ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1971

Seria: ELEKTRYKA z. 29 Nr kol. 297

WIESŁAW GABRYŚ, JÓZEF FURMAN
Katedra Elektrotechniki Przemysłowej

PRACA LOKOMOTYWY ELEKTRYCZNEJ Z INDYWIDUALNYM NAPĘDEM OSI PRZY NIEJEDNAKOWYCH ŚREDNICACH KÓŁ NAPĘDNYCH POSZCZEGÓLNYCH ZESTAWÓW

Streszczenie. W artykule przeanalizowano wpływ rozbieżności średnic poszczególnych zestawów kołowych lokomotywy elektrycznej prądu stałego na poprawność pracy silników trakcyjnych. W szczególności rozpatrzono: a) możliwość zerwania przyczepności poszczególnych zestawów, b) nierównomierne nagrzewanie się silników połączonych równolegle, c) nierównomierny rozkład napięcia na twornikach łączonych szeregowo.

Podano przykłady obliczeń szczegółowych na podstawie których sformułowano wnioski i zalecenia dotyczące dopuszczalnych różnic pomiędzy średnicami kół poszczególnych zestawów.

1. Wstęp

Brak przepisów odnośnie dopuszczalnych odchyłek średnic kół poszczególnych zestawów lokomotyw elektrycznych sprawia, że w praktyce odbiorczej stosuje się wymagania niemal identyczne jak dla trakcji parowej. W myśl tych wymagań dopuszczalne rozbieżności pomiędzy średnicami kół poszczególnych zestawów nie powinny przekraczać 2 mm.

Wymagania tego rodzaju są bezsporne w trakcji parowej, gdzie mamy do czynienia z grupowym napędem wszystkich zestawów, sprzężonych ze sobą wiązarami. W takim przypadku, przy wymuszonej identycznej prędkości obrotowej wszystkich zestawów, każda choćby najmniejsza różnica kół powoduje zwiększenie oporów jazdy parowozu na skutek dodatkowego poślizgu kół, a przy różnicach większych np. rzędu kilkunastu mm prowadzi do zakleszczenia się układu napędnego lub do poślizgów niszczących bardzo szybko obręcze kołowe.

Z całkiem innym problemem mamy do czynienia w przypadku lokomotyw elektrycznych, ponieważ silniki elektryczne, napędzające indywidualnie poszczególne zestawy kołowe nie muszą wirować z identycznymi prędkościami obrotowymi.

Jeżeli więc średnice kół poszczególnych zestawów będą niejednakowe, to - oczywiście przy pewnych ograniczeniach tej rozbieżności - lokomotywa będzie jechać bez dodatkowych poślizgów. Tym bardziej nie może mieć miejsca zakleszczanie się układu napędowego. Pracy takiej będą jednak towarzyszyć również szkodliwe zjawiska, z których najistotniejsze znaczenie mają:

a) możliwość zerwania przyczepności poszczególnych zestawów,
b) nierównomierne nagrzewanie się silników elektrycznych pracujących w układach szeregowo-równoległych lub równoległych,
c) nierównomierność w rozkładzie napięć przy równoległym łączeniu grup zawierających po 2 silniki połączone szeregowo.

Zasadniczym celem tej publikacji jest ilościowe przedstawienie tych niekorzystnych zjawisk, pozwalające na sformułowanie praktycznych postulatów w odniesieniu do ekonomicznie uzasadnionych przepisów, regulujących dopuszczalne różnice średnic poszczególnych zestawów kołowych w lokomotywach elektrycznych. Złagodzenie omawianych wymagań w stosunku do wymagań obowiązujących dla parowozów prowadzi do oczywistych znacznych oszczędności zarówno materiałowych jak i robocizny w lokomotywowniach PKP i ZNTK. Dalsze niejako pośrednie oszczędności uzyskuje się dzięki skróceniu czasu wyłączania elektrowozów z ruchu.

2. Wyprowadzenie wzorów i porządek obliczeń

2.1. Założenia i uproszczenia

Jakkolwiek rozważania ogólne można by przeprowadzić dla lokomotywy o dowolnej liczbie m osi, to jednak zapis uogólnionych wzorów byłby mniej czytelny i przejrzysty w porównaniu z zapisem dla konkretnego układu osi.

To samo dotyczy zresztą graficznego postępowania przy konstruowaniu charakterystyk trakcyjnych. W praktyce krajowej mamy do czynienia z elektrowozami 4 i 6 osiowymi, w związku z czym wyprowadzenia wzorów i tok obliczeń przedstawimy na najprostszym przykładzie lokomotywy 4 osiowej wraz z podaniem krótkich wskazówek odnośnie adaptacji wzorów dla lokomotywy 6 osiowej.

Przyjmijmy, że dysponujemy naturalnymi charakterystykami trakcyjnymi oraz zasadniczymi lokomotywy idealnej, to jest posiadającej koła napędne o jednakowych znamionowych średnicach D_N oraz silniki trakcyjne o identycznych charakterystykach trakcyjnych, zgodnych z charakterystyką zadeklarowaną przez wytwórnię. Symbole parametrów tych charakterystyk zaopatrzymy indeksem "i" a więc

- dla lokomotywy: $F_i = f(v_i)$, $F_i = f(I)$, $v_i = f(I)$
- dla silnika: $M_i = f(n_i)$, $M_i = f(I)$, $n_i = f(I)$

przy czym oznaczają:

F_i, v_i - całkowitą siłę pociągową na obwodzie kół napędnych oraz prędkość liniową lokomotywy,

M_i, n_i - moment i prędkość obrotową silnika,

I - prąd twornika jednego silnika,

f - ogólne oznaczenie odpowiedniej (w każdym przypadku innej) zależności funkcyjnej.

Przypuśćmy z kolei, że w lokomotywie rzeczywistej średnice kół różnych zestawów są - na skutek niejednakowego stoczenia - różne i mniejsze od znamionowej. Jeżeli stosunek średnicy kół zestawu do średnicy znamionowej oznaczymy ogólnie literą β, to dla poszczególnych zestawów lokomotywy 4 osiowej możemy zapisać:

$$\beta_1 = \frac{D_1}{D_N}, \quad \beta_2 = \frac{D_2}{D_N}, \quad \beta_3 = \frac{D_3}{D_N}, \quad \beta_4 = \frac{D_4}{D_N}$$

Załóżmy również, że charakterystyki zasadnicze poszczególnych silników lokomotywy rzeczywistej przebiegają niejednakowo z powodu różnic w przewodnościach obwodów magnetycznych. Fakt ten uwzględnimy przy pomocy współczynników $\lambda_x = \frac{\Phi_x}{\Phi_1}$ przy czym indeks "x" oznacza numer zestawu kołowego.

Dla lokomotywy 4-osiowej będzie:

$$\lambda_1 = \frac{\Phi_1}{\Phi_1}, \quad \lambda_2 = \frac{\Phi_2}{\Phi_1}, \quad \lambda_3 = \frac{\Phi_3}{\Phi_1}, \quad \lambda_4 = \frac{\Phi_4}{\Phi_1}$$

Współczynniki λ_x nie powinny (zgodnie z normą DN-57/E-06001) wykraczać poza przedział

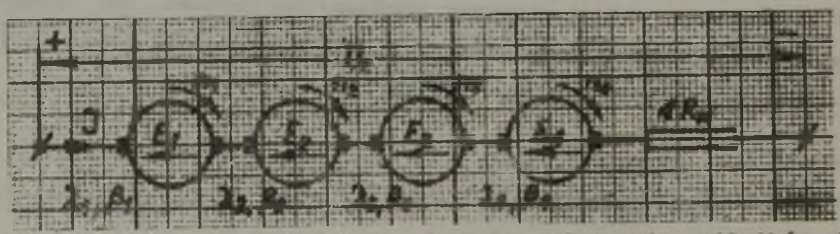
$$0{,}96 < \lambda_x < 1{,}04$$

w granicach obciążenia prądowego od 75% do 175% prądu znamionowego ciągłego.

