ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1992

Seria: ELEKTRYKA z. 127 Nr kol. 1169

Gerhard BARTODZIEJ

Wiesław GOC

Wiktor KIŚ

Antoni PRZYGRODZKI

Edward SIWY

OPTYMALIZACJA PRZEWODÓW SZYNOWYCH DO ZASILANIA DUŻYCH ODBIORÓW ELEKTROTERMICZNYCH PRĄDU STAŁEGO

Streszczenie. Omówiono niektóre zagadnienia doboru i optymalizacji zasilania dużych odbiorów prądu stałego. Załączono przykład obliczeniowy optymalizacji przewodów szynowych zasilających układ sześciu pieców Achesona.

OPTIMIZATION OF BUSWAY TO SUPPLY THE LARGE SCALE DC ELECTROTHERMAL RECEIVERS

Summary. Some problems of the choice and optimization of bussway served to supply the large scale DC receivers are discussed. The article also contains an examplary calculation of the most favourable buss conductors to supply a system of six Acheson's furnases.

OPTIMIERUNG DER STROMSCHIENEN FÜR DIE VERSORGUNG DES GROSSEN ELEKTROTHERMISCHEN GLEICHSTROMVERBRAUCHERS

Zusammenfassung. Es wird bastimmte Probleme von dem Auswahl und Optimierung des großen Gleichstromverbrauchers beschrieben. Es wird ein Berechnungsbeispiel gegeben das eine Optimierung von den, die sechs Achesonsöfen versorgen, Stromschienen illustriert.

1. WSTĘP

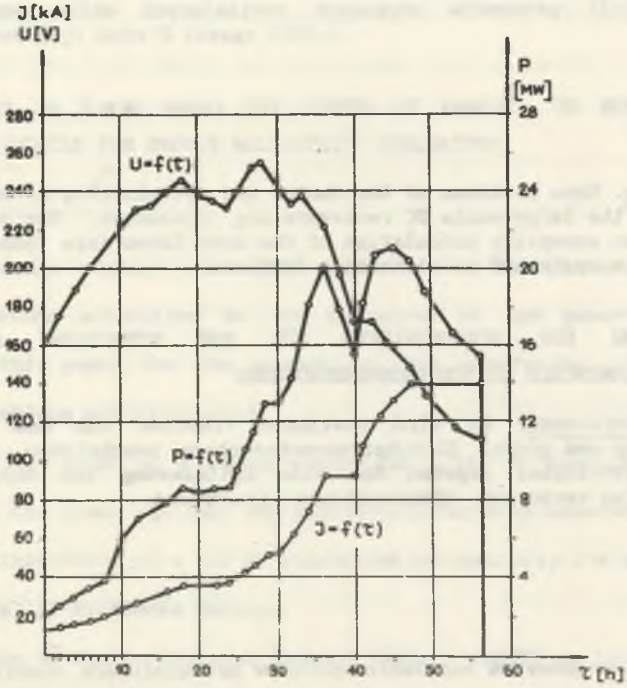
Tory wielkoprądowe do zasilania odbiorów przemysłowych elektrotermicznych lub elektroenergetycznych są projektowane stosunkowo rzadko. Duży koszt budowy toru, związany przede wszystkim ze zużyciem dużych ilości materiałów przewodowych, powoduje opłacalność poszukiwania rozwiązania optymalnego indywidualnie dla każdego rozważanego przypadku.

W odniesieniu do torów wielkoprądowych do zasilania pieców Achesona uzyskano w "Elektroprojekcie" w Gliwicach spory zasób doświadczeń w zakresie rozwiązań konstrukcyjnych, a na Politechnice Śląskiej uporządkowano metodykę obliczania takich torów [1]. Celem artykułu jest przedstawienie tej metodyki na przykładzie zasilania dużych pieców Achesona. Metodyka ta dzieli się na:

