy linii kablowej występuje więcej niż jedna niejednorodność. Odległości między nimi są jednak zwykle znaczne, co praktycznie eliminuje potrzebę uwzględniania wpływów wzajemnych. Pozwala to na ograniczenie rozważań do układu z jedną niejednorodnością (rys. 1). Warunki ułożenia kabla po obu stronach tej niejednorodności mogą, ale nie muszą być jednakowe; stąd rozróżnienie trzech środowisk kabla. Istotne jest przy tym, że:

- gdyby cała trasa linii kablowej przebiegała tylko w jednym z tych środowisk, to wartość I_{dd} byłaby znana [1] i wyniosłaby odpowiednio: I_{dd1} , I_{dd2} lub I_{dd3} (inaczej I_{dj} , $j=1,2,3$);
- jeśli zaniedba się nieliniowość oporów cieplnych linii kablowej, to temperatura żyły kabla w środowisku o temperaturze ϑ_{oj} , w znacznej odległości od środowiska nr 2, przy przepływie długotrwałym o wartości I_r osiągnie wartość ϑ_{bj} wynikającą z prawa Ohma dla zjawisk cieplnych:

$$\vartheta_{bj} - \vartheta_{oj} = G_{oj} P_{rj} = \frac{\vartheta_d - \vartheta_{oj}}{P_{dj}} P_{rj} = (\vartheta_d - \vartheta_{oj}) \frac{I_r^2 [1 + \alpha(\vartheta_{b,1} - 20)]}{I_{dj}^2 [1 + \alpha(\vartheta_d - 20)]} \quad (2)$$

czyli:

$$\vartheta_{bj} = \frac{\left(\frac{I_r}{I_{dj}}\right)^2 (1 - 20\alpha)(\vartheta_d - \vartheta_{oj}) + \vartheta_{oj} [1 + \alpha(\vartheta_d - 20)]}{1 + \alpha(\vartheta_d - 20) - \left(\frac{I_r}{I_{dj}}\right)^2 \alpha(\vartheta_d - \vartheta_{oj})} \quad (3)$$

przy $j=1$ lub 3 oraz pozostałych oznaczeniach wyjaśnionych przy rys. 1; - podobieństwo matematyczne zjawisk termodynamicznych i elektrycznych [2] sprawia, że w przypadku elektryków naturalną metodą rozwiązywania zagadnień cieplnych jest stosowanie modeli obwodowych.

Do wyznaczania rozkładu temperatury wzdłuż żył kabla zastosowano model obwodowy elektryczny, pokazany na rys. 2. Źródła ciepła P_d i przewodności cieplne poprzeczne G_o , odniesione do jednostki długości linii kablowej (rys. 2a), mają w każdym z trzech środowisk kabła ($j=1;2;3$) inne wartości:

$$P_{dj} = \frac{I_{dj}^2 \rho (1 + \alpha v_d)}{S_z},$$

$$G_{oj} = \frac{P_{dj}}{v_d - v_{oj}}.$$

Jedynie jednostkowy opór cieplny osiowy R_o ma wartość taką samą:

$$R_o = \frac{1}{\lambda S_z}.$$

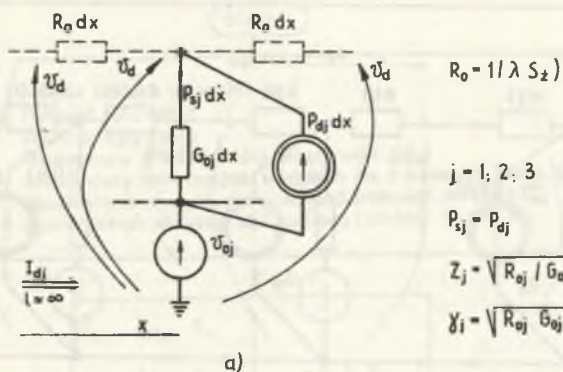
Parametry P_c , G_c oraz R_c czwórnika [5] zastępującego określony wycinek linii kablowej (rys. 2b) będą więc również zależały od środowiska kabła:

$$P_{cj} = \frac{P_{dj} \operatorname{sh}(\gamma_j l_c)}{\gamma_j},$$

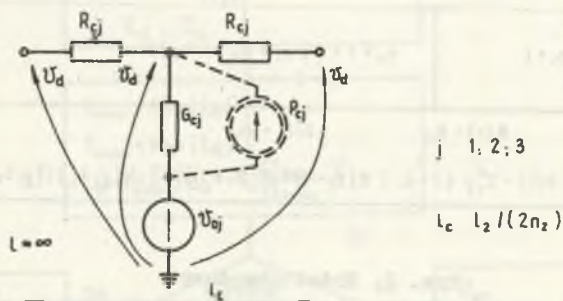
$$G_{cj} = \frac{\operatorname{sh}(\gamma_j l_c)}{z_j},$$

$$R_{cj} = z_j \operatorname{th} \frac{\gamma_j l_c}{2}.$$

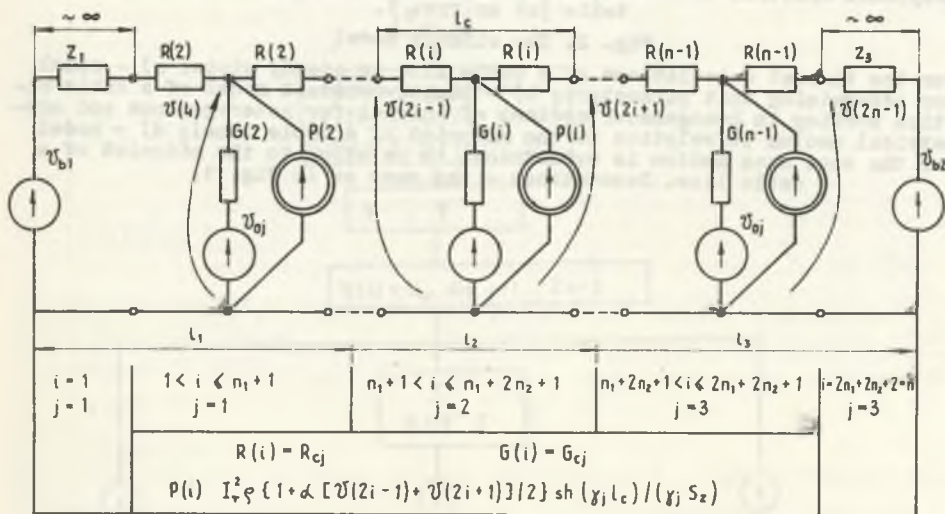
Zmiana prądu w linii kablowej z wartości I_{ddj} na inną (np. I_r), przy utrzymaniu założenia o liniowości oporów cieplnych, zmieni tylko wartość źródła P w czwórnikach. Zatem model obwodowy linii kablowej z lokalną niejednorodnością będzie miał postać taką jak na rys. 2c. W przypadku symetrii układu ($I_{dd1}=I_{dd3}$ oraz $v_{o1}=v_{o3}$) model ten redukuje się do postaci podanej na rys. 2d.



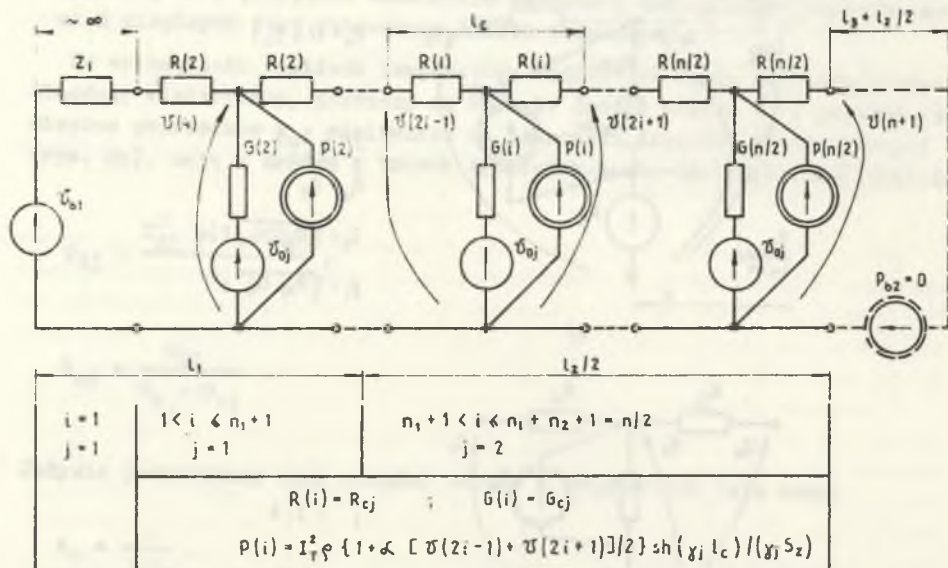
a)



b)



c)