Dla uproszczenia przyjmiemy, że wpływ rozbieżności w opornościach wewnętrznych silników ma przebiegi charakterystyk jest pomijany.

2.2. Szeregowe połączenie silników trakcyjnych

Rozważmy na początek szeregowe połączenie silników trakcyjnych (rys. 1). Równania napięć dla lokomotywy rzeczywistej i idealnej można zapisać w następującej postaci:



Rys. 1. Układ i oznaczenia dla szeregowego połączenia silników trakcyjnych lokomotywy 4-osiowej

- lokomotywa rzeczywista

$$C_E\lambda_1\Phi_i\, n_1 + C_E\lambda_2\Phi_i\, n_2 + C_E\lambda_3\Phi_i\, n_3 + C_E\lambda_4\Phi_i\, n_4 = U_c - 4R_w I \tag{1}$$

- lokomotywa idealna

$$4\, C_E\Phi_i\, n_i = U_c - 4\, R_w I \tag{2}$$

W równaniach (1) i (2) oznaczają:

U_c - całkowite napięcie sieci,

C_E - stała sem twornika silnika trakcyjnego,

R_w - oporność wewnętrzna uzwojeń silnika trakcyjnego.

Po podzieleniu stronami (1) i (2) otrzymujemy zależności między prędkościami obrotowymi silników poszczególnych zestawów lokomotywy rzeczywistej i idealnej, słuszną przy tej samej dowolnej wartości prądu:

$$\lambda_1\, n_1 + \lambda_2\, n_2 + \lambda_3\, n_3 + \lambda_4\, n_4 = 4\, n_i \tag{3}$$

Ponieważ współczynniki przeliczeniowe przekładni zębatych k_n są identyczne dla wszystkich zestawów kołowych lokomotywy rzeczywistej i idealnej, więc związki między prędkością liniową i obrotową przybiorą postać:

$$n_x = k_n \frac{v}{D_x} \text{ - dla lokomotywy rzeczywistej,}$$

$$n_i = k_n \frac{v_i}{D_N} \text{ - dla lokomotywy idealnej}$$

a stąd po podzieleniu stronami

$$n_x = \frac{v}{v_i\, \beta_x}\, n_i \tag{4}$$

gdzie:

$x = 1,2,3,4$ - numer zestawu kołowego

v - prędkość liniowa lokomotywy rzeczywistej.

Podstawiając (4) do (3) dostajemy bezpośredni związek między prędkościami lokomotywy rzeczywistej i idealnej

$$v = \frac{4}{\frac{\lambda_1}{\beta_1} + \frac{\lambda_2}{\beta_2} + \frac{\lambda_3}{\beta_3} + \frac{\lambda_4}{\beta_4}} v_i \tag{5}$$

Mając charakterystykę zasadniczą lokomotywy idealnej $v_i = f(I)$ możemy, posługując się zależnością (5) wykreślić prędkościową charakterystykę zasadniczą lokomotywy rzeczywistej $v = f(I)$ przy szeregowym połączeniu silników trakcyjnych.

Drugą tj. siłową charakterystyką zasadniczą otrzymamy w prosty sposób, biorąc pod uwagę fakt, że przez wszystkie silniki w układzie szeregowym płynie ten sam prąd, a więc momenty ich w lokomotywie rzeczywistej wynoszą:

$$M_x = C_M \lambda_x \Phi_i I, \quad x = 1,2,3,4 \tag{6}$$

gdzie:

$C_M = 0,975\ C_E$ - stała momentu silnika trakcyjnego.

Pociągowe siły styczne na obwodach kół poszczególnych zestawów obliczymy z wyrażenia

$$F_x = k_M \frac{M_x}{D_x}, \quad x = 1,2,3,4 \tag{7}$$

a całkowitą siłę pociągową jako sumę F_x

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \tag{8}$$

We wzorze (7) przez k_M oznaczono stały współczynnik, wynikający z przełożenia i sprawności przekładni zębatej.
Analogiczne zależności dla lokomotywy idealnej przybiorą postać:

$$M_i = C_M \Phi_i I \tag{9}$$

$$F_i = 4\, k_M \frac{M_i}{D_N} \tag{10}$$

Eliminując $C_M \Phi_i I = M_i$ z zależności (6) otrzymujemy dla sił obwodowych poszczególnych zestawów wzory:

$$F_x = k_M \frac{\lambda_x M_i}{D_x} = \frac{1}{4} \frac{\lambda_x}{\beta_x} F_i, \quad x = 1,2,3,4 \tag{11}$$

a dla całkowitej siły pociągowej lokomotywy rzeczywistej - zgodnie z (8):

$$F = \frac{1}{4}\left(\frac{\lambda_1}{\beta_1} + \frac{\lambda_2}{\beta_2} + \frac{\lambda_3}{\beta_3} + \frac{\lambda_4}{\beta_4}\right) F_i \tag{12}$$

Oznaczymy współczynnik przeliczeniowy we wzorze (12) przez

$$k_{\beta\lambda} = \frac{1}{4}\left(\frac{\lambda_1}{\beta_1} + \frac{\lambda_2}{\beta_2} + \frac{\lambda_3}{\beta_3} + \frac{\lambda_4}{\beta_4}\right) \tag{13}$$

Porównując (12) z (5) stwierdzamy, że dla tych samych wartości prądu I jest $F = k_{\beta\lambda} F_i$ oraz $v = \frac{1}{k_{\beta\lambda}} v_i$, więc

$$v F = v_i F_i \tag{14}$$

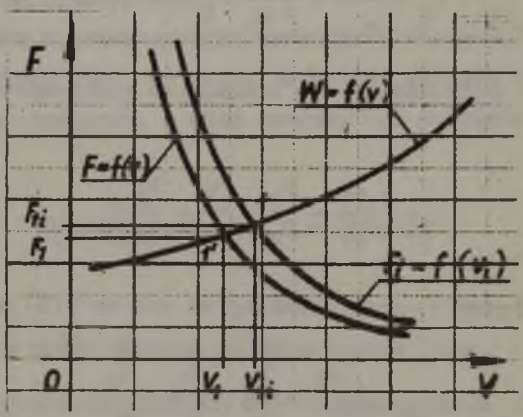
Istotnie, wobec założenia, że oporność wewnętrzna R_w jest taka sama we wszystkich silnikach zarówno lokomotywy idealnej jak i rzeczywistej oraz przy pominięciu drobnych różnic strat w żelazie, sprawności

w obu przypadkach są jednakowe, a więc przy tej samej mocy zasilania $4\ U_c\ I$ moce na obwodach kół napędnych są sobie równe.

W przypadku połączenia szeregowego silniki trakcyjne nagrzewają się praktycznie jednakowo i nieco mniej niż w lokomotywie idealnej tj przy znamionowych średnicach wszystkich kół.

Niejednakowo rozkładają się natomiast napięcia na poszczególnych twornikach. Napięcia te w lokomotywie 4-osiowej idealnej są równe połowie napięcia znamionowego silnika, w związku z czym nierównomierny rozkład w lokomotywie rzeczywistej nie stwarza niebezpiecznych dla silników stanów pracy.

Dlategoż w przypadku połączenia szeregowego należy przede wszystkim analizować i obliczać siły pociągowe poszczególnych zestawów i porównywać je z dopuszczalnymi siłami przyczepności.