1) określenie dopuszczalnych technicznie gabarytów toru oraz

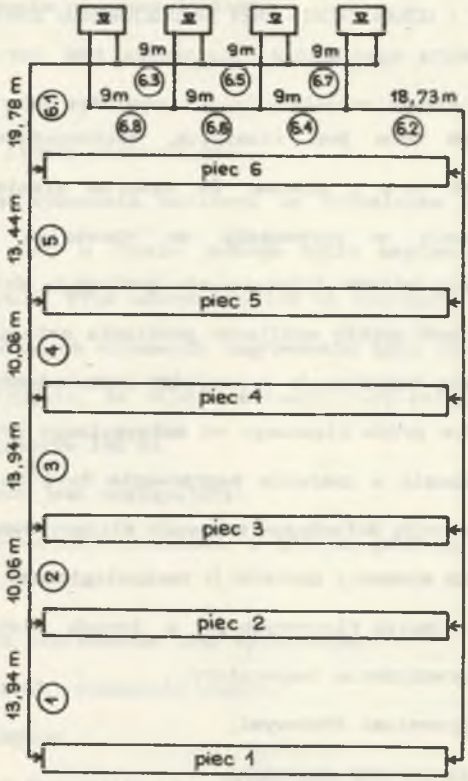
2) jego optymalizację.

Rozpatrywane piece Achesona są zasilane prądem stałym o wartości maksymalnej 140 kA. Cykl pracy pieca obejmuje okres zasilania i okres pozostały, w którym piec nie pobiera energii. Teoretyczny czas cyklu wynosi



Rys.1. Przebieg czasowy prądu (I), napięcia (U) i mocy (P) pieca Achesona w czasie jednego cyklu

Fig.1. Time run of current (I), voltage (U) and power (P) of Acheson's furnace during one cycle



Rys.2. Układ zasilania sześciu pieców Achesona
Fig.2. Supply system of six Acheson's furnaces

486 h, w tym okres zasilania wynosi 57 h. Zmienność mocy, prądu i napięcia w okresie zasilania przedstawiono na rys.1. Wychodząc z możliwości zbytu każdy piec wykonuje rocznie 16 cykli. Grafitownia ma 6 pieców. Schemat toru prądowego do zasilania pieców przedstawiono na rys.2. Założono, że piece zasilane są kolejno. Wyklucza się możliwości zasilania dwóch pieców równocześnie.

2. WARUNKI TECHNICZNE I OGRANICZENIA PRZY PROJEKTOWANIU TORÓW WIELKOPRĄDOWYCH

Materiałem przewodowym toru jest aluminium, zastosowanie miedzi jest ograniczone do podłączeń toru z piecem. Za wyborem aluminium przemawia względna łatwość spawania w porównaniu ze spawaniem miedzi. Tory wielkoprądowe do zasilania pieców Achesona nie podlegają działaniu prądów zwarciowych. Wykluczona jest zwykle możliwość powstania metalicznego zwarcia - poprzez odpowiednio małą rezystancję - pomiędzy różnoimiennymi przewodami toru powodującego przepływ prądu większego od maksymalnego prądu roboczego. Zatem podstawowe ograniczenia w zakresie nagrzewania toru dotyczą warunków roboczych. Normy nie precyzują dotychczas w sposób wiążący wymagań dla torów przemysłowych stanowiących elementy instalacji technologicznej. Ze względu na występowanie tych samych zjawisk fizycznych co w torach elektroenergetycznych, przyjęto te same ograniczenia temperatury:

- do 85•C dla toru z połączeniami śrubowymi,
- do 105•C dla toru z połączeniami spawanymi.

Tor prądowy przebiega w hali bądź w tunelach chłodzonych przy użyciu wentylatorów. Jako temperaturę obliczeniową powietrza przyjęto +25•C. Tory prądowe wykonane są z różnej liczby płaskowników o różnych wymiarach, np.: AP900×345, AP600×130, AP500×110, AP250×30. Tor zbudowany z szyn o małych przekrojach uzyska niższe temperatury nagrzania niż tor o tym samym przekroju, lecz wykonany przy użyciu pojedynczej szyny. Pracochłonność montażu i jego koszty są jednakże wyższe w pierwszym przypadku. Obniżona temperatura toru oznacza zmniejszenie strat mocy i energii w torze. Problem ukształtowania przekroju ma zatem również aspekt ekonomiczny.

