ANALIZA STRAT MOCY W TRANSFORMATORACH NA NABRZEŻACH O PRZEŁADUNKACH MASOWYCH

Stefan Szczerba
Zakład Urządzeń Elektrycznych i Elektrotechniki
Morskiej Politechniki Szczecińskiej

S t r e s z c z e n i e

W artykule przeprowadzono analizę strat mocy i energii transformatorów pracujących na nabrzeżu portowym o przeładunkach masowych.
W analizie rozpatrzono pracę pojedyńczą dwu transformatorów jak i równoległą. Na zakończenie podano praktyczne wnioski.

1. W s t ę p

Jednym z najistotniejszych czynników charakteryzujących gospodarkę portu jest to, aby przeładunek odbywał się przy najniższych kosztach własnych, oczywiście w granicach uzasadnionych przesłankami techniczno-ekonomicznymi.
Jedną z pozycji kosztów własnych portu jest wskaźnik zużycia energii elektrycznej na jednostkę przeładunkowej masy towarowej. Jest rzeczą oczywistą, że czynnik ten będzie najmniejszy przy sprowadzeniu do uzasadnionego minimum strat energii elektrycznej i zastosowanie taryfy najbardziej korzystnej dla tego typu odbiorcy.
Minimalizacja strat mocy i energii polega na optymalnym dostosowaniu urządzeń przesyłkowych i odbiorników energii do charakteru obciążeń występujących w danym zakładzie przemysłowym. Należy zaznaczyć, że taka analiza jest trudna ze względu na charakter pracy portu jako przedsiębiorstwa wybitnie usługowego oraz duży stopień przypadkowości

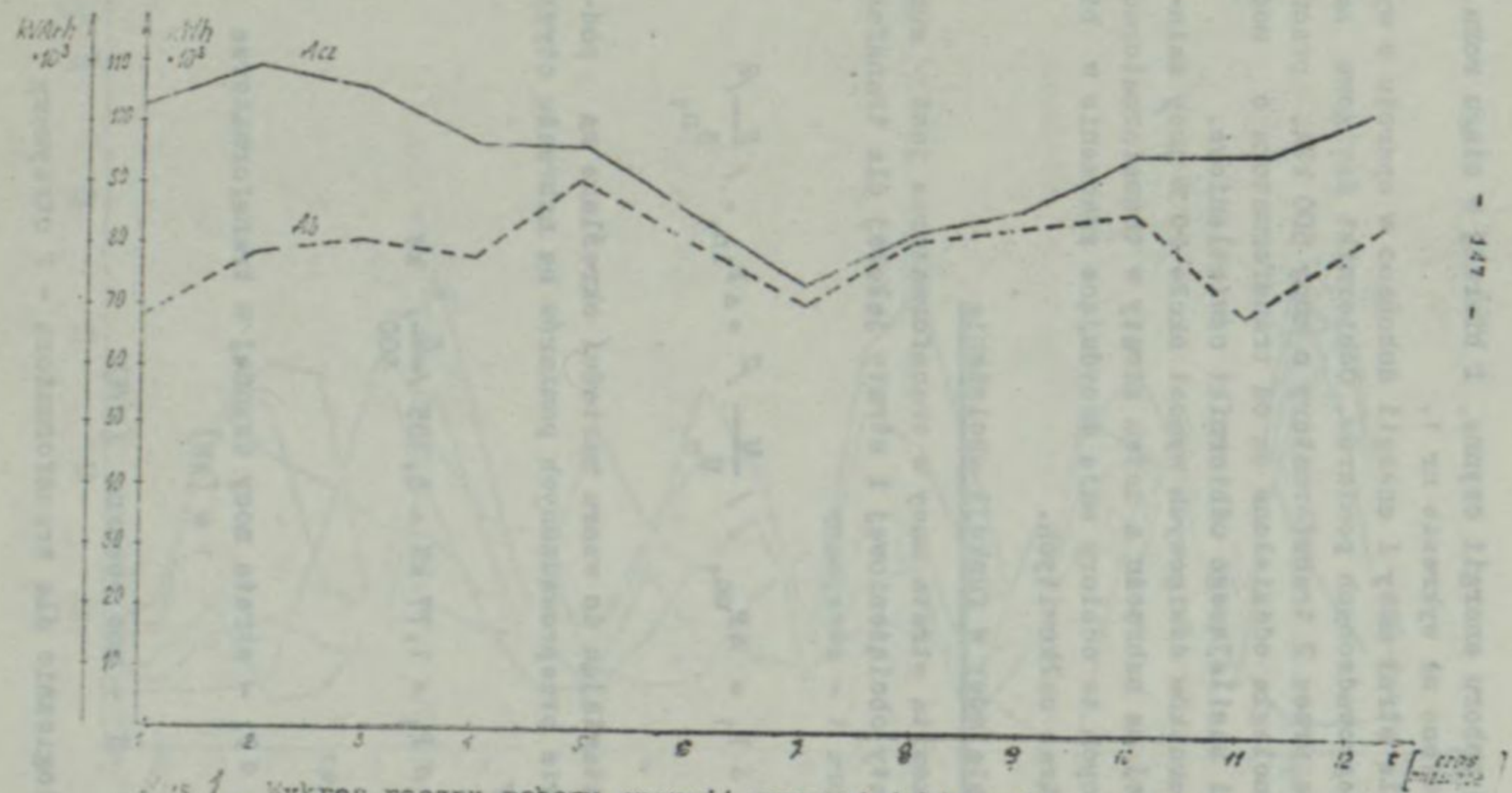
cechujący przebieg zmienności bciążeń. Zależność strat mocy i energii od czynników zmieniających się nie tylko z roku na rok lecz również w poszczególnych miesiącach a nawet okresach charakteryzujących się różnym stopniem nasilenia prac przeładunkowych niezmiernie komplikuje analizę teoretyczną tego problemu. W literaturze polskiej istnieje bardzo niewiele opracowań dotyczących portu jako odbiorcy energii elektrycznej. W zasadzie,wszystkie wskaźniki i metody używane dotychczas jako podstawowe do projektowania sieci elektroenergetycznych w zakładach przemysłowych, oparte na wieloletnich danych pomiarowych i statystycznych, w wielu gałęziach przemysłu,nie uwzględniały odbiorcy typu portu morskiego. Siłą rzeczy zatem projekty oparte na tych wskaźnikach i metodach stosowane do portu nie są optymalnie rozwiązane. Dopiero ostatnio prace autora zapoczątkowały szerszą analizę tego problemu w oparciu o rachunek prawdopodobieństwa i analizę statystyczną.

W niniejszej pracy przeprowadzono analizę strat mocy i energii w transformatorach zasilających nabrzeże Katowickie w rejonie przeładunków masowych portu szczecińskiego.

