

JERZY MACEKKO

Zakład Budowy Sieci Elektrycznych  
ELBUD - Katowice

## OBCIĄŻALNOŚĆ PRZEWODÓW ROBOCZYCH LINII NAWIETRZNYCH WYSOKIEGO NAPIĘCIA

Część II

## ANALIZA WARUNKÓW ATMOSFERYCZNYCH

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono metodę uwzględnienia rozkładu kierunku wiatru przy obliczaniu rozkładu temperatury przewodu linii napowietrznej. Uwzględnienie rozkładu kierunku wiatru zmniejsza prędkości wiatru (rys.1) i zwiększa temperatury przewodu dla tych samych prawdopodobieństw wystąpienia. Podano wzory do przeliczenia prędkości wiatru z wysokości pomiaru na wysokość przewodu (wzory 2,3). Zaproponowano dokładniejszy sposób obliczania mocy cieplnej promieniowania słonecznego padającego na powierzchnię przewodu (wzór 4). Uwzględnia on promieniowanie słoneczne bezpośrednie, rozproszone oraz dodatkowo odbite od podłoża. Sposób ten daje wyższe o kilka K temperatury przewodu. Określono zależność regresyjną między bezpośrednim i całkowitym promieniowaniem słonecznym (wzory 5). Dokonano oceny korelacji między temperaturą powietrza, prędkością wiatru i promieniowaniem słonecznym. Wykazano, że w wyodrębnionych jednorodnych okresach czasu można założyć niezależność tych czynników.

## 1. Wprowadzenie

Temperatura przewodu linii napowietrznej zależy od prądu płynącego przewodem oraz od czynników atmosferycznych panujących wzdłuż linii, głównie prędkości wiatru i jego kierunku względem linii, temperatury powietrza oraz promieniowania słonecznego.

Celem określenia rozkładu temperatury przewodu niezbędna jest znajomość charakterystyk statystycznych wymienionych czynników oraz ich korelacji. Przeprowadzono analizy statystyczno-probabilistyczne czynników atmosferycznych w aspekcie ich wpływu na rozkład temperatury przewodu. Analizy te przeprowadzono na zbiorze codziennych danych statystycznych za okres letni (kwiecień-październik 1976 r.) ze stacji meteorologicznych Katowice-Muchowiec i Chorzów Planetarium. Na podstawie analiz przyjęto dla całego okresu letniego łączne rozkłady prawdopodobieństwa czynników atmosferycznych, wyodrębniono natomiast w ciągu doby trzy jednorodne okresy:

1.  $9^{\circ\circ} - 17^{\circ\circ}$ ,
2.  $6^{\circ\circ} - 8^{\circ\circ}$ ;  $18^{\circ\circ} - 20^{\circ\circ}$ ,
3.  $21^{\circ\circ} - 5^{\circ\circ}$ .

Analizy pozwoliły na wprowadzenie modyfikacji obliczania rozkładu temperatury przewodu w porównaniu z metodami dotychczas stosowanymi. Modyfikacje te dotyczą sposobu uwzględniania wiatru i promieniowania słonecznego. Sposób uwzględniania wpływu rozkładu temperatury otoczenia na rozkład temperatury przewodu nie budzi wątpliwości i nie jest rozważany w artykule.

## 2. Rozkład kierunku wiatru

W dotychczasowych pracach przy obliczaniu rozkładu temperatury przewodu nie uwzględniano rozkładu kierunku wiatru względem linii. Kierunek ten ma istotny wpływ na chłodzenie przewodu. Został on uwzględniony przez zastąpienie rozkładu prędkości  $V$  wiatru wiejącego pod zmiennym kątem względem linii (wiatr niesorientowany), rozkładem prędkości  $V_z$  tzw. wiatru zorientowanego, który wieje pod stałym kątem prostopadle do linii ( $\omega = 0$ ) i odbiera z przewodu taką samą moc cieplną jak odpowiadający mu wiatr niesorientowany, tzn:

$$P_K(V, \omega) = P_K(V_z, \omega = 0) \quad (1)$$

Wartości kąta  $\omega$  dla różnych prędkości wiatru [niesorientowanego i odpowiadających im prędkości wiatru zorientowanego, obliczone przy zachowaniu równości (1), są zamieszczone w tabelicy 1.