2.1. **Obliczenia nagrzewania toru**

Celem obliczeń jest wyznaczenie minimalnego przekroju toru ze względu na nagrzewanie prądem roboczym z uwzględnieniem ukształtowania toru. Jako wynik otrzymuje się liczbę płaskowników.

Podstawą do wykonania obliczeń są oczekiwane przebiegi czasowe prądu, napięcia oraz mocy w czasie jednego cyklu nagrzewania wsadu. Przebiegi te pokazano na rys.1. Prąd maksymalny 140 kA występuje przez 12 h. Jest to czas dłuższy od 3 stałych czasowych nagrzewania szyn ($t>3\tau_c$; $\tau_c \in (1...3)h$), zatem do obliczeń przyjęto, że najwyższe temperatury osiągane są takie, jak przy prądzie długotrwałym 140 kA.

Cykl obliczeń jest następujący:

a) określa się warunki otoczenia, w których pracują poszczególne części toru szynowego,

b) sprawdza się nagrzewanie szyn wyznaczając:

1) współczynniki oddawania ciepła,

2) opory cieplne,

3) przyrosty temperatury szyn (iteracyjnie).

Przykładowe obliczenia przedstawiono dla toru 24xAP 250x30.

Materiał szyny Al99,5; γ_o=35MS/m, przekrój s_o=250x30=7500mm^2, obwód szyny 0,56m, powierzchnia 1mb szyny 0,56m^2, emisyjność szyn niemalowanych ε=0,3.

- Obciążenie długotrwałe szyny wynosi I_d=140/24=5,83kA.
- Warunki otoczenia:

Temperatura: w komorze prostownikowej max 35°C,
otoczenia na zewnątrz 25°C,
na wlocie do tunelu max 25°C.

Wentylacja: w komorze prostownikowej zapewniająca prędkość przepływu powietrza 0,5m/s przy temp. 35°C, w tunelu przepływ 12,2m^3/s, przekrój tunelu 12,25m^2, prędkość powietrza v=1m/s, długość 56m.

- Rezystancja szyn i straty mocy przy tym prądzie wynoszą:

$$R_T = k_T R_o, \quad R_o = \frac{1}{\gamma_o s_o} = 3{,}81 \cdot 10^{-6}\ \Omega/m,$$

$$\Delta P_T = k_T R_o I_d^2.$$

T_d=50°C	k_T=1,20	R_T=4,57·10^{-6} Ω/m	ΔP_T=155,4 W/m
60	1,24	4,72·10^{-6}	160,6
70	1,28	4,88·10^{-6}	165,8
80	1,32	5,03·10^{-6}	170,9
90	1,36	5,18·10^{-6}	176,1
100	1,40	5,33·10^{-6}	181,3

- Nagrzewanie szyn w tunelu

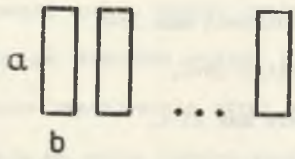
Współczynnik oddawania ciepła przez konwekcję

$$\alpha_k = 6+4{,}2v = 10{,}2\ W/(m^2K),$$

Współczynnik oddawania ciepła przez promieniowanie

$$\alpha_\varepsilon = \frac{5{,}7\varepsilon}{T_d - T_o}\left[\left(\frac{273+T_d}{100}\right)^4 - \left(\frac{273+T_o}{100}\right)^4\right],$$

T_o=35°C, ε=0,3,



Rys. 3. Ustawienie szynoprzewodów

Fig. 3. Set-up of busway

Opory cieplne przy ułożeniu szyn pokazanym na rys.3 są następujące:

$$S_w = \frac{1}{\alpha_k F_k + \alpha_\varepsilon F_\varepsilon}$$

gdzie: F_k - zastępcza powierzchnia oddawania ciepła przez konwekcję

F_ε - zastępcza powierzchnia oddawania ciepła przez promieniowanie

Wg pracy [1], na 1 mb. jest: $F_k=0,56m^2$, $F_\varepsilon=0,12m^2$.