Zbilansowanie strat dla wszystkich stacji na terenie Zarządu Portu Szczecin dałoby co prawda wyniki ogólne charakteryzujące wielkość strat energii w całości gospodarki energetycznej portu ale ze względu na różnorodny charakter nabrzeży, różne typy odbiorników i różne cykle natężenia przeładunków nie wykazanoby źródeł strat co jest w rachunku perspektywicznym na pewno cenniejsze.

2. Analiza strat mocy i energii elektrycznej

Badaniami objęto nabrzeże przeładunków masowych - Katowickie, ze względu na równomiernie prowadzone prace przeładunkowe, znaczną moc zainstalowaną jak i możliwość rozpatrzenia różnych wariantów pracy transformatorów /pracują 3 transformatory/.



Rys. 1. Wykres roczny poboru energii czynnej i biernej w roku 1971 na nabrzeżu o przeładunkach masowych.

Przebieg poboru energii czynnej i biernej w ciągu roku przedstawiono na wykresie nr 1.
Obliczenie strat mocy i energii dokonano w oparciu o wyniki przeprowadzonych pomiarów. Odbiorniki dźwigowe zasilane są przez 2 transformatory o mocy 500 kVA, pracujące równolegle oddzielone są od transformatora o mocy 315 kVA i zasilającego odbiorniki oświetleniowe.
Moc odbiorników dźwigowych wynosi około 80 % mocy zainstalowanej na nabrzeżu a zatem straty w transformatorach zasilających te odbiory mają decydujące znaczenie w bilansie strat całkowitych.

2.1. Strata mocy w funkcji obciążenia

Całkowita strata mocy w transformatorze jest sumą straty obciążeniowej i straty jałowej dla transformatora 1 - otrzymamy

$$\Delta P_1 = \Delta P_{un_1} \cdot \left/ \frac{U}{U_{n_1}} \right/^2 + \Delta P_{in_1} \cdot \left/ \frac{S}{S_{n_1}} \right/^2$$

Podstawiając do wzoru wartości określane na podstawie przeprowadzonych pomiarów na nabrzeżu otrzymamy

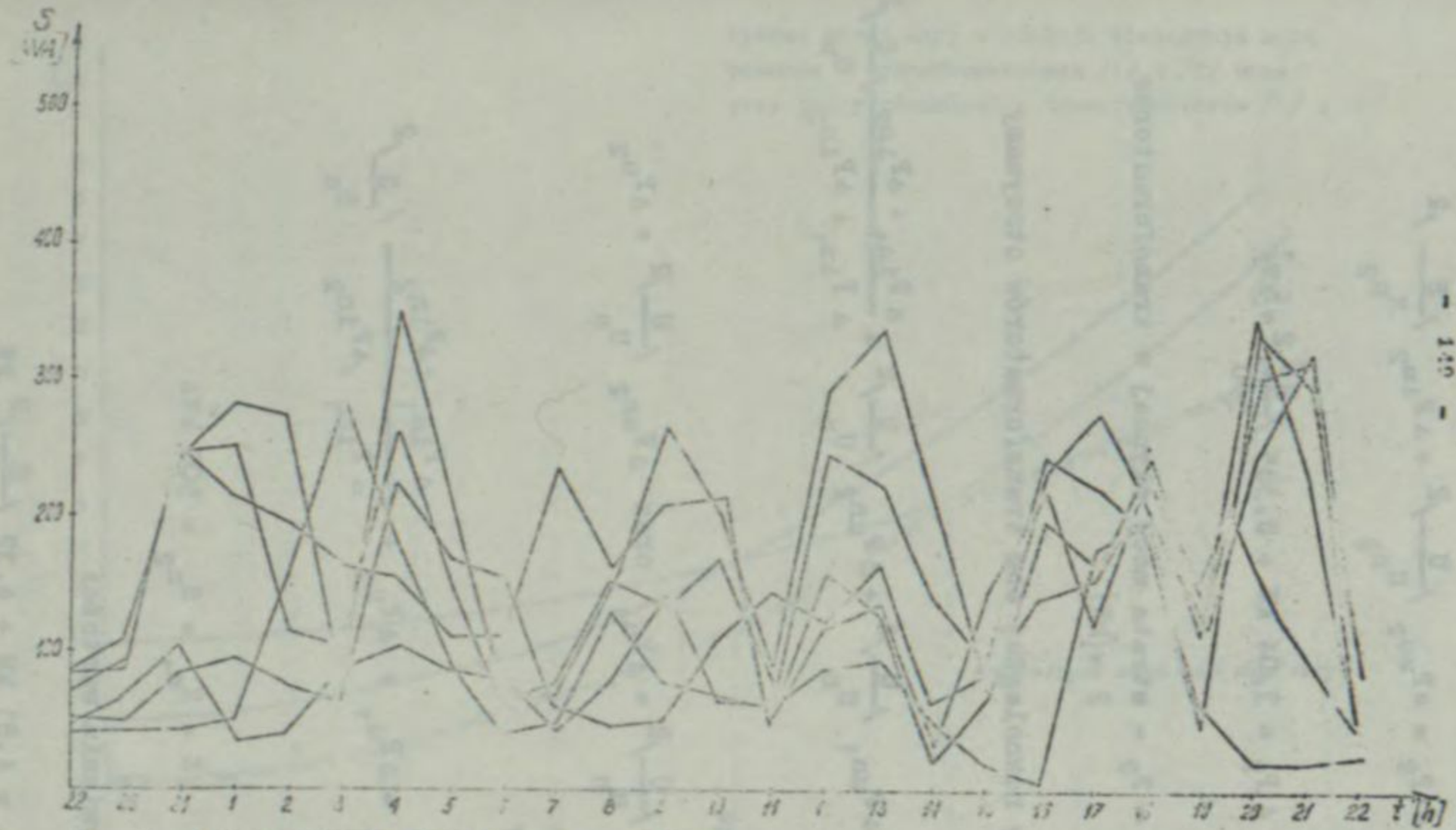
$$\Delta P_1 = 1{,}77 \text{ kW} + 8{,}385 \left/ \frac{S}{500} \right/^2 \text{ kW}$$

gdzie:

ΔP_1 - strata mocy czynnej w transformatorze 1 w [kW]

S - moc pozorna [kVA]

Analogicznie dla transformatora - 2 otrzymamy



Rys. 2. Dobowy przebieg obciążenia mocą pozorną transformatorów zasilających odbiorniki dźwigowe.