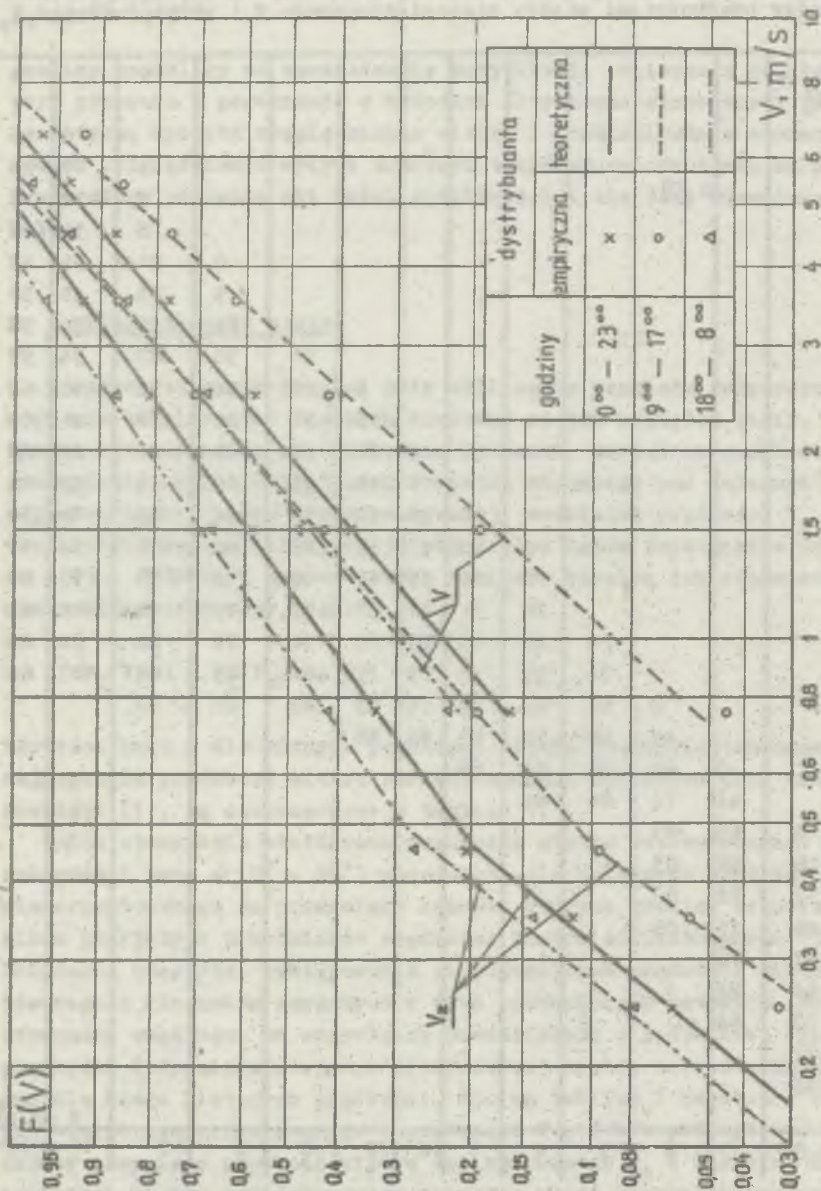
Celem utworzenia histogramu prędkości wiatru zorientowanego zakres zmienności kąta  $\omega$  ( $0^{\circ} - 90^{\circ}$ ) podzielono dla kolejnych prędkości wiatru niesorientowanego na przedziały katowe, których granice odpowiadają granicom przyjętych przedziałów prędkości wiatru zorientowanego (tablica 1). Obliczono częstości występowania poszczególnych prędkości wiatru niesorientowanego z kierunków zawartych w tych przedziałach katowych. Następnie zsumowano częstości we wszystkich przedziałach o jednakowej dyskretnej prędkości (odpowiadającej tym przedziałom) wiatru zorientowanego uzyskując dla niego histogram prędkości, np. wg tablicy 1 częstości występowania wiatru niesorientowanego o prędkości  $V = 2$  m/s pod kątem  $\omega \in (74^{\circ} - 85^{\circ})$  należy przypisać prędkość wiatru zorientowanego  $V_z = 0,5$  m/s. Histogram prędkości wiatru zorientowanego uzyskano przez zsumowanie wszystkich częstości występujących w przedziałach, którym przypisano określone prędkości wiatru zorientowanego, np. wg tablicy 1 do prędkości 0,2 m/s histogramie dla wiatru zorientowanego należy salicyć częstości występowania wiatru