Rys. 2. Zmiana punktu pracy lokomotywy na skutek wprowadzenia zestawów kołowych o niejednakowych średnicach

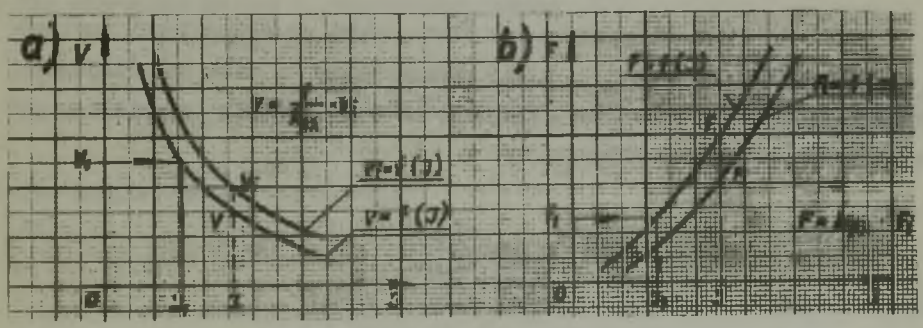
Porządek obliczeń jest, jak następuje:

a) dla zadanego ciężaru pociągu G i wzniesienia maksymalnego i ‰ sporządzamy krzywą oporów trakcyjnych $W = f(v)$ i znajdujemy punkt pracy lokomotywy idealnej jako punkt przecięcia się tej charakterystyki z charakterystyką trakcyjną $F_1 = f(v_1)$, co ilustruje rys.2, punkt 1.

b) dla obranego, możliwie najniekorzystniejszego zbioru parametrów λ_x i β_x obliczamy ze wzoru (13) współczynnik przeliczeniowy $k_{\beta\lambda}$ i wykreślamy charakterystyki zasadnicze lokomotywy rzeczywistej w oparciu o wzory (5) i (12), co dla przypadku $k_{\beta\lambda} > 1$ pokazano na rys.3,

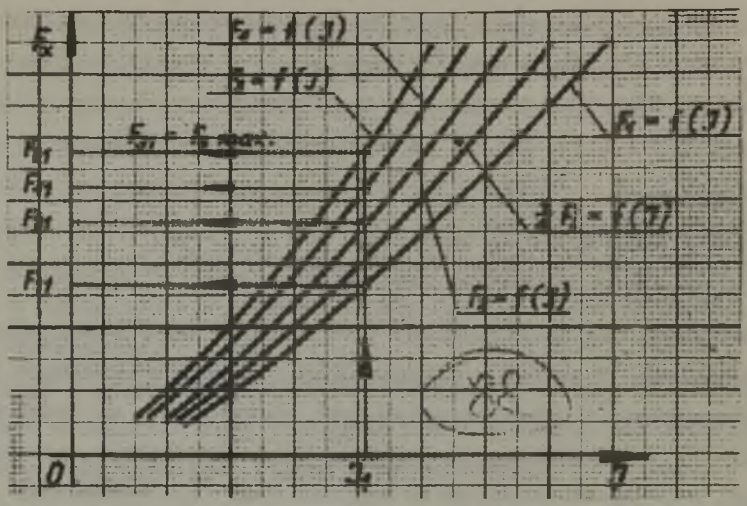
c) na podstawie charakterystyk zasadniczych $v = f(I)$ i $F = f(I)$ sporządzamy charakterystykę trakcyjną $F = f(v)$ rys. 2 i znajdujemy szukany punkt pracy lokomotywy rzeczywistej (punkt 1' na rys. 2),

d) posługując się zależnościami (11) sporządzamy siłowe charakterystyki zasadnicze $F_x = f(I)$ poszczególnych zestawów kołowych lokomotywy rzeczywistej. Z charakterystyk tych odczytujemy wartości sił F_x dla prądu I_1, odpowiadającego punktowi pracy lokomotywy rzeczywistej (1' na rys. 2), jak to pokazano na rys. 4. Prąd I_1 wyznaczony został uprzednio w oparciu o jedną z charakterystyk zasadniczych lokomotywy rzeczywistej $v = f(I)$ lub $F = f(I)$ - rys. 3a i b.



Rys. 3. Sporządzanie charakterystyk zasadniczych lokomotywy rzeczywistej na podstawie charakterystyk lokomotywy idealnej przy szeregowym łączeniu silników trakcyjnych

a) charakterystyka prędkościowa $v = f(I)$, b) charakterystyka siłowa $F = f(I)$



Rys. 4. Wyznaczanie sił pociągowych poszczególnych zestawów kołowych lokomotywy rzeczywistej przy szeregowym połączeniu silników trakcyjnych

e) największą z otrzymanych sił pociągowych poszczególnych zestawów $F_{x\,max}$ (na rys. 4 np. $F_{max} = F_3$) porównujemy z siłą przyczepności, przypadającą na jeden zestaw. Praca lokomotywy będzie prawidłowa pod warunkiem spełnienia nierówności:

$$F_{x\,max} < \frac{1}{4}\,\varepsilon\,F_{\varrho} \tag{15}$$

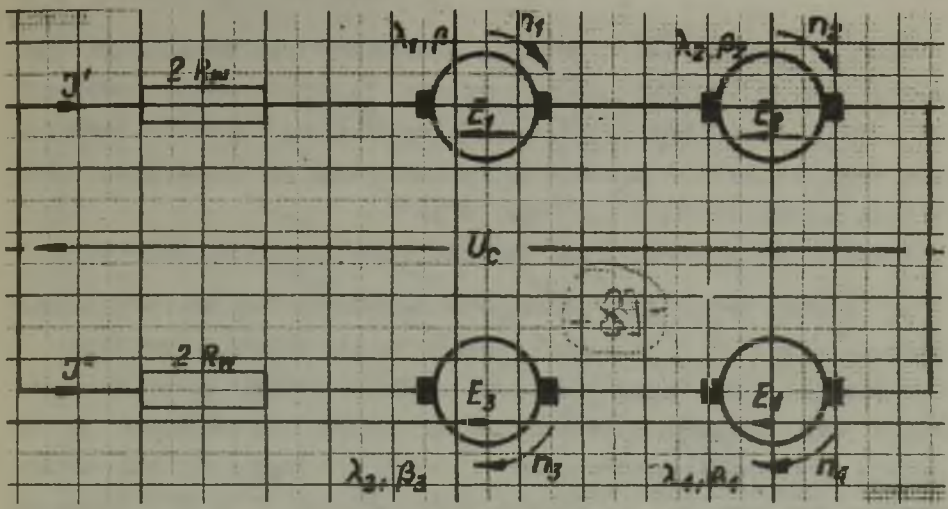
gdzie:

F_{ϱ} - siła przyczepności lokomotywy nieobciążonej,

ε - współczynnik odciążenia, którego wartość zależy od usytuowania zestawu rozwijającego maksymalną siłę pociągową.

2.3. Równoległe połączenie grup silników trakcyjnych

Rozpatrując tzw. układ równoległy (rys. 5) stwierdzamy, że dla każdej pary silników połączonych szeregowo obowiązują równania napięć analogiczne do równań (1) i (2). Po zastosowaniu takich samych przekształceń dochodzimy do analogicznych współczynników przeliczeniowych, a mianowicie:



Rys. 5. Układ i oznaczenia dla równoległego połączenia grup silników trakcyjnych lokomotywy 4-osiowej

- dla pierwszej gałęzi z niewiadomym prądem I'

$$k'_{\beta\lambda} = \frac{1}{2}\left(\frac{\lambda_1}{\beta_1} + \frac{\lambda_2}{\beta_2}\right) \tag{16}$$

- dla drugiej gałęzi z prądem I''

$$k''_{\beta\lambda} = \frac{1}{2}\left(\frac{\lambda_3}{\beta_3} + \frac{\lambda_4}{\beta_4}\right) \tag{17}$$

W ten sposób uzyskujemy możliwość przeliczania prędkościowych charakterystyk idealnych na charakterystyki rzeczywiste dla poszczególnych grup zestawów, których silniki łączone są szeregowo. Zastosujemy przy tym zależności:

$$v' = \frac{1}{k'_{\beta\lambda}} v_i, \quad v'' = \frac{1}{k''_{\beta\lambda}} v_i \tag{18}$$

Wzory przeliczeniowe dla siłowych charakterystyk zasadniczych poszczególnych zestawów nie ulegają zmianie, tj. obowiązuje zależność (11). Zbiór charakterystyk $F_x = f(I)$ sporządzony dla układu szeregowego (rys. 4) jest nadal aktualny pod warunkiem, że rozpatrujemy nadal tę samą kombinację współczynników β i λ.

Porządek postępowania można zestawić w następujących punktach:

a) Kreślimy we wspólnym układzie współrzędnych charakterystyki prędkościowe $v' = f(I)$ i $v'' = f(I)$, posługując się zależnościami (18).