Przyrost temperatury wyznacza się:

$$\Delta T=S_w \Delta P_T .$$

Wyniki obliczeń umieszczono w tablicy 1 dla nagrzania szyn na wlocie powietrza do tunelu.

Tablica 1

Wyniki obliczeń

T_d	α_ε	S_w	T
°C	W/(m²K)	K/W	K
50	2,05	0,168	26,0
60	2,24	0,167	26,8
70	2,35	0,167	27,7
80	2,47	0,166	28,5
90	2,59	0,166	29,4
100	2,71	0,166	30,1

- Obliczenia iteracyjne przyrostu temperatury szyny.

Zakładamy temperaturę nagrzania np. T_d=60°C, obliczamy:

$$\Delta T_{60}=S_{w,T}\Delta P_T=26,8K ,$$

sprawdzamy

$$T_d'=T_o+\Delta T=25+26,8=51,8°C .$$

Ponieważ $T_d>T_d'$ powtarzamy obliczenia przyjmując T_d=50°C.

$$\Delta T_{50}=S_{w,T}\Delta P_T=26,0K ,$$

sprawdzamy

$$T_d''=25+26,0=51°C .$$

Ponieważ $T_d''\approx T_d$, więc kończymy obliczenia.

Przyrost temperatury powietrza na końcu odcinka wentylacyjnego

$$T_p = \frac{nA_1}{C_v q t}$$

gdzie: A_1 - energia strat w ciągu 1s na odcinku wentylacyjnym l=96m, $A_1=\Delta P \cdot 1s$ kJ ,

C_v - ciepło właściwe powietrza $C_v=f(T_p)$, $kJ/(m^3K)$,

n - liczba szyn,

q - natężenie przepływu powietrza $q=12,2\ m^3/s$,

t - czas t=1s.

Obliczenia wykonane metodą iteracyjną [1] dają na końcu toru następujące wyniki: T_d=88°C, T_p=59°C.

Tak więc wariant 24xAP 250x30 praktycznie spełnia wymagania ze względu na nagrzewanie. Maksymalna temperatura szyn T_d=88°C jest bliska dolnemu zakresowi przedziału (85÷105)°C, zwłaszcza że odgałęzienia boczne powodują dalsze ochłodzenie toru[x)].

3. OBLICZANIE SKUTKÓW ODDZIAŁYWAŃ ELEKTRODYNAMICZNYCH I MECHANICZNYCH W TORZE WIELKOPRĄDOWYM

Tor wielkoprądowy podlega następującym oddziaływaniom wywołującym skutki mechaniczne:

- oddziaływaniu elektrodynamicznemu prądu roboczego,
- działaniu sił ciężkości,
- działaniu zjawiska dylatacji termicznej.

---

x) Istnieje odpowiedni program obliczeniowy. Przykładowo wyliczone temperatury na brzegach poszczególnych odcinków są następujące: 84,9; 84,6; 84,0; 82,4; 78,1; 66,8 °C

W toku projektowania określa się wartości występujących sił i naprężeń oraz sposobu ograniczenia ich skutków występujących w postaci odkształceń lub przemieszczeń. Przyjęto tutaj następujące ograniczenia:

- strzałka ugięcia toru f między punktami podparcia w odległości l ma spełniać warunek f<l/300 (stosowany w budownictwie),
- odkształcenie pojedynczej szyny w torze w środku odcinka między miejscami połączeń poprzecznych pod wpływem oddziaływań elektrodynamicznych f<b/2, (b - grubość płaskownika, b=30mm, rys.3),
- nie przekraczanie naprężeń dopuszczalnych $\delta \leq R_{p0,2}$.