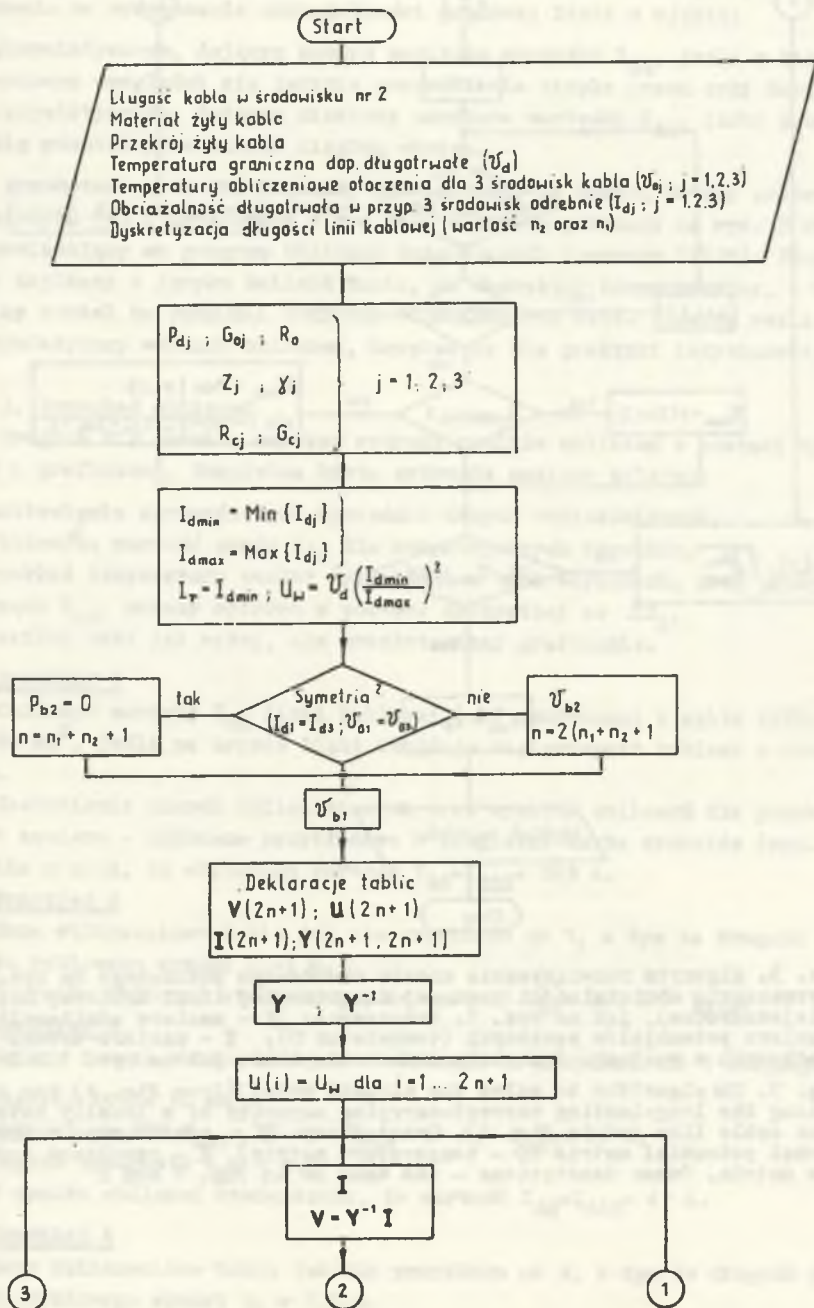
d)