Ponieważ podczas jazdy lokomotywy prędkość liniowa wszystkich zestawów jest jednakowa, obieramy kolejne wartości tej prędkości v_x i wyznaczamy odpowiadające im prądy I'_x i I''_x w każdej gałęzi układu równoległego (rys. 6a). Na zbiorze charakterystyk $F_x = f(I)$ znajdujemy (rys. 6b) dla wartości prądu I'_x siły pociągowe zestawów gałęzi pierwszej F_{1x}, F_{2x} a dla wartości prądu I''_x siły zestawów gałęzi drugiej F_{3x}, F_{4x}. Suma sił pociągowych wszystkich zestawów jest siłą pociągową lokomotywy dla wybranej prędkości v_x:

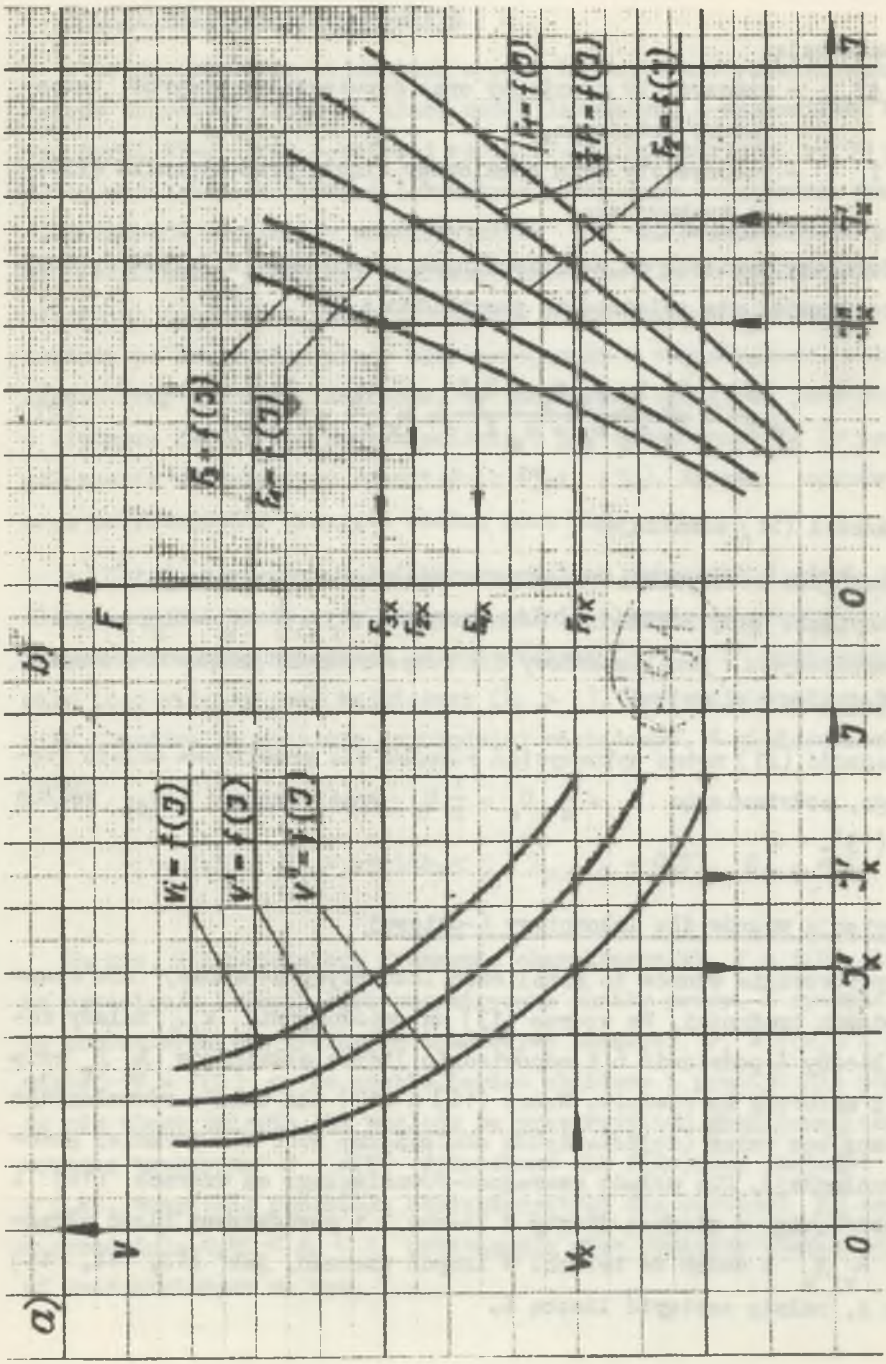
$$F_x = F_{1x} + F_{2x} + F_{3x} + F_{4x} \tag{19}$$

Postępując w ten sposób otrzymujemy charakterystykę trakcyjną $F = f(v)$ lokomotywy rzeczywistej i wyznaczamy rzeczywisty punkt pracy analogicznie jak dla przypadku połączenia szeregowego (rys. 2).

b) Po określeniu prędkości w rzeczywistym punkcie pracy korzystamy ponownie z prędkościowych charakterystyk zasadniczych (rys. 6a) w celu wyznaczenia rzeczywistych wartości prądów gałęzi równoległych w tym punkcie, a następnie z siłowych charakterystyk zasadniczych (rys. 6b) dla określenia sił pociągowych poszczególnych zestawów.

Siły te porównujemy z odpowiednimi siłami przyczepności, a wartości prądów wykorzystujemy do oceny nierównomierności nagrzania silników. Ustalone przyrosty temperatur dla danego punktu pracy można w przybliżeniu wyliczyć z zależności:

$$\Delta\tau_{\infty x} = \left(\frac{I_x}{I_c}\right)^2 \Delta\tau_{dop} \tag{20}$$



Rys. 6. Wyznaczanie rozpływu prądów i sił pociągowych poszczególnych zestawów przy równoległym łączeniu grup silników lokomotywy 4-osiowej:
a) wyznaczanie prądów w gałęziach równoległych, b) określanie sił pociągowych zestawów

gdzie oznaczają:

$\Delta_{\infty x}\Delta\tau_{dop}$ - rzeczywisty graniczny oraz dopuszczalny przyrost temperatury uzwojenia,

I_x, I_c - rzeczywisty oraz znamionowy ciągły prąd twornika silnika trakcyjnego

c) Ustalamy napięcia na poszczególnych twornikach silników trakcyjnych, posługując się zależnością przybliżoną:

$$\frac{U_x}{U_i} = \frac{C_E \lambda_x \Phi_i n_x + R_w I}{C_E \Phi_i n_i + R_w I} \approx \lambda_x \frac{n_x}{n_i} = \frac{\lambda_x}{\beta_x k_{\beta\lambda}} \tag{21}$$

W zależności (21) oznaczają:

U_x - napięcie rzeczywiste twornika o numerze x,

U_i - napięcie przy rozkładzie równomiernym $U_i = \frac{1}{2} U_c = U_N$,

$k_{\beta\lambda}$ - współczynnik przeliczeniowy dla rozpatrywanej gałęzi równoległej (wzór 16 lub 17).

Zależność (21) można wykorzystać również dla przeliczeń układu szeregowego, podstawiając $U_i = \frac{1}{4} U_c = \frac{1}{2} U_N$ oraz wartość $k_{\beta\lambda}$ według wzoru (13).

3. Adaptacja wzorów dla lokomotywy 6-osiowej

Przystosowanie wzorów do przeliczeń lokomotywy 6-osiowej nie stwarza żadnych trudności. We wzorze (13) na współczynnik $k_{\beta\lambda}$ należy zamiast liczby 4 podstawić 6 i odpowiednio liczbę składników λ_x β_x zwiększyć z czterech do sześciu. Wzory (16) i (17) dla układu równoległego pozostaną bez zmian (dojdzie tylko analogiczny wzór dla trzeciej gałęzi równoległej). Dla układu szeregowo-równoległego we wzorach (16) i (17) podstawimy w miejsce liczby 2 liczbę 3 i powiększymy ilość składników λ_x β_x z dwóch do trzech. W innych wzorach, jak (10, 11, 15) liczbę 4, należy zastąpić liczbą 6.