Tablica 1

Kąty w kierunku wiatru względem normalnej do linii, określające zależność między prędkościami wiatru niezorientowanego  $V$  i zorientowanego  $V_z$

12	$V_z$												0
11,5	[m/s]												7
11													0 16
10,5													7 28
10		$\omega$ [°]										0	18 36
9,5												8	30 42
9									0	21	39	47	47
8,5									9	33	45	52	52
8								0	24	41	50	56	56
7,5								11	36	47	54	59	59
7							0	27	44	52	58	62	62
6,5							13	39	50	57	61	65	65
6					0	31	47	55	61	65	68	68	68
5,5					15	43	53	60	64	68	71	71	71
5				0	35	50	58	64	68	71	74	74	74
4,5				20	47	57	63	68	71	74	77	77	77
4			0	40	55	62	68	72	75	77	80	80	80
3,5			26	51	61	67	72	75	78	81	83	83	83
3		0	46	60	67	72	76	79	82	84	86	86	86
2,5		34	58	67	73	77	81	83	85	87	89	89	89
2		0	54	67	74	79	82	85	87	90			
1,5		45	66	75	81	85	88						
1		0	66	78	84	88							
0,75		44	74	84	89								
0,5	0	65	83										
0,45	16	68	85										
0,4	37	72	87										
0,35	48	75	89										
0,3	57	78											
0,25	64	82											
0,2	70	86											
0,15	77												
0,1	85												
0												$V$ [m/s]	
	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12





Rys. 1. Funkcje rozkładu prędkości wiatru niesorientowanego  $V$  i sorientowanego  $V_z$  w siatce rozkładu Weibulla. Kierunek linii E-W. Stacja meteorologiczna Katowice, okres (IV-X) 1976 r.

Fig. 1. Distribution functions of wind velocity  $V$  and normal to conductor velocity  $V_z$  in Weibull net. The same power loss from conductor by convection at  $V$  and  $V_z$ .

niezorientowanego o prędkości 0,5 m/s wiejącego pod kątem  $\omega \in (64^{\circ}-77^{\circ})$  oraz częstości występowania wiatru niezorientowanego o prędkości 1 m/s wiejącego pod kątem  $\omega > 82^{\circ}$ .

Na rys. 1 przedstawiono w siatce rozkładu Weibulla dystrybuanty empiryczne i teoretyczne prędkości wiatru zorientowanego i niezorientowanego dla analizowanych danych statystycznych. W rozkładach tych przyjęto dla ciszy prędkość wiatru 0,5 m/s i azymut średni z azymutu wiatru poprzedzającego i kończącego ciszę<sup>1)</sup>.

### 3. Pionowy profil prędkości wiatru

Przeliczenia prędkości wiatru z wysokości pomiaru na wysokość przewodów linii dokonuje się najczęściej wg empirycznego wzoru potęgowego.

$$V = V_1 \left( \frac{z}{z_1} \right)^m, \quad (2)$$

gdzie:

- V - średnia prędkość wiatru na wysokości z,
- V<sub>1</sub> - średnia prędkość wiatru na wysokości z<sub>1</sub>,
- m - współczynnik zależny od stanu równowagi atmosfery.