$$\Delta P_2 = \Delta P_{un_2} \left/\frac{U}{U_{n_2}}\right/^2 + \Delta P_{in_2} \left/\frac{S}{S_{n_2}}\right/^2$$

czyli

$$\Delta P_2 = 3{,}04 \text{ kW} + 8{,}385 \left/\frac{S}{500}\right/^2 w[\text{kW}]$$

gdzie

ΔP_2 - strata mocy czynnej w transformatorze 2 $w[\text{kW}]$

Dla pracy równoległej obu transformatorów otrzymamy

$$\Delta P_{1;2} = \Delta P_{un_1} \left/\frac{U}{U_n}\right/^2 + \Delta P_{un_2} \left/\frac{U}{U_n}\right/^2 + \frac{\Delta P_{in_1} \cdot \Delta P_{in_2}}{\Delta P_{in_1} + \Delta P_{in_2}} \left/\frac{S}{S_n}\right/^2$$

oznaczając

$$\Delta P_{un_1} \left/\frac{U}{U_n}\right/^2 = \Delta P_{u_1} \quad \text{oraz} \quad \Delta P_{un_2} \left/\frac{U}{U_n}\right/^2 = \Delta P_{u_2}$$

otrzymamy

$$\Delta P_{1;2} = \Delta P_{u_1} + \Delta P_{u_2} + \frac{\Delta P_{in_1} \cdot \Delta P_{in_2}}{\Delta P_{in_1} + \Delta P_{in_2}} \left/\frac{S}{S_n}\right/^2$$

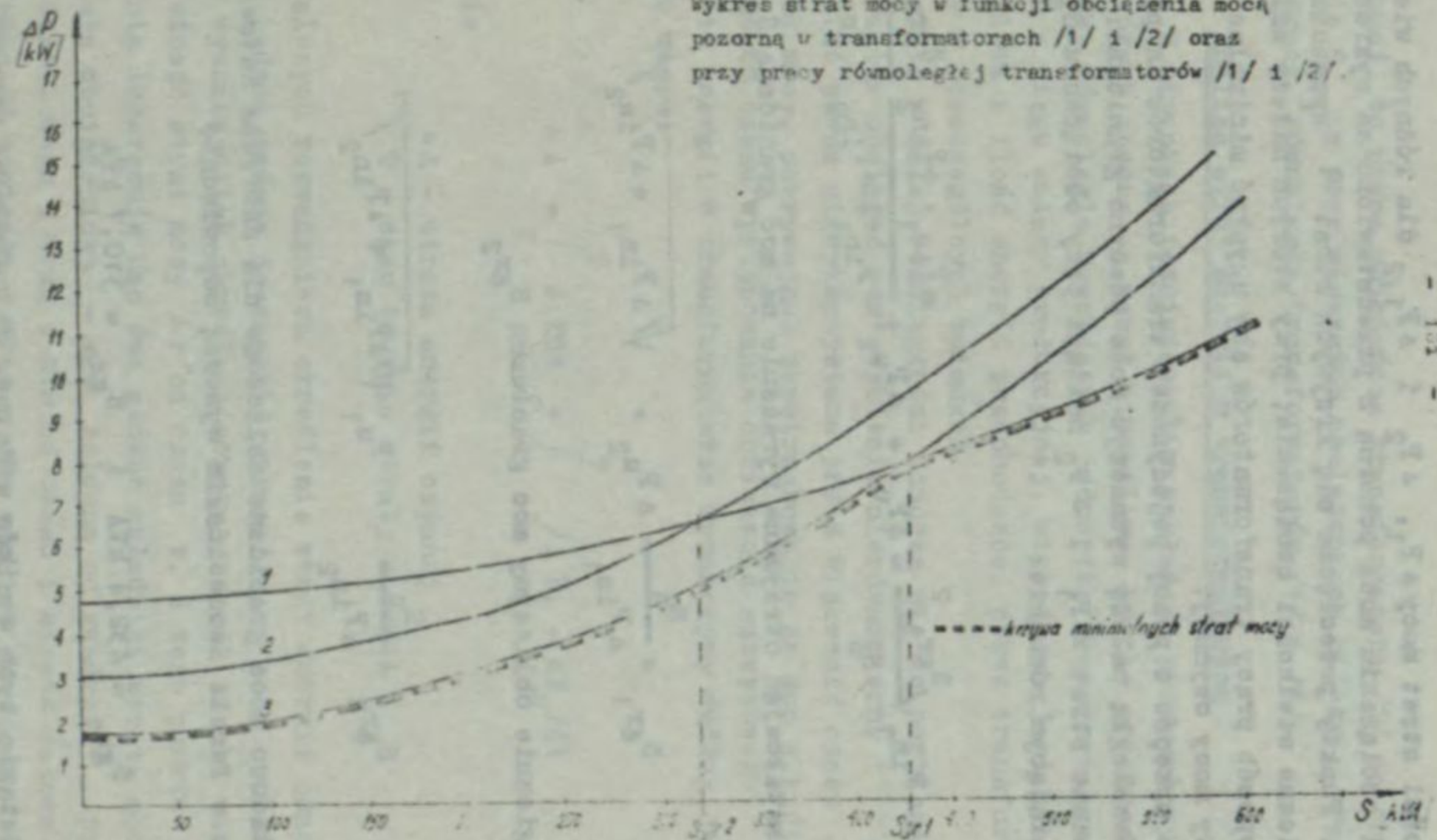
gdzie

$$S = S_{n_1} = S_{n_2} = 500 \text{ kVA}$$

Po podstawieniu wartości

$$\Delta P_{1;2} = 4{,}81 \text{ kW} + 4{,}32 \left/\frac{S}{S_n}\right/^2 \text{ kW}$$

Wykres strat mocy w funkcji obciążenia mocą pozorną w transformatorach /1/ i /2/ oraz przy pracy równoległej transformatorów /1/ i /2/.



Rys 3 1- praca równoległa transformatora 1 i 2 2- praca transformatora 2 3- praca transformatora 1

Wartości strat mocy ΔP_1, ΔP_2 i $\Delta P_{1;2}$ dla różnych wielkości obciążenia mocą pozorną S przedstawiono na wykresie nr 3. Punkty przecięcia się krzywych strat wyznaczają graniczne wielkości obciążenia, przy których należy zmienić sposób pracy transformatorów aby uzyskać minimalne straty mocy czynnej.
Chcąc przejść z pracy pojedyńczej transformatorów na pracę równoległą należy wyznaczyć moce pozorne graniczne. Zrównanie strat ΔP_1 i ΔP_2 nastąpi przy obciążeniu S_{gr_1} spełniającym równanie:

$$\Delta P_{u_1} + \Delta P_{in_1} \left/ \frac{S_{gr_1}}{S_n} \right/^2 = \Delta P_{u_1} + \Delta P_{u_2} + \frac{\Delta P_{in_1} \cdot \Delta P_{in_2}}{\Delta P_{in_1} + \Delta P_{in_2}} \left/ \frac{S_{gr_1}}{S_n} \right/^2$$

przekształcając otrzymane wyrażenie na moc graniczną S_{gr_1}

$$S_{gr_1} = \frac{S_n}{\Delta P_{in_1}} \Delta P_{u_2} \cdot \sqrt{/\Delta P_{in_1} + \Delta P_{in_2}/}$$

analogicznie obliczymy moc graniczną S_{gr_2}

$$S_{gr_2} = \frac{S_n}{\Delta P_{in_2}} \quad P_{u_1} \sqrt{/\Delta P_{in_1} + \Delta P_{in_2}/}$$

Przykładowo moce graniczne obliczone dla nabrzeża Katowickiego w Porcie Szczecińskim wynoszą odpowiednio

$$S_{gr_1} = 432{,}4 \text{ kVA} \quad \text{i} \quad S_{gr_2} = 310{,}7 \text{ kVA}$$

Na podstawie tych wyników widzimy, że optymalne warunki pracy transformatorów ze względu na minimum strat mocy

czynnej, to praca pojedyńcza transformatora /1/ do obciążenia S_{gr_1} a przy większych obciążeniach należy przejść na pracę równoległą transformatorów /1/ i /2/.