4. OPTYMALIZACJA TORU PRĄDOWEGO

4.1. Założenia i kryterium

Schemat toru prądowego zasilania pieców przedstawiono na rys.2. Poszczególne odcinki obciążone niejednakowo w ciągu roku przenoszą różne ilości energii (por.tablica 2).

Tablica 2

Charakterystyka toru prądowego

Lp.	Numer odcinka wg rys.2	Liczba cykli obciążenia w roku	Roczny czas obciążenia odcinka toru	Przesłan energia odcinkiem
			h	MWh
1	1	16	912	10476
2	2	32	1824	20951
3	3	48	2736	31427
4	4	64	3648	41902
5	5	80	4560	52378
6	6.1 i 6.2	96	5472	62854

Optymalizację [3] przeprowadza się oddzielnie dla każdego rodzaju płaskownika. Tutaj przeprowadzono przykładową optymalizację dla toru zbudowanego z płaskowników AP 250x30. Oczekuje się, że każde rozwiązanie

będzie służyło 30 lat z 10% odzyskiem przy wymianie. Optymalizację wykonano na podstawie kosztów rocznych przy stopie procentowej p=12% . Kryterium stanowi minimum kosztów rocznych K_r=min. Wynikiem optymalizacji jest liczba szyn tworząca dany przekrój.

$$K_r = rK_I - K_I a_r + K_{es} + K_\Delta$$

gdzie: r - rata odzysku kapitału, $r = \frac{p(1+p)^L}{(1+p)^L - 1}$,

L - okres eksploatacji w latach,

a_r - współczynnik depozytu funduszu amortyzacyjnego,

σ - współczynnik odzysku, tutaj σ=0,10 ,

K_{es} - koszty eksploatacyjne stałe, $K_{es}=r_e K_I$,

r_e - rata kosztów eksploatacyjnych stałych,

r_s - rata kosztów stałych, tutaj $r_s=r+r_e-\sigma a_r$,

czyli:

$$K_r=r_s K_I+K_\Delta$$

K_I - nakłady inwestycyjne na budowę toru uwzględniające oprocentowanie w trakcie budowy. Nakłady te tworzą: zakupy materiałów przewodzących toru prądowego oraz materiałów pomocniczych, konstrukcji i materiałów budowlanych, koszty transportu tych materiałów, koszty wykonania toru (robocizna monterów, prace maszyn i sprzętu itp.), koszty wykonania budowli i konstrukcji. Nakłady te można przedstawić:

$$K_I = C \sum_{l=1}^{6} l_l n_l + C_o$$

gdzie: C, C_o - stałe zależne od liczby szyn (płaskowników) w torze prądowym,

l_l - długość l-tego odcinka toru,

n_l - liczba szyn w l-tym odcinku toru.

$K_{\Delta i}$ - koszt roczny strat mocy i energii średni oraz w i-tym roku:

$$K_{\Delta i} = \sum_{l=1}^{6} \left(k_{Pi} \frac{\Delta P_{sl}}{\eta_s} + k_{Ai} \frac{\Delta A_l}{\eta} \right),$$

$$K_{\Delta i} = \frac{I_d}{\gamma_o s_o} \sum_{l=1}^{6} \left[\frac{l_l}{n_l} k_{Tl} \left(\frac{k_{Pi}}{\eta_s} + \frac{k_{Ai} \tau_l}{\eta} \right) \right].$$

Po uśrednieniu rachunkiem dyskonta otrzymuje się:

$$K_{\Delta} = r \sum_{i=1}^{L} K_{\Delta i} (1+p)^{-i}$$

gdzie: $\Delta P_{sl}, \Delta A_l$ - straty mocy i energii w l-tym odcinku toru,

τ_l - czas użytkowania szczytowych strat obciążeniowych w l-tym odcinku,

η_s, η - sprawność układu zasilania (tj. stacji przekształtnikowej) w szczycie i średnia,

k_{Tl} - współczynnik temperaturowy dla l-tego odcinka (p. rozdz. 2),

I_d, γ_o, s_o - podano w rozdz. 2,

k_{Pi}, k_{Ai} - jednostkowy koszt mocy i energii w i-tym roku,

L - okres eksploatacji toru w latach (L=30 lat).