W wytycznych [6] rozróżnia się sześć stanów równowagi atmosfery, którym odpowiadają wartości współczynnika m zestawione w tabelicy 2.

Tabela 2

Stany równowagi atmosfery wg [6]

Stan równowagi atmosfery	m
silnie niestabilna	0,08
niestabilna	0,143
lekką niestabilna	0,196
obojętna	0,270
stała	0,363
silnie stała	0,440

<sup>1)</sup> Stosowane na stacjach meteorologicznych przyrządy do pomiaru prędkości wiatru posiadają bezwładność, która uniemożliwia pomiar prędkości mniejszych od ok. 0,8 m/s. Notowane jest wówczas występowanie ciszy, której uwzględnienie powoduje istotne zawyżenie obliczonych temperatur przewodu dla małych prędkości wiatru. Istnieje zatem potrzeba przyjęcia dla ciszy pewnej prędkości wiatru.

Dla analizowanych danych statystycznych sporządzono rozkłady współczynnika  $m$  w różnych godzinach doby, dla różnych pór roku i prędkości wiatru. W zakresie prędkości  $V \in (0;5)$  m/s średnie wartości współczynnika  $m$  dla poszczególnych godzin doby aproksymowano wzorem:

$$m = (a - bV^c)(\cos 2\pi \frac{h}{22} + 1) + dV + e, \quad (3)$$

gdzie:

$V$  - prędkość wiatru, m/s,

$h$  - godzina dnia, h,

$a, b, c, d, e$  - współczynniki obliczone dla wyodrębnionych okresów roku (tablica 3).

Tablica 3

Wartości współczynników we wzorze (3)

Współczynnik Pora roku	a	b	c	d	e
zima	0,105	0,01	1,3	0,01	0,21
wiosna-jesień	0,15	0,02	1,05	0,02	0,12
lato	0,18	0,015	1,3	0,02	0,08

Przy prędkości wiatru 6 i 7 m/s występują tylko dwa stany równowagi atmosfery: lekko niestabilna i obojętna. Wypadkowe wartości współczynnika  $m$  wynoszą dla analizowanych danych w okresie od kwietnia do października, 0,244 dla prędkości 6 m/s i 0,256 dla prędkości 7 m/s, natomiast w okresie od listopada do marca wynoszą 0,267 dla prędkości 6 m/s i 0,269 dla prędkości 7 m/s. Przy prędkości wiatru równej lub większej niż 8 m/s występuje tylko stan równowagi obojętnej.

#### 4. Promieniowanie słoneczne

Na powierzchnię przewodu pada promieniowanie słoneczne bezpośrednio, rozproszone w atmosferze Ziemi oraz odbite od podłoża. Dotychczas w pracach, np. [1,2], uwzględniano promieniowanie bezpośrednio i rozproszone padające na powierzchnię rzutu przewodu prostopadłego do promieni słonecznych. Dokładniejszy sposób obliczania promieniowania słonecznego padającego na przewód oparty jest na następujących założeniach:

- promieniowanie słoneczne bezpośrednio absorbowane jest przez powierzchnię rzutu przewodu prostopadłego do promieni słonecznych,
- promieniowanie słoneczne rozproszone absorbowane jest przez przewód górną połową jego powierzchni,



- promieniowanie słoneczne całkowite odbite od podłoża absorbowane jest przez przewód dolną połową jego powierzchni.