2.2. Analiza strat energii w transformatorach

W warunkach istniejących w zakładach przemysłowych, w których zbędne, a nawet niemożliwe, byłoby przełączenie liczby równolegle pracujących jednostek transformatorowych w ciągu zmiany produkcyjnej, miarodajna jest nie moc chwilowa a ilość energii przechodzącej przez transformatory w poszczególnych zmianach.
Uwagi te w całej rozciągłości odnoszą się do portu, gdzie charakter obciążeń jest wybitnie nierównomierny i musi istnieć pewna niewykorzystana przez większość czasu rezerwa mocy, pokrywająca zapotrzebowanie na moc w krótkich okresach czasu występowania obciążenia szczytowego.
Stratę energii w transformatorze wyznaczymy według ogólnego wzoru:

$$\Delta A = \int_0^T \Delta P dt = \int_0^T /\Delta P_1 + \Delta P_u/dt$$

gdzie

ΔA - strata energii czynnej
T - czas trwania straty energii

W dalszych rozważaniach określenie strat energii odnosić się będzie zawsze do energii czynnej.
Aby wyznaczyć tak określoną stratę energii trzeba uznać zależność strat mocy ΔP od czasu t. Z tego punktu widzenia interesują nas dwa główne składniki straty mocy: strata obciążeniowa $-\Delta P_1$, zależna od kwadratu prądu obciążeniowego a wraz z nim od czasu i strata jałowa ΔP_u, zależna od napięcia a wraz z nim również od czasu.
Wychodząc z zależności strat mocy określimy stratę obciążeniową energii

$$\Delta A_i = \int_0^T \Delta P_i \, dt = \int_0^T \Delta P_{in} \left/\frac{I}{I_n}\right/^2 dt = \frac{\Delta P_{in}}{I_n^2} \int_0^T I^2 dt$$

dla U = const

$$\Delta A_i = \int_0^T \Delta P_{in} \left/\frac{S}{S_n}\right/^2 dt = \frac{\Delta P_{in}}{S_n^2} \int_0^T S^2 dt$$

gdzie

ΔA_i - obciążeniowa strata energii

Analogicznie obliczymy stratę napięciową energii

$$\Delta A_u = \int_0^T \Delta P_u dt = \int_0^T \Delta P_{un} \left/\frac{U}{U_n}\right/^2 dt = \frac{\Delta P_{un}}{U_n^2} \int_0^T U^2 dt$$

gdzie

ΔA_u = - napięciowa strata energii

Całkowitą stratę energii określamy wzorem

$$\Delta A = \frac{\Delta P_{in}}{I_n^2} \int_0^T I^2 dt + \frac{\Delta P_{un}}{I_n^2} \int_0^T U^2 dt$$

2.2.1. <u>Straty energii przy pracy pojedyńczej transformatora /1/ i transformatora /2/</u>

Korzystając z ogólnego wzoru na energię możemy napisać

$$\Delta A_1 = \frac{\Delta P_{in1}}{I_n^2} \int_0^T I^2 dt + \frac{\Delta P_{dn1}}{U_n^2} \int_0^T U^2 dt$$

gdzie:

I_{n_1} - znamionowy prąd wtórny transformatora /1/

$U_n = U_{n_1} = U_{n_2}$ - znamionowe napięcie po stronie pierwotnej transformatora /1/

Ponieważ całkowity prąd obciążeniowy I występujący w powyższym wzorze jest sumą prądów na kanale północnym i południowym, których wartości nie są bezpośrednio znane, zatem do dalszej analizy trzeba wprowadzić pojęcie tak zwanego prądu efektywnego, który spełniałby równość:

$$\int_0^T I^2 dt = I_\Delta^2 \cdot T$$

gdzie:

I_Δ - prąd efektywny to znaczy taka średnia wartość prądu, która wywoływałaby na tej samej oporności stratę równą $\int_0^T I^2 dt$

Stąd otrzymujemy wzór na prąd efektywny:

$$I_\Delta = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T I^2 dt}$$

Przy zainstalowaniu licznika A^2h otrzymamy

$$\int_0^T I^2 dt = \alpha \cdot \vartheta_i^2$$

gdzie

$$I_\Delta = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \alpha \cdot \vartheta_i^2}$$

oznaczając wielkości dotyczące kanału północnego wskaźnikiem /I/, południowego - wskaźnikiem /II/ otrzymamy

$$I_{\Delta i} = \vartheta_{iI}\sqrt{\frac{\alpha_I}{T}} \quad \text{oraz} \quad I_{\Delta\,II} = \vartheta_{iII}\sqrt{\frac{\alpha_I}{T}}$$

Całkowity efektywny prąd obciążeniowy jest równy oczywiście

$$I_{\Delta} = I_{\Delta I} + I_{\Delta II}$$

Z kolei, z definicji prądu efektywnego wynika, że

$$I^2 = \frac{1}{T} \int I^2 dt$$

czyli

$$\left[\vartheta_{iI} \sqrt{\frac{\alpha_I}{T}} + \vartheta_{iII} \sqrt{\frac{\alpha_{II}}{T}}\right]^2 = \frac{1}{T} \int_0^T I^2 dt$$

stąd, po uproszczeniach otrzymamy

$$\int_0^T I^2 dt = \left[\vartheta_{iI} \sqrt{\alpha_I} + \vartheta_{iII} \sqrt{\alpha_{II}}\right]^2$$

Obciążeniową stratę energii można wyrazić zatem, jako

$$\Delta A_{i_1} = \frac{\Delta P_{in_1}}{I_{n_1}^2} \left/\vartheta_{iI} \sqrt{\alpha_I} + \vartheta_{iII} \sqrt{\alpha_{II}}\right/^2$$

Przy zainstalowaniu licznika strat V^2h otrzymamy

$$\int_0^T U^2 dt = \beta \cdot \vartheta_u^2$$

napięciową stratę energii można wyrazić zatem, jako

$$\Delta A_{u_1} = \frac{\Delta P_{un_1}}{U_n^2} \cdot \beta \cdot \vartheta_u^2$$

Reasumując, otrzymujemy wzór na stratę energii elektry-

cznej przy pracy transformatora /1/

$$\Delta A_1 = \frac{\Delta P_{in_1}}{I_{n_1}^2} \left/ \vartheta_{iI} \sqrt{\alpha_I} + \vartheta_{iII} \sqrt{\alpha_{II}} \right/^2 + \frac{\Delta P_{un_1}}{U_n^2} \beta \cdot \vartheta_u^2$$

UWAGA: wielkości β i ϑ_u nie posiadają wskaźnika /1/ ponieważ licznik strat kV^2h był podłączony równolegle do obu rozpatrywanych transformatorów.