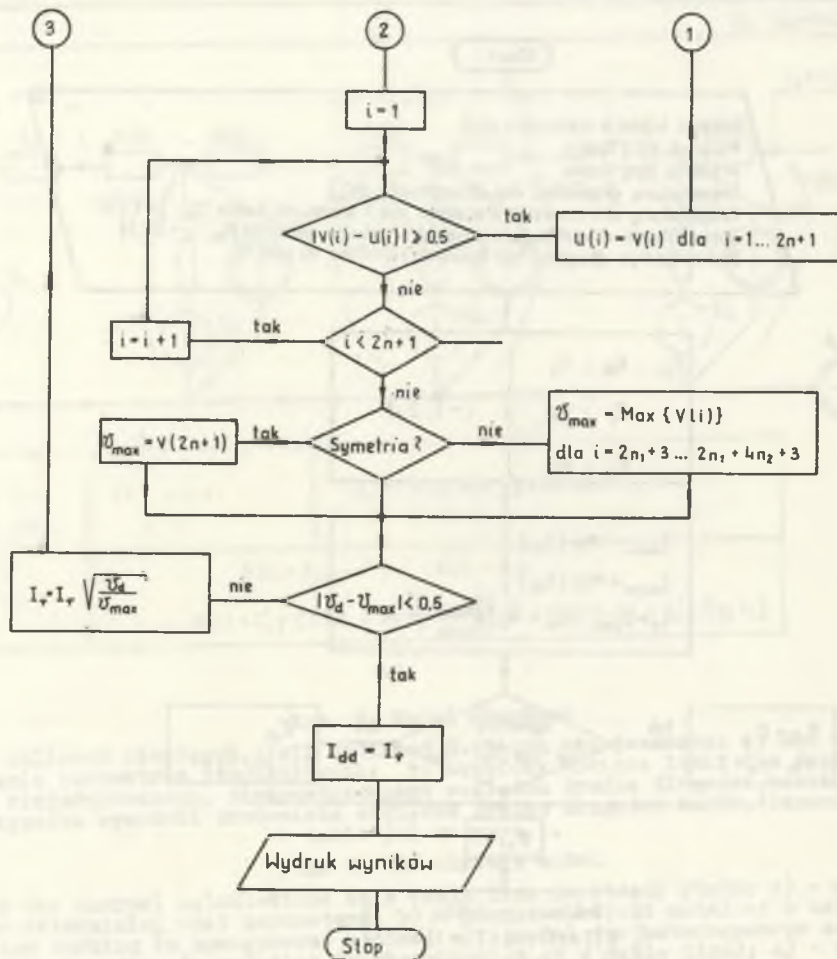
Rys. 2. Model obwodowy

do obliczeń cieplnych linii kablowej w stanie stacjonarnym; a) dla wyznaczenia parametrów jednostkowych; b) skupiony wycinka linii dla środowiska niejednorodnego, niesymetrycznego względem środka długości kabla, d) w przypadku symetrii środowiska względem środka długości kabla. Oznaczenia takie jak na rys. 1.

Fig. 2. The circuit model

for the thermal calculations of a cable line in steady state; a) - model for determining unit parameters; b) - lumped-constant model of a cable section working in homogeneous medium; c) - model for heterogeneous and asymmetrical medium in relation to the midpoint of a cable line; d) - model for the case when medium is symmetrical in relation to the midpoint of a cable line. Denotations - the same as in Fig. 1.





Rys. 3. Algorytm rozwiązywania modelu obwodowego pokazanego na rys. 2 dla wyznaczania obciążalności prądowej długotrwałej linii kablowej lokalnie niejednorodnej, jak na rys. 1. Oznaczenia: \mathbf{Y} - macierz admittancji; \mathbf{V} - macierz potencjałów węzłowych (temperatur ψ); \mathbf{I} - macierz źródeł wypadkowych w węzłach. Pozostałe oznaczenia takie jak na rys. 1 i 2

Fig. 3. The algorithm to solve the circuit model (from Fig. 2) for calculating the long-lasting current-carrying capacity of a locally heterogeneous cable line (as in Fig. 1). Denotations: \mathbf{Y} - admittances matrix, \mathbf{V} - nodal potential matrix (ψ - temperature matrix), \mathbf{I} - resultant node source matrix. Other denotations - the same as in Fig. 1 and 2

Zależnie od sposobu uwzględnienia parametrów kabla rozpatrywany model pozwala na wyznaczanie obciążalności prądowej linii w ujęciu:

- pesymistycznym, dającym zawsze zaniżone wartości I_{dd} , jeśli w kierunku osiowym uwzględni się jedynie przewodzenie ciepła przez żyły kabla,
- optymistycznym, dającym niekiedy zawyżone wartości I_{dd} , jeśli uwzględni się również przewodność cieplną ekranu.

Przedstawiony model obwodowy rozwiązywano za pomocą metody potencjałów węzłowych [6]. Opracowano w tym celu algorytm pokazany na rys. 3 oraz odpowiadający mu program obliczeń numerycznych (nazwany "K1P"). Program ten napisany w języku Mallard Basic, ma charakter konwersacyjny, a uruchomiony został na PERSONAL COMPUTER SCHNEIDER PCW 8256. Program realizuje pesymistyczny wariant obliczeń, bezpieczny dla praktyki inżynierskiej.