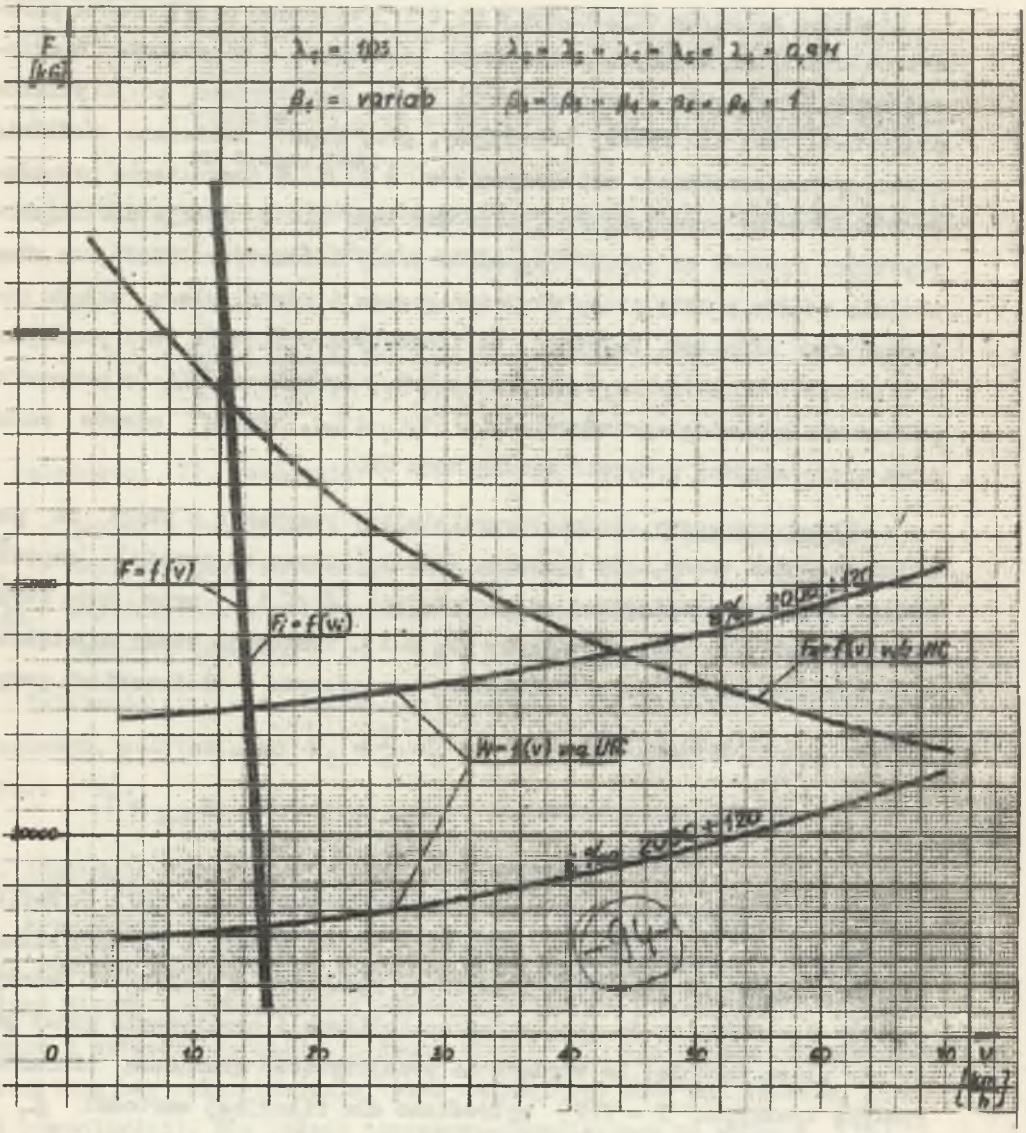
4. Wyniki obliczeń szczegółowych

Stosując metodykę objaśnioną w p. 2 i 3 wykonano przeliczenia parametrów charakteryzujących pracę dwóch lokomotyw, a mianowicie 6-osiowej serii ET-21 oraz 4-osiowej serii EU-04. Rozpatrzono po 30 punktów pracy ustalonej dla każdej lokomotywy, przy czym dobierano możliwie niekorzystne kombinacje współczynników λ i β. W charakterze przykładu przedstawimy przebiegi graficzne uzyskane dla 4 specjalnie niekorzystnych spośród ba'anych przypadków pracy lokomotywy ET-21, a mianowicie po dwa punkty pracy dla szeregowego i równoległego układu połączeń grup silników. Założono, że lokomotywa obciążona jest pociągiem o ciężarze 2000 T raz na wzniesieniu 8 ‰, drugi raz 6 ‰ (w przypadku połączenia równoległego odpowiednio 6‰ i 4‰). Krzywą oporów ruchu oraz przyczepności przyjęto według norm UIC.

a) Układ szeregowy. Najniekorzystniejszy przypadek z uwagi na poślizg zachodzi wtedy, gdy pierwszy silnik (licząc od przodu) napędza zestaw o średnicy mniejszej od pozostałych ($\beta_1 < 1$), przy czym strumień tego silnika jest największy ($\lambda_1 > 1$). Występuje wtedy największa siła obwodowa na zestawie najbardziej odciążonym. W obliczeniach przyjęto:

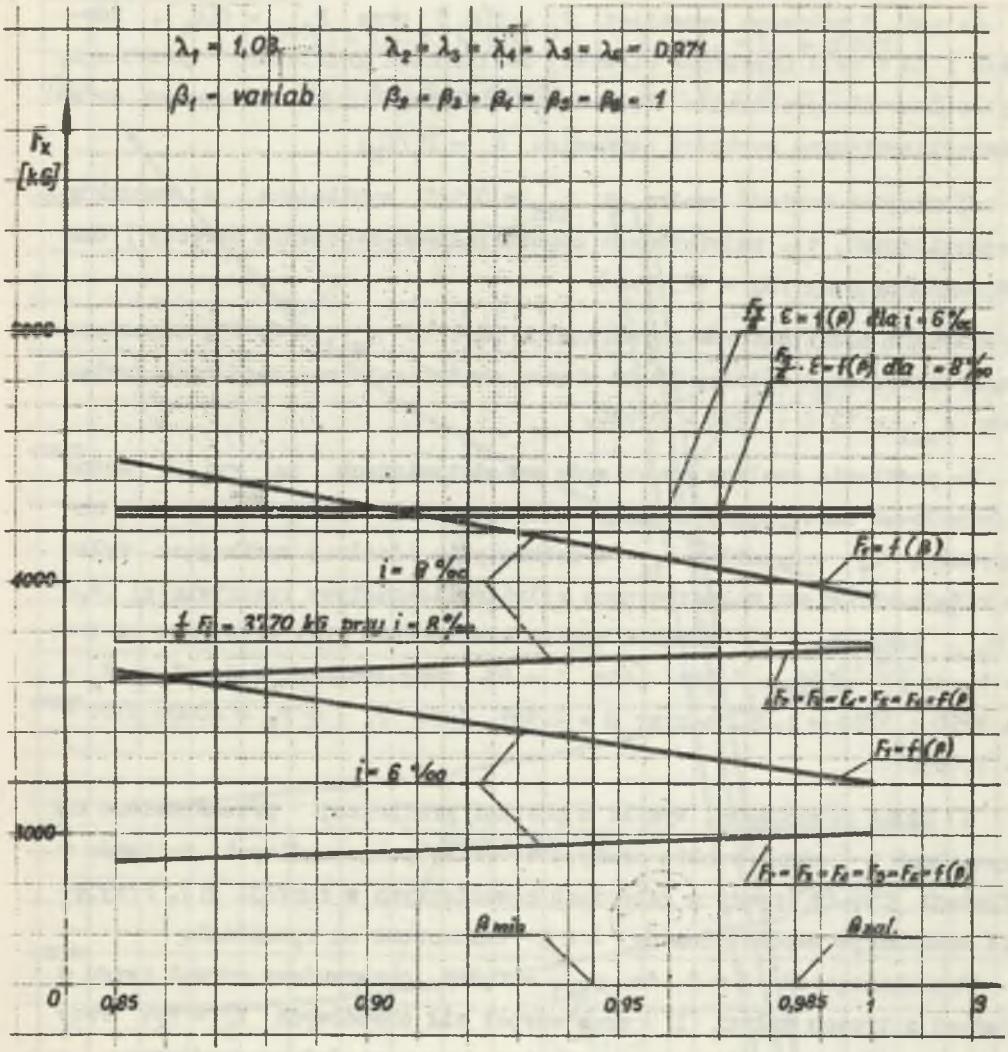
$$\lambda_1 = 1{,}03, \quad \beta_1 = \text{variab.} < 1, \quad \lambda_{2-6} = 0{,}97, \quad \beta_{2-6} = 1.$$