Analogicznie obliczymy stratę energii przy pojedyńczej pracy transformatora /2/

$$\Delta A_2 = \frac{\Delta P_{in_2}}{I_n^2} \left/ \vartheta_{iI} \sqrt{\alpha_I} + \vartheta_{iII} \sqrt{\alpha_{II}} \right/^2 + \frac{\Delta P_{un_2}}{U_n^2} \cdot \beta \cdot \vartheta_u^2$$

2.2.2. <u>Strata energii przy pracy równoległej transformatorów /1/ i /2/</u>

Przy pracy równoległej transformatorów całkowita strata energii jest sumą dwóch składników:

- straty napięciowej energii równej sumie strat napięciowych obu transformatorów pracujących równolegle;
- straty obciążeniowej energii i uzależnionej od części rzeczywistej połączonych równolegle impedancji rozpatrywanych transformatorów.

Oznaczając impedancję transformatora /1/ jako

$$\hat{Z}_1 = R_1 + j X_1$$

oraz imdepancję transformatora /2/ jako

$$\hat{Z}_2 = R_2 + j X_2$$

przy połączeniu równoległym obu impedancji, otrzymamy

$$\hat{Z}_z = \frac{\hat{Z}_1 \cdot \hat{Z}_2}{\hat{Z}_1 + \hat{Z}_2}$$

gdzie:

$\hat{Z}_z$ - impedancja zastępcza połączenia równoległego

czyli:

$$\hat{Z}_z = \frac{/R_1 + j\,X_1/ \cdot /R_2 + j\,X_2/}{R_1 + R_2 + j\,/X_1 + X_2/}$$

Biorąc część rzeczywistą

$$Re\,\hat{Z}_z = \frac{/R_1\,R_2 - X_1\,X_2/ \cdot /R_1 + R_2/ + /X_1 R_2 + X_2 R_1/ \cdot /X_1 + X_2/}{/R_1 + R_2/^2 + /X_1 + X_2/^2}$$

i zakładając, że

$$\frac{X_1}{R_1} = \frac{X_2}{R_2} = C$$

otrzymamy

$$Re\,\hat{Z} = \frac{/R_1 R_2 - R_1 R_2\,c^2 / /R_1 + R_2/ + /cR_1 R_2 + cR_1 R_2 / /cR_1 + cR_2/}{/R_1 + R_2/^2 + c^2\,/R_1 + R_2/^2}$$

a stąd, po przekształceniach

$$Re\,\hat{Z}_z = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

a zatem część rzeczywistą impedancji transformatorów połączonych równolegle można, przy stałym stosunku $\frac{X}{R}$, traktować jako połączenie równoległe oporności czynnych rozpatrywanych transformatorów.

Korzystając z ogólnych zależności do określenia oporności transformatorów:

$$R_T = \frac{\Delta P_{in} \cdot U_n^2}{S_n} \text{ i } Z_T = \frac{\Delta U_z\% \cdot U_n^2}{S_n \cdot 100} \text{ i } X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}$$

gdzie:

R_T, X_T, Z_T - oznaczają odpowiednio oporności czynną, bierną i pozorną transformatora

$\Delta U_{z\%}$ - procentowe napięcie zwarcia transformatora

Obliczono, że

$$\frac{X_1}{R_1} = 2{,}66 \text{ - dla transformatora /1/}$$

$$\frac{X_2}{R_2} = 2{,}52 \text{ - dla transformatora /2/}$$

a zatem

$$\frac{X_1}{R_1} \approx \frac{X_2}{R_2}$$

Ponieważ, jak to wynika ze wzorów ogólnych

$$R_{T1} = \frac{\Delta P_{in1}}{I_{n1}^2} \text{ oraz } R_{T2} = \frac{\Delta P_{in2}}{I_{n2}^2}$$

dla połączenia równoległego transformatorów otrzymamy

$$R_T\ 1,2 = \frac{\dfrac{\Delta P_{in1}}{I_{n1}^2} \cdot \dfrac{\Delta P_{in2}}{I_{n2}^2}}{\dfrac{\Delta P_{in1}}{I_{n1}^2} + \dfrac{\Delta P_{in2}}{I_{n2}^2}}$$

a stąd, ponieważ $I_{n1} = I_{n2} = I_n$ - dane z tabliczek znamionowych

$$R_T\ 1,2 = \frac{\Delta P_{in1} \cdot \Delta P_{in2}}{I_n^2\ /\Delta P_{in1} + \Delta P_{in2}/}$$

Wracając do ogólnego wzoru na stratę całkowitą energii

$$\Delta A_{1,2} = \frac{\Delta P_{in1} \cdot \Delta P_{in2}}{I_n^2/\Delta P_{in1} + \Delta P_{in2}} \int_0^T I^2 dt + \frac{\Delta P_{un1} + \Delta P_{un2}}{U_n^2} \cdot \int_0^T U^2\, dt$$

i wykorzystując wyprowadzone zależności otrzymamy, że

$$\Delta A_{1,2} = \frac{\Delta P_{in1} \cdot \Delta P_{in2}}{I_n^2/\Delta P_{in_1} + \Delta P_{in2}/} \left/ \vartheta_{iI} \sqrt{\alpha_I} + \vartheta_{iII} \sqrt{\alpha_{II}} \right/^2 + \frac{\Delta P_{un1} + \Delta P_{un2}}{U_n^2} \cdot \beta \cdot \vartheta_u^2$$

gdzie:

$\Delta A_{1,2}$ - całkowita strata energii przy pracy równoległej transformatora /1/ i /2/.

Straty energii obliczono przy różnych rodzajach pracy transformatorów. Należy zaznaczyć, że powyższe wzory wprowadzono w oparciu o wielkości znamionowe transformatorów. Obliczenia przeprowadzono dla poszczególnych zmian pracy na nabrzeżu jednocześnie.
Wyniki obliczeń przedstawiono na wykresie nr 4.