Po przekształceniu otrzymuje się:

$$K_r = \left(C \sum_{l=1}^{6} l_l n_l + C_o \right) r_s + r \frac{I_d^2}{\gamma_o s_o} \sum_{i=1}^{L} \frac{l_l}{n_l} k_{Tl} \left(\frac{k_{Pi}}{\eta_s} + \frac{k_{Ai} \tau_l}{\eta} \right) (1+p)^{-i}.$$

Optymalizację przeprowadzono wg pracy [3] i na tej podstawie opracowano program wyznaczania optymalnej liczby szyn n_l w l-tym odcinku. Przy pominię-

ciu zmian jednostkowych cen mocy i energii wynik (dla którego K_r=min) jest następujący:

$$n_{1,opt} I_d = \sqrt{\frac{\frac{1}{\eta_s} k_p + \frac{1}{\eta} \tau_1 k_A}{C \gamma_o s_o r_s} rw}$$

gdzie:

$$w = \frac{(1+p_w)^L - 1}{p_w (1+p_w)^L}, \quad p_w + 1 = \frac{1+p}{1+e}.$$

Obliczenia wykonano w cenach 1990 r., przyjmując p=0,12; L=30 lat, stąd r=0,1213; r_e=0,01; r_s=0,131; e=0,02; k_P=400000 zł/kW.a; k_A=90 zł/kWh; składowa C=500000 zł/mb toru.

Wyniki obliczeń są następujące:

Odcinek toru (wg rys.2)	1	2	3	4	5	6
Liczba szyn w przekroju odcinka	24[x)]	24	24	25	26	27

5. ZAKOŃCZENIE

W artykule poruszono ważniejsze problemy doboru szyn z punktu widzenia technicznego i ekonomicznego. Obliczenia techniczne określają dopuszczalne (minimalne) wymiary toru. Opracowane w IEiSU Politechniki Śląskiej programy umożliwiają wykonanie takich obliczeń. Wyniki tych obliczeń stanowią ograniczenia przy optymalizacji toru.

Optymalne liczby szyn w poszczególnych odcinkach toru wyznacza się z kryterium K_r=min. W artykule przedstawiono wyniki takich obliczeń.

[x)] Z optymalizacji otrzymano 23 szyny. Ponieważ dopuszczalna technicznie liczba wynosi 24, więc ją przyjęto.

LITERATURA

[1] Bartodziej G., Goc W., Kiś W., Przygrodzki A., Siwy E.: Optymalizacja toru wielkoprądowego 140 kA dla Grafitowni II SZEW. Ekspertyza SEP 13/15/90/61, Gliwice, 1990.

[2] Bartodziej G.: Dobór urządzeń rozdzielczych. Pol. Śl., Gliwice 1982.

[3] Korn G., Korn T.: Matematyka dla pracowników naukowych i inżynieryjnych. PWN, Warszawa 1983.

Recenzent: prof. dr inż. Andrzej Kamiński

Wpłynęło do redakcji dnia 5 lutego 1992 r.

OPTIMIZATION OF BUSWAY TO SUPPLY THE LARGE SCALE DC ELECTROTHERMAL RECEIVERS

A b s t r a c t

This paper deals with a calculation method relating to the high-current bus conductors served to supply the large scale DC electrothermal receivers. The method includes calculation of constructional solutions admissible with respect of technological requirements, and looking for the best solutions with respect of their costs. In domain of technological requirements the criterion of current-carrying capacity is presented a little wider, while the economic analysis is grounded on a criterion of minimal yearly costs. The examplary calculations for bus conductors 24×AP 250×30 which supply a system of six Acheson's furnases working singly in definite cycles are made. Admissible temperature values of busses have been taken at the level of 85•C for screw joints and 105•C for welded joints. The economic calculations have been done under consideration the 1990th price level.