

WIESŁAW GABRYŚ

Katedra Napędu Elektrycznego

UZWOJENIE POPRZECZNE STOJANA W AMPLIDYNI

Streszczenie. W pracy przeanalizowano wpływ liczby zwojów uzwojenia poprzecznego stojana na wzmocnienie statyczne, stałe czasowe, dobroć wzmocnienia oraz moc znamionową amplidyny. Przedyskutowano warunki nagrzewania się uzwojenia poprzecznego. Podano wskazówki wyboru liczby zwojów uzwojenia poprzecznego magnesującego zgodnie oraz omówiono możliwości zastosowania amplidyny z uzwojeniem poprzecznym magnesującym przeciwnie.

1. Wprowadzenie

Przewijanie maszyn elektrycznych, a w szczególności dobieranie uzwojeń o optymalnych parametrach jest zabiegiem konstrukcyjnym stosowanym chętnie i zawsze aktualnym, nawet w zupełnie "ustabilizowanych" seriach maszyn, a w szczególności w produkcji małoseryjnej i indywidualnej, gdzie opłacalność innych zmian konstrukcyjnych nasuwa niejednokrotnie wiele wątpliwości. Wynika stąd celowość rozpracowywania tematów z zakresu "geometrii miedzi" w odniesieniu do produkowanych obecnie w kraju amplidyn, które - jako maszyny specjalne - wytwarzane są w niewielkich ilościach w porównaniu z maszynami ogólnego zastosowania.

Spośród wzmacniaczy maszynowych rozmaitych typów amplidyna wyróżnia się wysokim współczynnikiem wzmocnienia i dobrocią wzmocnienia. Pewne nieduże (np. 10-20%) wahania któregoś z tych parametrów nie mają w większości zastosowań istotnego znaczenia, ponieważ dysponujemy z reguły dużą rezerwą wzmocnienia. Fakt ten rzutuje na kierunki udoskonaleń technicznych w amplidynie: należy mieć na uwadze nie tylko poprawę dobroci wzmocnienia, bądź też zwiększenie wyjściowej mocy znamionowej, lecz również inne wskaźniki jakości amplidyny, a przede wszystkim te, które zapewniają niezawodność eksploatacji i precyzję sterowania.

Jednym z czynników wpływających ujemnie na pewność ruchu amplidyny jest niskonapięciowy zwarty obwód poprzeczny ze stykami szczotkowymi o nieliniowych opornościach przejścia.

Częściowe wyeliminowanie tego wpływu i zwiększenie niezawodności działania oraz precyzji sterowania amplidyny uzyskuje się przez zastosowanie uzwojenia poprzecznego w stojanie [4, 7, 8, 11]. Korzystne działanie tego uzwojenia można krótko scharakteryzować w następujących punktach:

- a) Zwiększenie oporności obwodu poprzecznego powoduje zmniejszenie procentowego udziału nieliniowego oporu przejścia szczotek w tym obwodzie.
- b) Zwiększenie SEM w obwodzie poprzecznym wpływa korzystnie na pewność działania tego obwodu (np. uniezależnienie prądu poprzecznego od docisku, drgań, zmiany gatunku szczotek itp. warunków mechanicznych).
- c) Zmniejszenie prądu poprzecznego poprawia warunki komutacji w osi poprzecznej.
- d) Dzięki zmniejszeniu prądu poprzecznego można przyjąć węższe szczotki poprzeczne i zmniejszyć oddziaływanie podłużne zezwojów komutujących θ_{zk} oraz oddziaływanie podłużne na skutek wychylenia szczotek poprzecznych z osi obojętnej θ_x . Uzyskuje się przez to daleko idące uniezależnienie parametrów wzmacniacza od przypadkowych niedokładności w ustawieniu szczotek.
- e) Zmniejszenie prądu poprzecznego umożliwia lepsze wykorzystanie cieplne uzwojenia twornika, a więc powiększenie znamionowego prądu podłużnego i mocy wyjściowej.
- f) Udział skupionych cewek uzwojenia poprzecznego w magnesowaniu poprawia kształt krzywej pola w osi poprzecznej (rozkład indukcji wzdłuż szczeliny staje się zbliżony do prostokątnego), dzięki czemu - przy tym samym maksymalnym nasyceniu - strumień poprzeczny wzrasta, a więc uzyskujemy lepsze wykorzystanie obwodu magnetycznego (możliwość zwiększenia SEM i mocy znamionowej na wyjściu).

W punktach a, b, c, d scharakteryzowano korzystny wpływ uzwojenia poprzecznego na pewność ruchu i dokładność sterowania amplidyny, natomiast w punktach e i f jego wpływ na lepsze wykorzystanie materiałów czynnych.

Specjalnie ważną rolę odgrywa uzwojenie poprzeczne w amplidynach o dużych mocach znamionowych, np. 20, 40 lub 50 kW [7]. Przy mocach tego rzędu wyłaniają się trudności w zapro-

jektowaniu dwubiegowego obwodu magnetycznego, w związku z czym duże amplitudyny wykonuje się z reguły jako czterobiegowe.

Aby uniknąć przy tym podwójnej (w porównaniu z normalną maszyną p.s.) liczby sworzni szczotkowych na komutatorze, stosuje się w tworniku uzwojenie faliste proste, dzięki czemu do odprowadzenia prądu poprzecznego wystarczą dwa rzędy szczotek.

Przyjęcie dwóch sworzni szczotkowych dla obwodu poprzecznego, a także zwiększone trudności komutacyjne w tym obwodzie wymagają zastosowania uzwojenia poprzecznego o możliwie dużej liczbie zwojów celem znacznego ograniczenia prądu poprzecznego. Pozwala to uniknąć biegunów pomocniczych w osi poprzecznej, które komplikują konstrukcję obwodu magnetycznego i stanowią przyczynę znacznego wzrostu średnicy stojana.