Na rys. 7 uwidoczniono fragmenty charakterystyk $F = f(v)$ i $W = f(v)$ na przecięciu których leżą rozpatrywane punkty pracy. Z rysunku widać, że charakterystyka trakcyjna lokomotywy idealnej $F_i = f(v_i)$ i rzeczywistej $F = f(v)$ są do siebie bardzo zbliżone i praktycznie punkt pracy nie ulega zmianie. Ze względu na przejrzystość graficzną charakterystykę trakcyjną $F = f(v)$ wykreślono dla fikcyjnej wartości $\beta_1 = 0{,}85$. Wszystkie pozostałe charakterystyki dla wartości β_1 zawartych w przedziale $0{,}85 < \beta_1 < 1$ przebiegają więc pomiędzy charakterystykami uwidocznionymi na rys. 7.



Rys. 7. Zmiana punktu pracy lokomotywy ET-21 przy szeregowym połączeniu silników trakcyjnych i wbudowaniu zestawu o mniejszej średnicy

(λ_1 = 1,03, β_1 = variab, < 1, λ_{2-6} = 0,97, β_{2-6} = 1)



Rys. 8. Przebieg sił pociągowych zestawów lokomotywy ET-21 w funkcji współczynnika stoczenia $\beta_1 = D_1/D_N$ przy szeregowym połączeniu silników trakcyjnych

$(\lambda_1 = 1{,}03,\ \lambda_{2-6} = 0{,}97,\ \beta_1 = \text{var.} < 1,\ \beta_{2-6} = 1)$

Na rys. 8 pokazano przebiegi $F_1 = f(\beta_1)$ oraz $F_{2\div6} = f(\beta_1)$. Również i tu w celu uzyskania większej dokładności graficznej przebiegi wykreślono dla przedziału $0,85 < \beta_1 < 1$, przy czym zaznaczono dwie charakterystyczne wartości parametru $\beta_1 = D_1/D_N$:

- najmniejszą wartość realną $\beta_{1\,min} = 0,945$ wynikającą z warunków mechanicznych, tj. największego dopuszczalnego stoczenia obręczy (70mm na średnicy przy $D_N = 1250$ mm).
- zalecaną przez autorów dopuszczalną wartość $\beta_{zal} = 0,985$, odpowiadającą maksymalnej różnicy 20 mm między średnicami poszczególnych zestawów $\beta_{zal} = 1230 : 1250 = 0,985$.

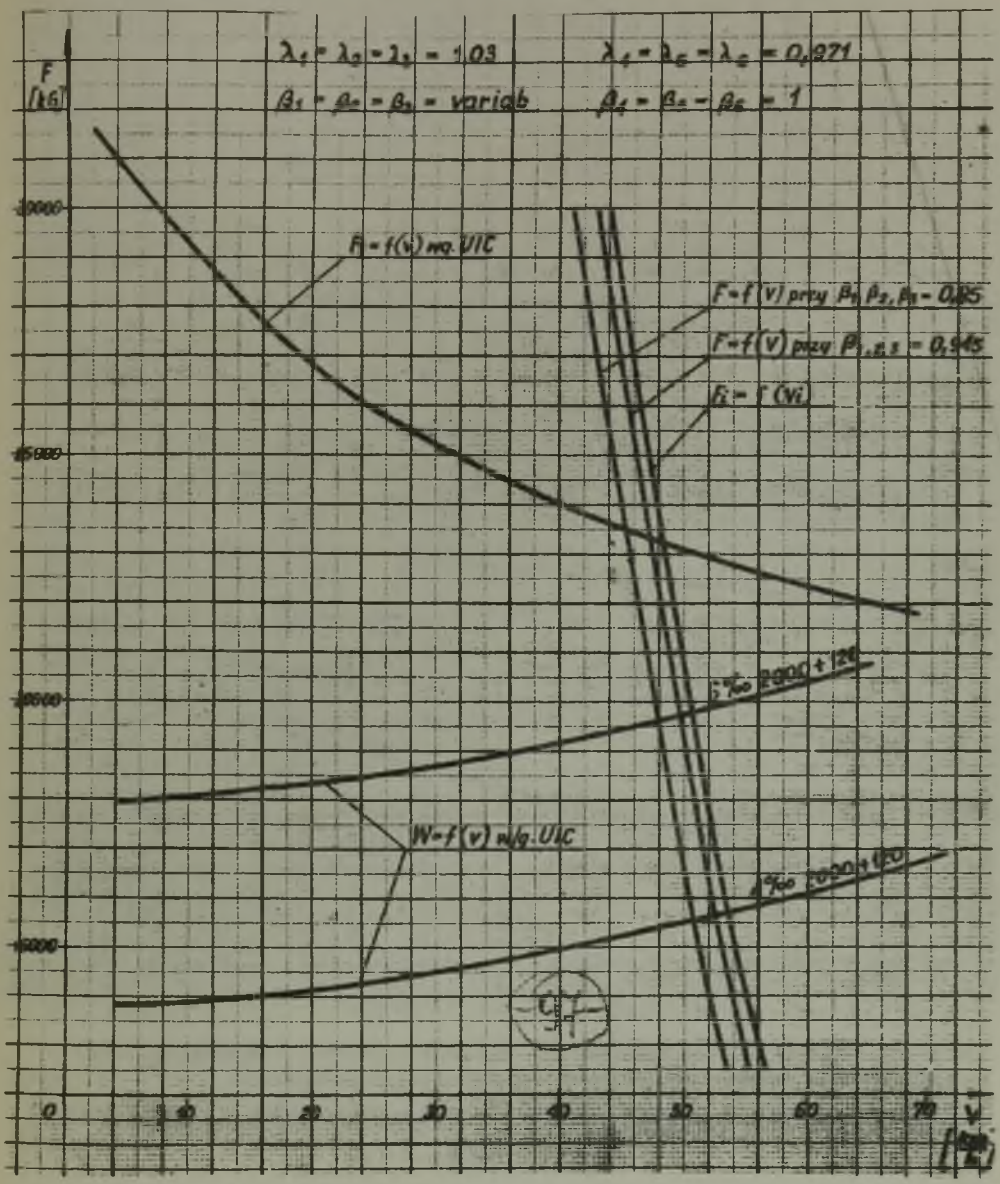
Na podstawie analizy przebiegów przedstawionych na rys. 8 można sformułować następujący istotny wniosek: rozbieżność pomiędzy siłą maksymalną F_1 oraz siłą F_{1i} w lokomotywie idealnej wynikająca tylko z różnic strumieni magnetycznych silników lokomotywy rzeczywistej ($\lambda_1 > \lambda_{2-6}$ przy $\beta_1 = 1$) wzrasta bardzo nieznacznie przy przejściu od $\beta = 1$ do $\beta_1 = \beta_{zal} = 0,985$ (dla $i = 8\%$ mamy przy $\beta_1 = 1$ $F_1 : \frac{1}{6} F_i = 3950 : 3770 \approx 1,05$, a przy $\beta = 0,985$ jest $F_1 : \frac{1}{6} F_i = 4000 : 3770 = 1,06$).

b) <u>Układ równoległy</u>. Wyniki w postaci graficznej przedstawiono na rysunkach 9 (zmiana punktu pracy), 10 (siły poszczególnych zestawów w funkcji β), 11 (prądy w gałęziach równoległych w funkcji β). Przyjęte kombinacje współczynników λ i β zaznaczono na rysunkach.