2.3. Analiza zmienności obciążenia

Charakter pracy urządzeń dźwigowych powoduje powstawanie okresowych szczytów obciążeń o dużych amplitudach w krótkich odcinkach czasu. Korzystając z równania wykładniczego Haerlinga obliczymy stopień straty obciążeniowej, który wyraża się zależnością

$$\nu_z = \frac{\tau}{T}$$

gdzie:

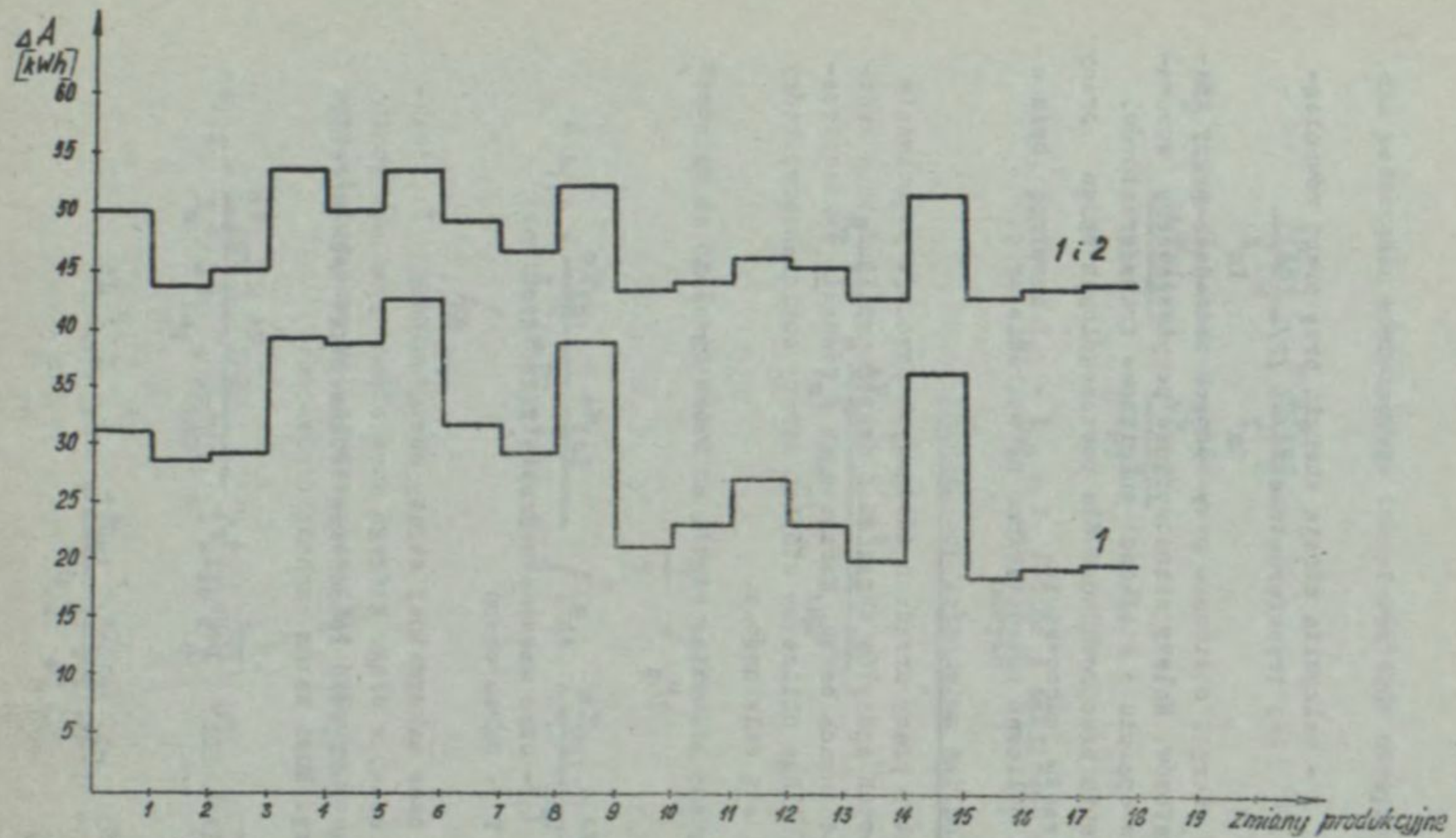
τ - czas maksymalnej straty obciążeniowej
T - okres czasu

Przez czas maksymalnej straty obciążeniowej - τ, rozumiemy czas, w ciągu którego musi płynąć prąd maksymalny - I_m, aby wywołać taką samą stratę, jak rzeczywisty prąd roboczy. Musi zatem zachodzić równość:

$$\int_0^T I^2 dt = I_m^2 \cdot \tau$$

stąd

$$\tau = \frac{1}{I_m^2} \int_0^T I^2 dt = \int_0^T \left/ \frac{I}{I_m} \right/^2 dt$$



Rys.4.

Wykres strat energii dla pracy pojedyńczej transformatora /1/ i pracy równoległej transformatorów /1/ i /2/ dla po czególnych zmian.

lub

$$\tau = \frac{\Delta A_i}{\Delta P_{im}}$$

gdzie:

ΔP_{im} - maksymalna, obciążeniowa strata mocy

Ponieważ zachodzi również związek:

$$\Delta A_i = \Delta P_{im} \int_0^T \left/\frac{S}{S_m}\right/^2 dt = \Delta P_{im} \int_0^T m_{zt}^2 dt$$

zatem

$$\tau = \int_0^T m_{zt}^2 \, dt$$

gdzie:

$m_z = \frac{S}{S_m}$ - chwilowy stopień obciążenia mocą pozorną

S_m - maksymalne w rozpatrywanym okresie obciążenie mocą pozorną.

Ze wzoru Haerlinga mamy, że

$$m_{zt} = 1 - \frac{/ 1 - m_{zo}/ \; /\frac{t}{T}/}{1 - m_z}$$

gdzie:

$m_{zo} = \frac{S_{min}}{S_m}$ - minimalny stopień obciążenia pozornego

$m_z = \frac{S_{śr}}{S_m}$ - średni stopień obciążenia pozornego

S_{min} - minimalne w rozpatrywanym okresie obciążenie mocą pozorną

$S_{śr}$ - średnie w rozpatrywanym okresie obciążenia mocą pozorną

$\frac{t}{T}$ - względny czas obliczeniowy

Ponieważ

$$\tau = \int_0^r m_{zt}^2 \, dt$$

zatem

$$\tau = \int_0^r \left/ 1 - \left/ 1 - m_{zo} \right/ \left/ \frac{t}{T} \right/^{\frac{m_z - m_{zo}}{1 - m_z}} \right/ dt$$

co po scałkowaniu otrzymamy

$$\tau = T \left/ 1 + \frac{/1 - m_{zo}/^2}{2c + 1} - \frac{2 \, / 1 - m_{zo}/}{c + 1} \right/$$

gdzie:

$$c = \frac{m_z - m_{zo}}{1 - m_z}$$

podstawiając $\vartheta_z = \frac{\tau}{T}$ oraz wyrażenie na c, otrzymamy

$$\vartheta_z = 1 + \frac{/ 1 - m_{zo}/^2}{1 + m_z - 2m_{zo}} - \frac{2 \, /1 - m_{zo}/ \, /1 - m_z/}{1 - m_{zo}}$$

co po przekształceniu, prowadzi do równania

$$\vartheta_z = m_z - \frac{/1 - m_z/ \, /m_z - m_{zo}^2/}{1 + m_z - 2 \, m_{zo}}$$