Wynika na ich podstawie wzór do obliczania mocy cieplnej promieniowania słonecznego padającego na przewód:

$$P_p = Q_b d \sin \theta + 0,5 r d (Q_r + r Q_c), \text{ W/m} \quad (4)$$

$$\theta = \arccos \left[ \cos (h_s) \cos (\delta_s - \delta_1) \right],$$

gdzie:

- $Q_b$  - gęstość strumienia cieplnego bezpośredniego promieniowania słonecznego padającego na powierzchnię poziomą,  $\text{W/m}^2$ ,
- $Q_r$  - gęstość strumienia cieplnego rozproszonego promieniowania słonecznego padającego na powierzchnię poziomą,  $\text{W/m}^2$ ,
- $Q_c = Q_b + Q_r$  - gęstość strumienia cieplnego całkowitego promieniowania słonecznego padającego na powierzchnię poziomą,  $\text{W/m}^2$ ,
- $r$  - współczynnik odbicia promieniowania od ziemi (albedo)
- $d$  - średnica przewodu, m,
- $\theta$  - kąt padania bezpośredniego promieniowania słonecznego na przewód,
- $h_s$  - wysokość Słońca,<sup>1)</sup>
- $\delta_s, \delta_1$  - azymut Słońca, linii.

Między bezpośrednim i całkowitym promieniowaniem słonecznym istnieje silna korelacja, co pozwoliło na określenie zależności regresyjnych między nimi:

$$Q_b = 0 \quad \text{dla } Q_c \in (0; 20) \text{ W/m}^2 \quad (5.a)$$

$$Q_b = 0,169 Q_c - 3,38 \quad \text{dla } Q_c \in (20; 174) \text{ W/m}^2 \quad (5.b)$$

$$Q_b = 0,000258 Q_c^2 + 0,553 Q_c - 78 \quad \text{dla } Q_c \in (174; 1050) \text{ W/m}^2 \quad (5.c)$$

##### 5. Korelacja między temperaturą powietrza, prędkością wiatru i promieniowaniem słonecznym

Przy wyznaczaniu rozkładu temperatury przewodów w oparciu o rozkłady czynników atmosferycznych wygodnie jest założyć, że dla jednorodnych okresów czasu czynniki atmosferyczne są niezależne. Celem weryfikacji takiego założenia przeprowadzono obliczenia komputerowe rozkładu temperatury przewodu AFL-6 240 mm<sup>2</sup> dwoma metodami:

<sup>1)</sup> Definicję i sposób obliczenia wysokości Słońca podano w pracy [7].