3. Przykład obliczeń

Program K1P pozwala uzyskać wydruki wyników obliczeń w postaci cyfrowej i graficznej. Kompletna karta wydruków zawiera kolejno:

- zestawienie wprowadzonych uprzednio danych obliczeniowych,
- obliczoną wartość prądu I_{dd} dla rozpatrywanych warunków,
- rozkład temperatury wzdłuż żyły kabla w tych warunkach, przy przepływie prądu I_{dd} , podany cyfrowo w postaci dyskretnej co Δl_2 ,
- rozkład taki jak wyżej, ale przedstawiony graficznie.

Przykład 1

Obliczyć wartość I_{dd} linii kablowej 6 kV zbudowanej z kabla YAKYy 3x240 mm², jeśli na trasie linii znajduje się przepust kablowy o długości 5 m.

Zestawienie danych obliczeniowych oraz wyników obliczeń dla przykładu nr 1 zawiera - pokazana przykładowo - kompletna karta wydruków (rys. 4). Wynika z niej, że obliczona wartość $I_{dd}=I_{dd2}=263$ A.

Przykład 2

Dane obliczeniowe takie jak dla przykładu nr 1, z tym że długość przepustu kablowego wynosi $l_2=1$ m.

W wyniku obliczeń stwierdzono, że wartość $I_{dd}=297$ A $>$ I_{dd2} .

Przykład 3

Zmiany danych obliczeniowych w stosunku do przykładu nr 1 obejmują:

- przekrój kabla 10 mm²,
- wartości prądów $I_{dd1}=56$ A, $I_{dd2}=41$ A, $I_{dd3}=56$ A,
- długość przepustu $l_2=1$ m.

W wyniku obliczeń stwierdzono, że wartość $I_{dd}=I_{dd2}=41$ A.

Przykład 4

Dane obliczeniowe takie jak dla przykładu nr 3, z tym że długość przepustu kablowego wynosi $l_2=0,2$ m.

W wyniku obliczeń stwierdzono, że wartość $I_{dd}=48$ A $>$ I_{dd2} .

DANE OBLICZENIOWE LINII KABLOWEJ

- materiał żyły:	Al
- przekrój żyły:	240 mm ²
- temp. granicz. dop. długotrw.:	70 stop.C
- temp. obliczeniowa otocz. w środowisku nr 1:	20 stop.C
- temp. obliczeniowa otocz. w środowisku nr 2:	20 stop.C
- temp. obliczeniowa otocz. w środowisku nr 3:	20 stop.C
- prąd dop. długotrwanie w warunkach środow. nr 1:	356 A
- prąd dop. długotrwanie w warunkach środow. nr 2:	263 A
- prąd dop. długotrwanie w warunkach środow. nr 3:	356 A
- długość odcinka ułożonego w środow. nr dwa:	12= 5 m
- długość kabla w obrębie środow. nr 1 i 3 jest >> niż w nr 2	

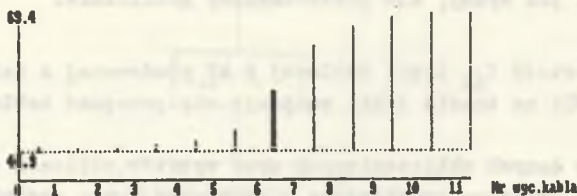
W Y N I K I O B L I C Z E Ń

PRĄD DOPUSZCZALNY DŁUGOTRWALE $I_{dd} = 263 \text{ A}$

TEMPERATURA ŻYŁY NA BRZEGACH KOLEJNYCH WYCINKÓW KABLA;
(patrz również rysunek niżej)

44.9	44.9	45	45.2	45.8	48	55.2	63.6
67.2	68.7	69.3	69.4				

TEMP.; stop.C



Rozkład temperatury wzdłuż kabla
(od wybrsu jest symetryczny względem końca wycinka nr 11)

Odcinek kabla ułożony w środowisku nr 2 reprezentowany jest przez wycinki nr 7 do nr 11
Wszystkie wycinki, z wyj. nr 1 i nr 22 są o jednakowej długości, wyznac. przez podział odc. 12= 5 m na 10 części

Rys. 4. Przykład rozkładu temperatury

Fig. 4. The example of temperature

4. Wnioski

1. Proponowany sposób obliczania wartości granicznej prądu dopuszczalnego długotrwale (I_{dd}) linii kablowej z lokalną niejednorodnością warunków ułożenia może znaleźć bezpośrednie zastosowanie przy projektowaniu linii kablowych.