Korzystając z obliczonego w punkcie 2.3. czasu maksymalnej

straty obciążeniowej - τ, możemy wyrazić straty energii w transformatorach w funkcji obciążenia maksymalnego - S_m, według ogólnego wzoru:

$$\Delta A = \Delta P_{in} \left/\frac{S_m}{S_n}\right/^2 \cdot \tau + \frac{\Delta P_{un}}{U_n^2} \int_0^T U^2 dt$$

Korzystając z wyrażenia

$$\int_0^T U^2 dt = \beta \cdot \vartheta_u^2$$

otrzymamy

$$\Delta A = \Delta P_{in} \left/\frac{S_m}{S_n}\right/^2 \cdot \tau + \frac{\Delta P_{un}}{U_n^2} \cdot \beta \cdot \vartheta_u^2$$

dla transformatora /1/ strata energii wyrazi się wzorem:

$$\Delta A_1 = \Delta P_{in1} \left/\frac{S_m}{S_n}\right/^2 \cdot \tau + \frac{\Delta P_{un1}}{U_n^2} \cdot \beta \cdot \vartheta_u^2$$

Dla transformatora /2/ otrzymamy:

$$\Delta A_2 = \Delta P_{in2} \left/\frac{S_m}{S_n}\right/^2 \cdot \tau + \frac{\Delta P_{un2}}{U_n^2} \cdot \beta \cdot \vartheta_u^2$$

Dla połączonych równolegle transformatorów /1/ i /2/

$$\Delta A_{1,2} = \frac{\Delta P_{in1} \cdot \Delta P_{in2}}{\Delta P_{in1} + \Delta P_{in2}} \left/\frac{S_m}{S_n}\right/^2 \cdot \tau + \frac{\Delta P_{un1} + \Delta P_{un2}}{U_n^2} \cdot \beta \cdot \vartheta_u^2$$

W wyprowadzonych wzorach dla wszystkich rodzajów pracy

transformatorów przyjęto jednakowy czas maksymlanej straty obciążeniowej - τ .
Wynika to z następującego rozumowania:
wychodząc z równania

$$\tau = \frac{\Delta A_i}{\Delta P_{im}}$$

oraz korzystając z ogólnej zależności, że

$$\Delta P_{in} = \Delta P_{im} \cdot \left/\frac{S_n}{S_m}\right/^2$$

otrzymamy wyrażenie na τ

$$\tau = \frac{\Delta A_i}{\Delta P_{in} \left/\frac{S_m}{S_n}\right/^2}$$

z tego ogólnego wzoru, dla transformatora /1/ otrzymamy

$$\tau_1 = \frac{\Delta A_i}{\Delta P_{in1} \cdot \left/\frac{S_m}{S_n}\right/ 2}$$

a podstawiając już wyprowadzone zależności na ΔA_{i1}

$$\tau_1 = \frac{\frac{\Delta P_{in1}}{I_n^2} \left/ \vartheta_I \sqrt{a_I} + \vartheta_{iII} \sqrt{a_{II}} \right/^2}{\Delta P_{in1} \cdot \left/\frac{S_m}{S_n}\right/^2}$$

po przekształceniach

$$\tau_1 = \frac{/\vartheta_{iI}\sqrt{\alpha_I} + \vartheta_{iII}\sqrt{\alpha_{II}}/^2}{I_n^2 \, /\frac{S_m}{S_n}/^2}$$

dla transformatora /2/ otrzymamy

$$\tau_2 = \frac{\Delta A_{i2}}{\Delta P_{in2} \, /\frac{S_m}{S_n}/^2}$$

po analogicznych przekształceniach jak powyżej otrzymamy

$$\tau_2 = \frac{/\vartheta_{II}\sqrt{\alpha_I} + \vartheta_{iII}\sqrt{\alpha_{II}}/^2}{I_n^2 \, /\frac{S_m}{S_n}/^2}$$

dla pracujących równolegle transformatorów /1/ i /2/ otrzymamy

$$\tau_{1,2} = \frac{\frac{\Delta P_{in1} + \Delta P_{in2}}{I_n^2 \, /\Delta P_{in1} + \Delta P_{in2}/} \cdot /\vartheta_{iI}\sqrt{\alpha_I} + \vartheta_{iII}\sqrt{\alpha_{II}}/^2}{\frac{\Delta P_{in1} \cdot \Delta P_{in2}}{\Delta P_{in1} + \Delta P_{in2}} \cdot /\frac{S_m}{S_n}/^2}$$

a stąd po przekształceniach

$$\tau_{1,2} = \frac{/\vartheta_{iI}\sqrt{\alpha_I} + \vartheta_{iII}\sqrt{\alpha_{II}}/^2}{I_n^2 /\frac{S_m}{S_n}/^2}$$

Z przeprowadzonych rozważań wynika, że wartość czasu maksymalnej straty obciążeniowej jest dla rozpatrywanych rodzajów pracy transformatorów jednakowa.
Według powyższych wzorów obliczono straty energii w poszczególnych transformatorach dla różnych wartości maksymalnego obciążenia mocą pozorną. Wyniki tych obliczeń przedstawiono na wykresie nr 5.
Moc graniczną maksymalną S_{mg} przy której należy przejść z pracy transformatora /1/ na pracę równoległą transformatorów /1/ i /2/ obliczymy wychodząc z zależności