Przechodząc od $\beta = 1$ do $\beta_{zal} = 0,985$ obserwujemy wzrost prądu w jednej z trzech gałęzi (I'') oraz wzrost sił obwodowych $F_5 = F_6$. Przy wzniesieniu $i = 6‰$ otrzymujemy następujące wartości szczegółowe:

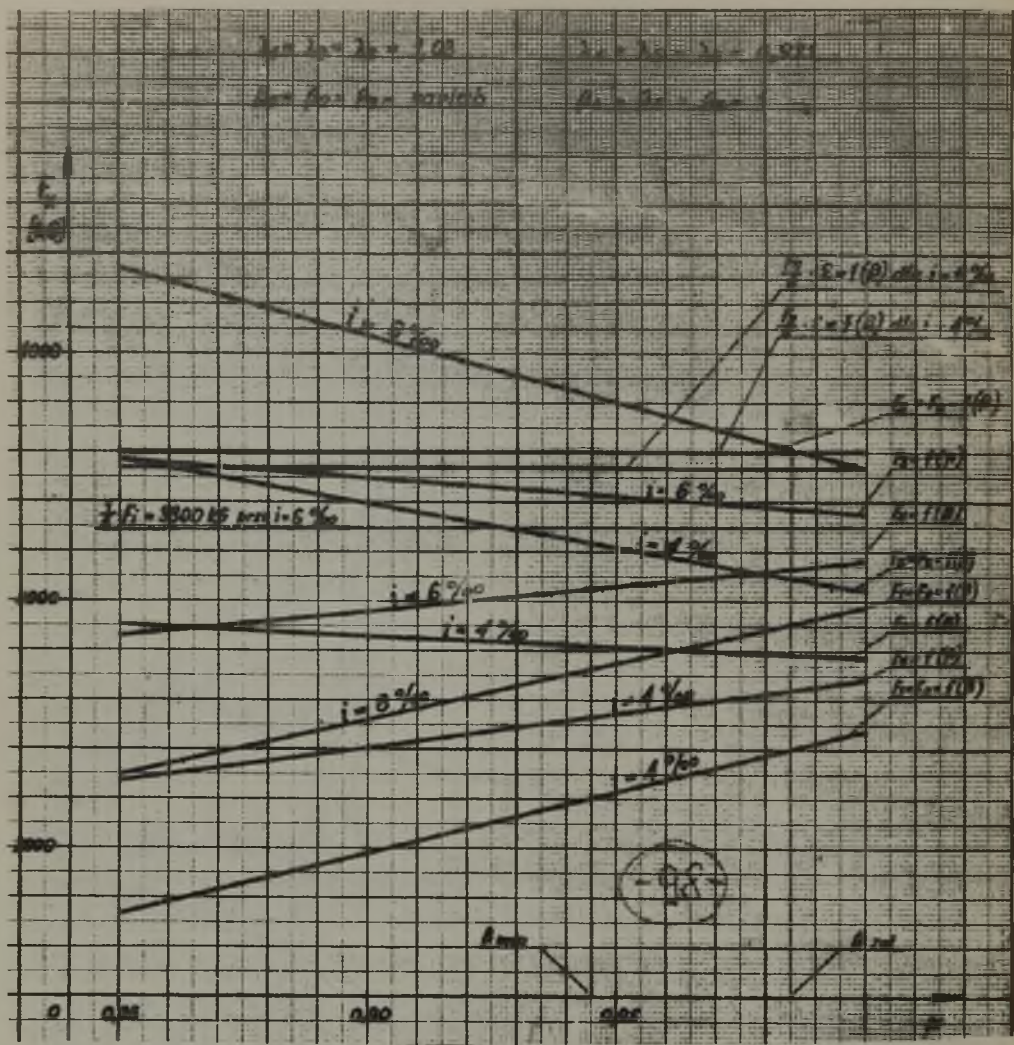
- dla $\beta_{1,2,3} = 1$: $\frac{I''}{I_i} = \frac{390}{357} = 1,09$, $\frac{F_{5,6}}{\frac{1}{6} F_i} = \frac{3550}{3300} = 1,075$

- dla $\beta_{1,2,3} = 0,985$: $\frac{I''}{I_i} = \frac{398}{357} = 1,11$, $\frac{F_{5,6}}{\frac{1}{6} F_i} = \frac{3620}{3300} = 1,095$.



Rys. 9. Zmiana punktu pracy lokomotywy ET-21 przy równoległym połączeniu grup po dwa silniki trakcyjne i wbudowaniu 3 zestawów kołowych o mniejszych średnicach

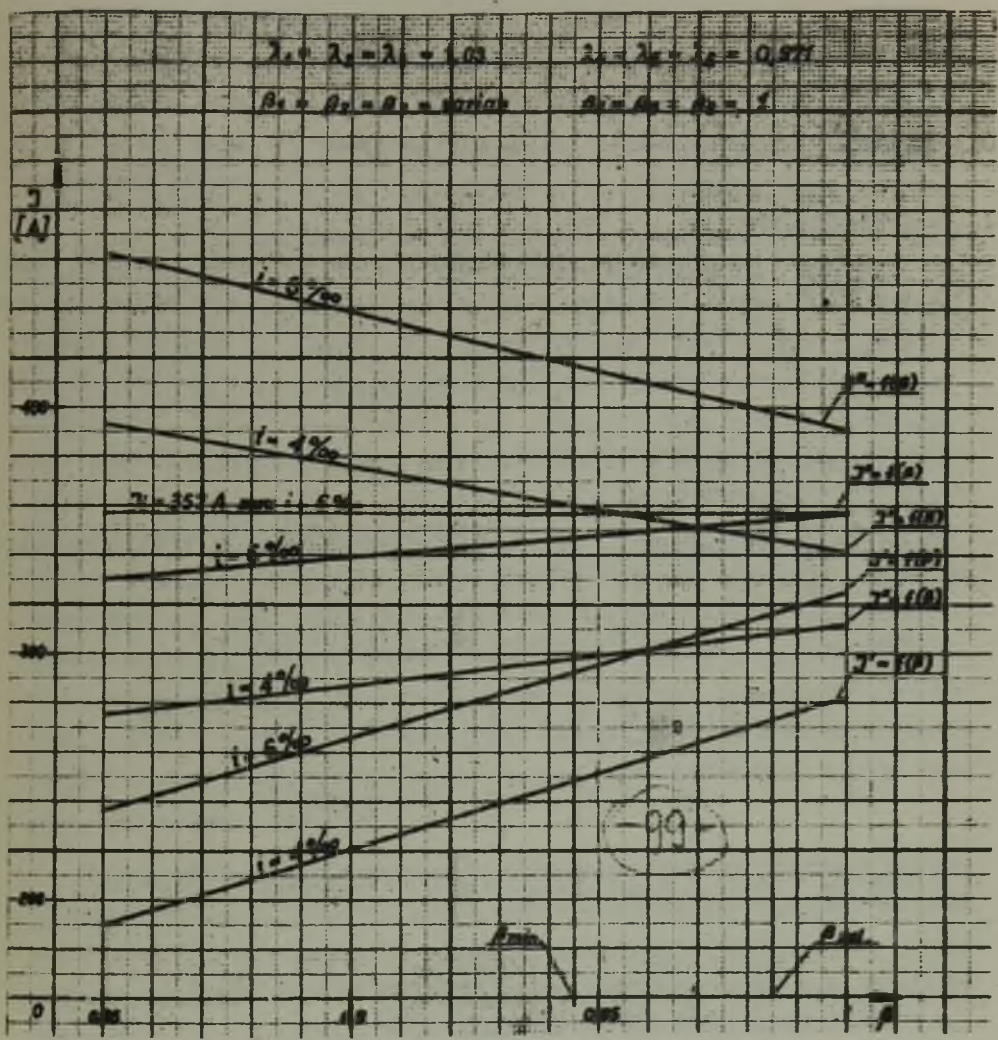
$(\lambda_{1-3} = 1{,}03,\ \beta_{1-3} = \text{var.} < 1,\ \lambda_{4-6} = 0{,}97,\ \beta_{4-6} = 1)$