2. Wyniki obliczeń wskazują na istotny wpływ krótkich odcinków o gorszych warunkach odprowadzania ciepła na obciążalność linii kablowej. Jeżeli odcinek stanowiący pojedynczą niejednorodność ma długość 5 m lub więcej, to praktycznie zawsze decyduje on o wartości I_{dd} całej linii kablowej. W przypadku krótszych odcinków celowe jest zastosowanie zaproponowanej metody obliczeń dla wyznaczania obciążalności linii.

LITERATURA

- [1] Przepisy budowy urządzeń elektrycznych. Zeszyt 10. Wydawnictwo Przemysłu Maszynowego WEMA, Warszawa 1980.
- [2] HERING M.: Termokinetyka dla elektryków. WNT, Warszawa 1980.
- [3] BARTODZIEJ G., KIŚ W.: Zastosowanie teorii linii elektrycznej jednorodnej do określania temperatur prądowych skokowo-niejednorodnych. Zesz. Nauk. Polit. Śląskiej s. "Elektryka", z. 76, Gliwice 1981.
- [4] BARTODZIEJ G., KIŚ W.: Wyznaczanie obciążalności prądowej torów prądowych w urządzeniach elektroenergetycznych. Zesz. Nauk. Polit. Śląskiej "Elektryka", z. 85, Gliwice 1983.
- [5] BARTODZIEJ G., KIŚ W.: Obliczanie rozkładu temperatury wzdłuż torów prądowych niejednorodnych. Materiały z konf. "Urządzenia Elektroenergetyczne", Bielsko-Biała 1983.
- [6] BOLKOWSKI S.: Elektrotechnika teoretyczna. Teoria obwodów elektrycznych. WNT, Warszawa 1982.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Romuald Włodek

Wpłynęło do redakcji dnia 15 czerwca 1989 r.

РАСЧЕТЫ ДЛИТЕЛЬНОЙ ТОКОВОЙ НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ С ЛОКАЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТЬЮ

Резюме

Предложен простой способ определения длительной нагрузочной способности кабельной линии с локальной неоднородностью условий расположения кабеля. Условия отвода тепла от энергетического кабеля вдоль трассы линии не одинаковы. Основные неоднородности тепловых параметров относятся к сравнительно коротким участкам кабеля. Такая неоднородность появляется, например, в райо-

не кабельного пропуска, где условия отвода тепла могут быть хуже, чем в других местах кабельной линии. Установлено, что локальное ухудшение условий отвода тепла может значительно понизить длительную нагрузочную способность кабельной линии в целом. Для рассмотрения тепловых явлений построена упрощённая модель в виде электрической цепи и предложен соответственный алгоритм числовых расчётов. В расчётах учтена зависимость источников тепла от температуры, зато пренебрегается нелинейностью тепловых сопротивлений. Параметры модели легко определить, пользуясь общедоступными данными. Приведены, в виде примера, результаты расчётов и выводы.

LONG-LASTING CURRENT-CARRYING CAPACITY CALCULATION OF A LOCALLY HETEROGENEOUS CABLE LINE

S u m m a r y

An easy method of calculation of long-lasting current-carrying capacity of a cable line characterized by local heterogeneity of its laying conditions has been suggested. The heat transfer conditions in general are not identical along the whole cable run. The basic heat parameter heterogeneities appear mostly as local ones and they concern relatively short sectors of the cable.

Such heterogeneity is created, for instance, by the cable sector within the cable culvert where the heat transfer conditions happen to be much worse than in other points of the same cable line.

It has been found that the local worsening of heat transfer conditions may reduce considerably the long-lasting current-carrying capacity of the cable line as a whole. Considering the above regularity a simplified electrical circuit model to reproduce considered heat phenomena has been worked out, and a suitable algorithm for computer calculations has been suggested. The dependence of heat sources on the temperature has been taken into account in the calculations whereas the non-linearity of heat resistances has been neglected.

Parameters of the model can be easily determined by means of easily accessible data. Some exemplary calculation results and suitable conclusions have also been presented.