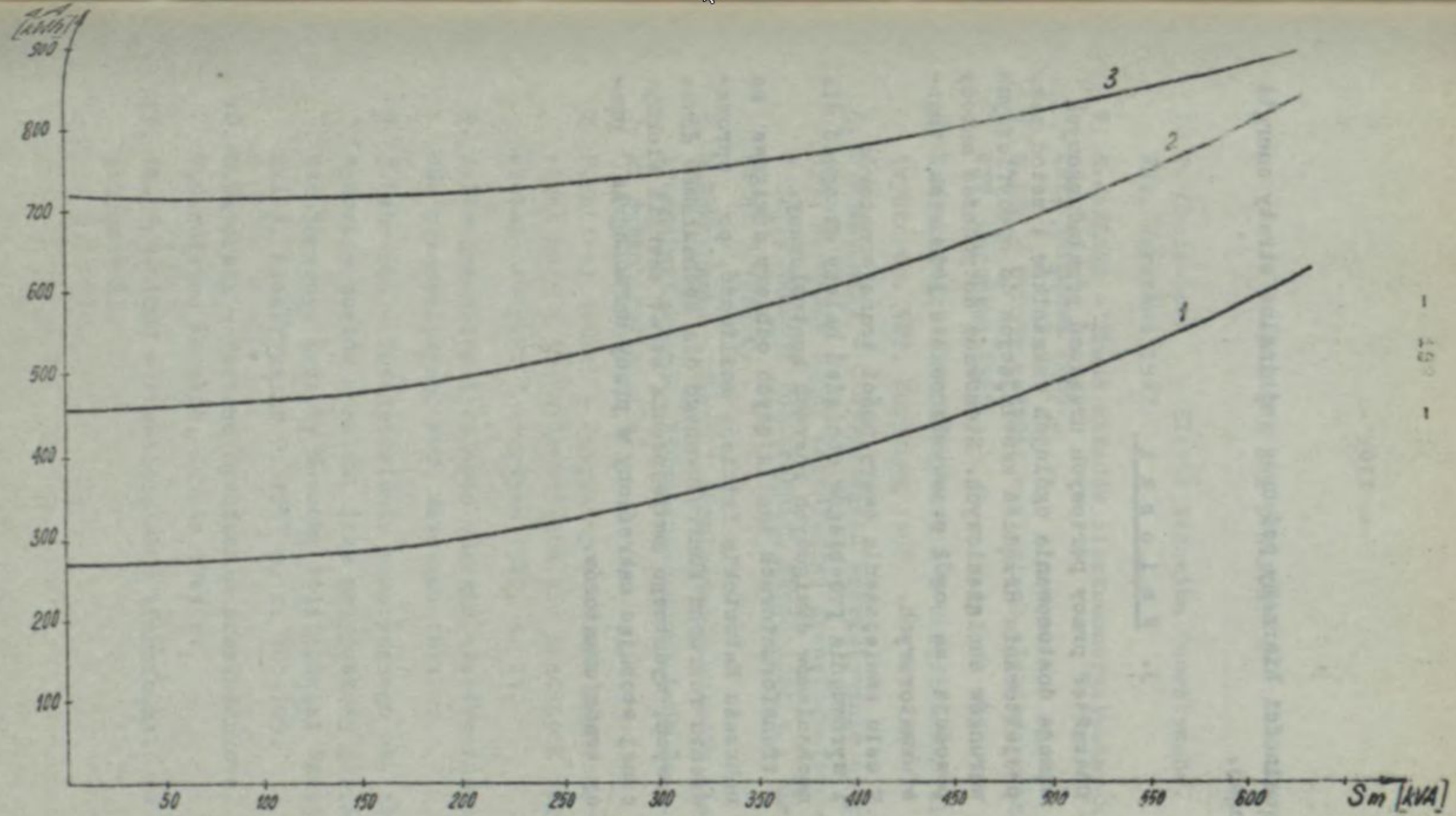
$$\Delta A_1 = \Delta A_{1,2}$$

Korzystając z wyprowadzonych zależności, otrzymamy

$$\Delta P_{in1} \cdot /\frac{S_{mg}}{S_n}/^2 \cdot \tau + \frac{\Delta P_{un1}}{U_n^2} \cdot \beta \cdot \vartheta_u^2 =$$

$$= \frac{\Delta P_{un1} + \Delta P_{in2}}{\Delta P_{in1} + \Delta P_{in2}} /\frac{S_{mg}}{S_n}/^2 \cdot \tau + \frac{\Delta P_{un1} + \Delta P_{un2}}{U_n^2} \cdot \beta \cdot \vartheta_u^2$$

Obliczając moc graniczną dla rozpatrywanego nabrzeża otrzymamy S_{mg} = 970 kVA.
Wynik wskazuje, że w żadnym przypadku, uwzględniając moce znamionowe transformatorów, praca równoległa transformatorów /1/ i /2/ nie jest bardziej opłacalna od pracy pojedyńczej transformatora /1/, jeżeli jako kryterium



Rys. 5. 1- praca transformatora 1 2- praca transformatora 2 3.- praca transformatora 1 i 2

Straty energii czynnej dla poszczególnych rodzajów pracy transformatorów zasilających odbiorniki dźwigowe w funkcji obciążenia mocą pozorną maksymalną.

opłacalności bierzemy pod uwagę minimalne straty energii czynnej.

3. Wnioski

- Charakter pracy portowych urządzeń przeładunkowych wymaga dostosowania ogólnych wskaźników i metod przy projektowaniu urządzeń zasilających do specyficznych warunków obciążeniowych. Stosowane dotychczas metody powodują na ogół przewymiarowanie jednostek transformatorowych.
- W celu zmniejszenia awaryjności transformatorów i wyrównania przebiegów obciążeń należy stosować dla mechanizmów dźwigowych rozruch kontrolowany.
- W transformatorach zasilających odbiory dźwigowe na nabrzeżu Katowickim istnieje możliwość, po wprowadzeniu rozruchu kontrolowanego dla mechanizmów dźwigowych, wydatnego zmniejszenia strat energii elektrycznej stosując nakreślony w pracy harmonogram pracy transformatorów.

L I T E R A T U R A:

1. T. Cholewicki - Elektrotechnika teoretyczna. WNT, Warszawa 1967.

2. S.Jasicki - Praca układów elektroenergetycznych. WNT, Warszawa 1965.

3. B.Lis - Straty energii w sieciach elektrycznych. WNT, Warszawa 1965.

4. E.Miedziński - Straty energii w urządzeniach elektrycznych. WNT, Warszawa 1965.

5. R.Nowakowski - O wyznaczaniu energetycznie optymalnych warunków pracy równoległej transformatorów. Zeszyty Naukowe Politechniki Szczecińskiej, Elektryka nr 9 1967 r.

6. R.Nowakowski - Sieci i eksploatacja układów elektroenergetycznych. Wydawnictwo uczelniane Politechniki Szczecińskiej 1965.

7. S.Sobieszczański - Optymalny stosunek znamionowych strat mocy w transformatorach dla zbadanych warunków obciążeniowych. Energetyka 1970, z. 11.

8. A.Straszewski - Zasilanie energią elektryczną zakładów przemysłowych, WNT, Warszawa 1971 r.

9. S.Szczerba - Przedstawienie sumarycznego obciążenia nabrzeży portów morskich jako przypadkowy proces stacjonarny. Zeszyty Naukowe Politechniki Szczecińskiej, Elektryka nr 9, 1967 r. s. 103-109.

10. M.Wątorski - Portowe urządzenia przeładunkowe. Wydawnictwo Morskie, Gdynia 1964 r.

11. PN-56/E-81000 - Przeciążalność transformatorów energetycznych.