Rys. 10. Przebieg sił pociągowych zestawów kołowych lokomotywy ET-21 w funkcji współczynnika stoczenia średnic:

$\beta = \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = D_{1,2,3}/D_N$ przy równoległym połączeniu grup po dwa silniki trakcyjne

$(\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 1{,}03,\ \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \text{var.} < 1,\ \lambda_4 = \lambda_5 = \lambda_6 = 0{,}97,\ \beta_4 = \beta_5 = \beta_6 = 1)$



Rys. 11. Przebiegi prądów w trzech gałęziach równoległych obwodu głównego lokomotywy ET-21 w funkcji współczynnika stoczenia średnic $\beta_{1,2,3} = D_{1,2,3}/D_N$ przy równoległym połączeniu grup po dwa silniki trakcyjne

$$(\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 1{,}03,\ \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = D_{1,2,3}/D_N = \text{var.} < 1,$$
$$\lambda_4 = \lambda_5 = \lambda_6 = 0{,}97,\ \beta_4 = \beta_5 = \beta_6 = 1)$$

Jest widoczne, że i w tym przypadku zmniejszenie średnic trzech zestawów o 1,5%, nie wprowadza istotnych zmian do asymetrii sił i prądów asymetria ta wzrasta zaledwie o ok. 2%. Dla przyjętej niekorzystnej kombinacji współczynników λ i β siły obwodowe zestawów 5 i 6 ($F_5 = F_6$) przy wzniesieniu 6 ‰ osiągają praktycznie granicę przyczepności zarówno przy $\beta_{1,2,3} = 1$, jak i przy $\beta_{1,2,3} = 0,985$.

W układzie równoległym należy zbadać również rozkład napięć na twornikach połączonych szeregowo w jednej gałęzi równoległej. Najniekorzystniejszy rozkład napięć wystąpi wtedy, gdy silnik z większym strumieniem magnetycznym będzie napędzać zestaw o mniejszej średnicy. Nierównomierny rozkład napięć pojawia się również przy małych obciążeniach, dla których rozbieżność charakterystyk, a więc i strumieni nie jest ograniczona przepisami.

Przykładowo przyjmijmy $\lambda_1 = 1,1$ β_1 = variab < 1, $\lambda_2 = 0,9$ $\beta_2 = 1$.
Otrzymujemy:

- dla $\beta_1 = 1$: $k_{\beta\lambda} = 0,5(\lambda_1 + \lambda_2) = 0,5\ (1,1 + 0,9) = 1$

$$U_1 = \lambda_1\ U_i = 1,1\ .\ 1500 = 1650\ V$$

$$U_2 = \lambda_2\ U_i = 0,9\ .\ 1500 = 1350\ V$$

- dla $\beta_1 = 0,985$: $k_{\beta\lambda} = 0,5(\frac{\lambda_1}{\beta_1} + \frac{\lambda_2}{\beta_2}) = 0,5(\frac{1,1}{0,985} + \frac{0,9}{1}) = 1,01$

$$U_1 = \frac{\lambda_1}{\beta_1\ k_{\beta\lambda}}\ U_i = \frac{1,1}{0,985\ .\ 1,01}\ 1500 = 1665\ V$$

$$U_2 = \frac{2}{\beta_2\ k_{\beta\lambda}}\ U_i = \frac{0,9}{1\ .\ 1,01}\ 1500 = 1335\ V$$

Przeliczenie wskazuje, że pogorszenie asymetrii napięć na skutek stoczenia średnicy przy najniekorzystniejszej kombinacji β i λ w granicach $0,985 < \beta_1 < 1$ nie ma praktycznego znaczenia.

5. Wnioski i zalecenia

Wyniki przeprowadzonych przeliczeń szczegółowych pozwalają - zdaniem autorów - na sformułowanie poniższych wniosków i postulatów:

1) Przedstawiona analiza szkodliwych zjawisk elektromechanicznych, towarzyszących pracy lokomotywy elektrycznej przy niejednakowych średnicach kół napędnych wskazuje na możliwość znacznego złagodzenia wymagań technicznych odnośnie różnic pomiędzy średnicami kół napędnych poszczególnych zestawów. Z analizy wynika, że można dopuścić różnice rzędu 1,5% średnicy największej, a więc przykładowo ok. 20 mm przy średnicy znamionowej D_N = 1250 mm.

2) Należy podkreślić że w obliczeniach szczegółowych brano pod uwagę przypadki specjalnie niekorzystne, w których nierównomierność średnic kół wzmacnia szkodliwe efekty, wynikające z rozbieżności charakterystyk silników trakcyjnych. Prawdopodobieństwo występowania tego rodzaju sytuacji jest stosunkowo małe, natomiast w szeregu innych przypadków można rozbieżność charakterystyk silników bądź to pomijać, bądź też różnice poszczególnych średnic mogą częściowo kompensować asymetrie prądów, napięć i sił obwodowych, występujące pod wpływem niejednakowych charakterystyk. Okoliczność ta dodatkowo przemawia za postulatem złagodzenia przepisów.

3) Przy formułowaniu wniosku 1) rozważano również względy natury konstrukcyjno-mechanicznej, związane z wyrównywaniem nacisków na osie poszczególnych zestawów oraz regulacją hamulców pneumatycznych, przy czym stwierdzono, że z tej strony nie ma zagrożenia poprawnej pracy lokomotywy z niejednakowymi średnicami kół na poszczególnych zestawach.

4) Wdrożenie do praktyki propozycji przedstawionych we wniosku 1) można rozłożyć na dwa etapy. W pierwszym dopuściłoby się np. 10-milimetrowe rozbieżności między średnicami i poddałoby się obserwacjom ruchowym lokomotywy o wbudowanych zestawach z niejednakowymi średnicami.

Pozwoliłoby to na upewnienie się, czy ewentualnie nie będą występować dodatkowe niepożądane zjawiska, których nie da się przewidzieć teoretycznie. Po zebraniu doświadczeń z okresu 1 do 2 lat można by ustalić ostateczne - uzasadnione ekonomicznie - tolerancje w granicach proponowanych 20 mm.

Przyjęto do druku w październiku 1970 r.

РАБОТА ЭЛЕКТРОВОЗА С ИНДИВИДУАЛЬНЫМ ПРИВОДОМ ОСИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ДИАМЕТРАХ ОТДЕЛЬНЫХ КОЛЕСНЫХ ПАР

Р е з ю м е

В статьи проведено анализ влияния разногласия диаметров отдельных колесных пар электровоза постоянного тока на правильность работы тяговых двигателей.

Особенно рассматривались:

а) возможность обрыва сцеплений отдельных колесных пар

б) неравномерное нагревание двигателей соединённых параллельно

в) неравномерное распределение напряжения на якорях соединённых последовательно.

Приведено примеры подробных расчётов на основе которых сформулировано выводы и рекомендации по допустимым разницам между диаметрами колёс отдельных колесных пар.

THE WORK OF AN ELECTRIC LOCOMOTIVE WITH INDIVIDUAL DRIVE OF AXES AT DIFFERENT DIAMETERS OF THE DRIVEN WHEELS OF EACH SET

S u m m a r y

In this article there is analysed the influence of divergenced diameters of each wheel set of an electric locomotive fed by D.C. on the proper work of traction motors. There was considered in detail:

a) the possibility of adherence rupture of each set

b) unequal heating of motors parallel connected

c) unequal tensure distribution on armature connected in series.

There are given in detail examples of calculations on which base are formed conclussions and recomendations concerning the admissible differences of wheel diameters of individual sets.