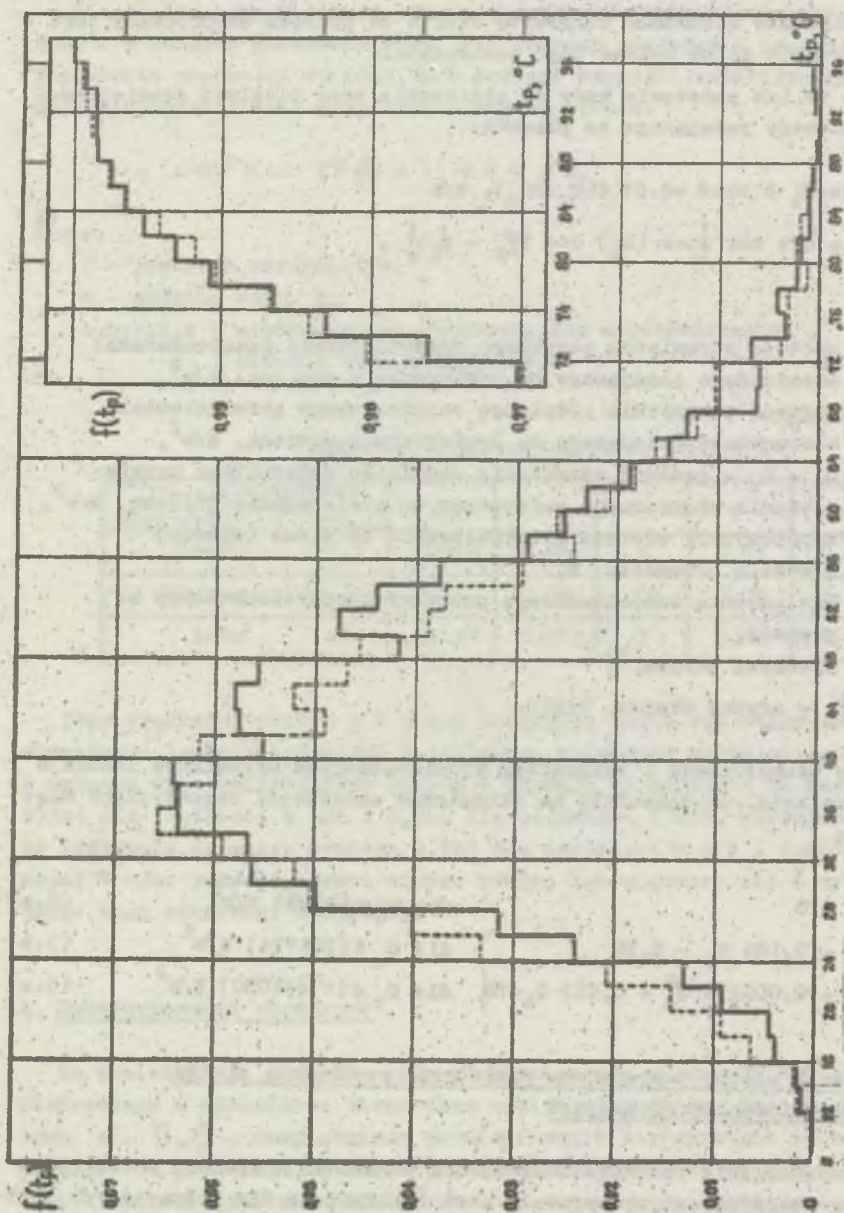


Рис. 2. Расклады предположительна температуры  $t_p$  провода АЛ-6 240 мм<sup>2</sup> обложения прудом 645 А  
 realized dokładny, --- rozkład obliczony metoda Monte Carlo z podziałem doby na jednorodne okresy

Fig. 2. Frequency of occurrence of the ACSE 240/40 mm<sup>2</sup> conductor temperature  $t_p$ , current load 645 A  
 accurate distribution, --- distribution computed by Monte Carlo method without correlation between  
 atmospheric factors



- Obliczono dokładny rozkład godzinnej temperatury przewodu w oparciu o zestawy godzinnych danych dotyczących warunków atmosferycznych. Uwzględniono zatem korelację (o ile ona istnieje) między czynnikami.
- Obliczono rozkład temperatury przewodu metodą Monte Carlo w oparciu o opracowane rozkłady: prędkości wiatru, temperatury powietrza i promieniowania słonecznego, zakładając całkowitą ich niezależność w jednorodnych okresach czasu.

Porównanie dokładnego rozkładu temperatury przewodu z rozkładem obliczonym metodą Monte Carlo przedstawiono na rys. 2.

Przeprowadzono za pomocą testów istotności weryfikację hipotezy, że rozkład dokładny temperatury przewodu oraz rozkład temperatury przewodu obliczony metodą Monte Carlo z podziałem doby na jednorodne okresy pochodzą z jednej populacji. Zastosowano testy serii, rangowanych znaków oraz test Kołmogorowa-Smirnowa. Z przeprowadzonej weryfikacji wynika, że w wyodrębnionych jednorodnych okresach można założyć niezależność rozkładów temperatury powietrza, prędkości wiatru i promieniowania słonecznego.

Przeprowadzono także weryfikację rozkładów bez podziału doby na jednorodne okresy. Test Kołmogorowa-Smirnowa wykazał jednak rozbieżność obu rozkładów na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ ; testy serii i rangowanych znaków wykazały zgodność rozkładów.

## 6. Zakończenie

Analizy warunków atmosferycznych, których wyniki przedstawiono w artykule, zostały przeprowadzone na danych statystycznych dotyczących warunków atmosferycznych z jednego roku dla terenu GOP. Dane te są wystarczające dla oceny istnienia korelacji między czynnikami atmosferycznymi. Natomiast zależności regresyjne między bezpośrednim i całkowitym promieniowaniem słonecznym (wzory (5)) oraz współczynniki we wzorze (3) do obliczania pionowego profilu prędkości wiatru nie mogą być uogólnione dla okresów wieloletnich i terenu całego kraju.

Nieuwzględnienie rozkładu kierunku wiatru oraz uproszczony sposób obliczania mocy cieplnej promieniowania słonecznego padającego na przewód prowadzą do zaniżenia obliczanych temperatur przewodu. Przedstawione w artykule sposoby uwzględniania powyższych czynników dają w obliczeniach dokładniejsze, wyższe o kilka K temperatury przewodu.

W wyodrębnionych jednorodnych okresach można założyć niezależność rozkładów temperatury powietrza, prędkości wiatru i promieniowania słonecznego, co znacznie upraszcza obliczanie rozkładu temperatury przewodu.

## LITERATURA

- [1] House H.E., Tuttle P.D.: Current Carrying Capacity of ACSR. AIEE Trans. on PAS, nr 40, 1959.
- [2] Di Giacomo G., Paoli P., Tessori G.: Thermal Behaviour of conductors in Overhead Power Lines Experiments and Simulations Methods. June, 1977.
- [3] Osadnik J.: Modele statystyczno-probabilistyczne temperatury przewodów roboczych w normalnych warunkach pracy. Praca magisterska, Politechnika Śl., Gliwice 1983.
- [4] Fraser H.M.: Wind Profile and Tower Shadow Measurements at the Nelson River Test Line. CIGRE, X, 1969.
- [5] Sztylek A.: Zmętnienie atmosfery i osłabienie promieniowania Słońca jako czynnik zanieczyszczenia powietrza w centralnej części GOP. Oprac. Inst. Kształtowania Środowiska, Katowice 1981.
- [6] Wytyczne obliczenia stanu zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego. Oprac. IM i GW Warszawa 1977.
- [7] Murray W. Davis: A New Thermal Rating Approach, Part 3, IEEE Trans. on P.A.S. nr 2, 1978.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Kazimierz Kinsner

Wpłynęło do redakcji dn. 15 kwietnia 1985 r.

ТОКОВЫЕ НАГРУЗКИ РАБОЧИХ ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ  
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

ЧАСТЬ II

АНАЛИЗ АТМОСФЕРНЫХ УСЛОВИЙ

Р е з ю м е

В статье представлен метод учёта распределения направления ветра при вычислении распределения температуры проводов воздушных линий. Введение распределения направления ветра в этих вычислениях уменьшает скорость ветра (рис. 1) и увеличивает температуру провода для определённых вероятностей выступления. Представлены формулы для пересчёта скорости ветра на высоте измерения до высоты провода (ур. 2, 3). Предложен более точный способ расчёта тепловой мощности солнечной радиации падающей на поверхность провода (ур. 4). Этот способ учитывает непосредственную, рассеянную и добавочно отражённую солнечную радиацию. Это даёт несколько градусов выше для температуры

проводов. Определена регрессивная зависимость между непосредственной и полной солнечной радиациями (ур. 5). Произведена оценка корреляции между температурой воздуха, скоростью ветра и солнечной радиацией. Независимость этих факторов рекомендуется принимать в однородных периодах времени (рис. 2).

## THE AMPACITY OF THE PHASE CONDUCTORS OF HIGH VOLTAGE OVERHEAD LINES

### Part. II

#### THE ANALYSIS OF ATMOSPHERIC CONDITIONS

##### S u m m a r y

In the paper, the method of application of wind direction distribution in computations of overhead conductor temperature distribution is presented. The introduce of wind direction distribution in that computations gives wind velocities reduction (fig.1) and conductor temperatures increase at the same probability of occurrence. The formulas for wind velocity computation depending on conductor height above ground are presented (eqn. 2,3). More accurate method of computation of the power gain due to solar irradiation is proposed (eqn. 4). This method takes into account direct, diffuse and additionally reflected solar radiation. It gives a few Kelvin degrees higher conductor temperatures. The regressive equations of direct solar radiation due to total solar radiation are presented (eqn. 5). The appreciation of correlation between air temperature, wind velocity and solar radiation is given. The independence of those factors can be assumed (see fig. 2).