Należy zauważyć, że przedstawione korzyści (zarówno w małych, jak i dużych amplitudynach) rosną wraz z powiększaniem liczby zwojów uzwojenia poprzecznego, co z kolei - wobec ograniczenia objętości miedzi wymiarami dużych żłobków w osi podłużnej - powoduje wzrost jego oporności. W konsekwencji przy dużych liczbach zwojów z maleją w niedopuszczalny sposób parametry, charakteryzujące amplitudynę jako wzmacniacz tzn. współczynnik wzmocnienia mocy i dobroć wzmocnienia.

Z przedstawionej sprzeczności wynika potrzeba ilościowego ujęcia wpływu uzwojenia poprzecznego na parametry, charakteryzujące amplitudynę zarówno w stanach ustalonych, jak i przejściowych. Analiza taka powinna umożliwić racjonalne zaprojektowanie tego uzwojenia.

Sposób projektowania i analiza matematyczna uzwojenia poprzecznego są przedmiotem szeregu publikacji [7, 8, 11]. Praca niniejsza stanowi próbę pogłębienia i rozwinięcia tez, zawartych w dotychczasowych publikacjach.

2. Wpływ uzwojenia poprzecznego na statyczne współczynniki wzmocnienia

2.1. Założenia i określenia

W tej części pracy rozpatrzmy wpływ uzwojenia poprzecznego na parametry, charakteryzujące amplitudynę w ruchu ustalonym, a mianowicie współczynniki wzmocnienia, moc wyjściową oraz gęstość prądu w obwodzie poprzecznym. Ta ostatnia wielkość pozwala ocenić warunki nagrzewania się uzwojenia poprzecznego.

Jako podstawową zmienną - zarówno w rozważaniach statycznych, jak i dynamicznych - przyjęto liczbę zwojów uzwojenia poprzecznego z_q liczoną na parę biegunów, natomiast jego objętość V_q potraktowano jako parametr stały. Takie podejście jest podyktowane względami praktycznymi: przy danych wymiarach żłobków lub okien międzybiegunowych łatwiej jest zmieniać liczbę zwojów, niż objętość uzwojenia.

Jako stałe parametry przyjęto również oddziaływanie prądów wirowych w żelazie twornika oraz oddziaływanie zezwojów komutujących w amplidynie bez uzwojenia poprzecznego.

Wszystkie parametry statyczne i dynamiczne wyrażono jako wielkości względne, a mianowicie jako stosunki odpowiadających sobie wielkości w amplidynie z uzwojeniem poprzecznym i w amplidynie bez uzwojenia poprzecznego (ze szcztokami zwartymi). Tym samym wszystkie parametry amplidyny bez uzwojenia poprzecznego są wielkościami odniesienia. Tego rodzaju formalna postać wzorów daje bezpośredni obraz porównawczy wpływu liczby zwojów na parametry różnych amplidyn, niezależnie od ich danych znamionowych.

Jako zmienną niezależną wprowadzono do wzorów również parametr porównawczy, będący miarą względnej liczby zwojów uzwojenia poprzecznego, a mianowicie stosunek

$$k = \frac{z_q}{z_{tw} + z_q} \quad (2.1)$$

w którym

z_q - liczba zwojów uzwojenia poprzecznego na parę biegunów,

z_{tw} - zastępcza liczba zwojów twornika (liczba zwojów umyślonego uzwojenia skupionego, dająca przepływ równy średniej wartości przepływu rozłożonego uzwojenia twornika).

Przyjęcie jako zmiennej niezależnej parametru k jest o tyle wygodne, że pozwala na wykreślenie dowolnej funkcji $f(k)$ w przedziale

$$0 < k < 1$$

co odpowiada przedziałowi

$$0 < z_q < \infty$$

a ponadto wyprowadzone wzory nie zależą od danych uzwojenio-
wych twornika i przebiegi obliczone dla różnych dowolnie na-
winiętych amplitudyn można porównywać na tym samym wykresie
(rys.4 do 7).

Parametry amplitudyny bez uzwojenia poprzecznego (przyjęte
jako wielkości odniesienia) oznaczono odpowiednimi indeksami
literowymi np. K_u , K_i , K_w - współczynniki wzmocnienia napię-
ciowego, prądowego i mocy.

Analogiczne parametry amplitudyny z uzwojeniem poprzecznym
oznaczono identycznie z dodatkowym górnym indeksem "prim".
Wszystkie podane dalej zależności funkcyjne doprowadzono do
tej samej ogólnej postaci np.

$$\frac{K'_u}{K_u} = f(k), \quad \frac{K'_i}{K_i} = f(k), \quad \frac{K'_w}{K_w} = f(k) \quad (2.2)$$

Analizę statyczną przeprowadzono, przyjmując w odniesie-
niu do amplitudyny szereg założeń upraszczających. Uproszcze-
nia te można uporządkować w następujący sposób:

a) Obwód magnetyczny jest nienasycony (superpozycja stru-
mieni),

b) Maszyna jest idealnie symetryczna dwuosowo zarówno
elektrycznie jak i magnetycznie,

c) Maszyna jest idealnie skompensowana,

d) Nie ma strumienia remanentu,

e) Rozkład pola poprzecznego w szczelinie jest liniowy
(trapezowy). Na rys.1 pokazano przyjęty rozkład pola i prze-
pływu poprzecznego w amplitudynie bez uzwojenia poprzecznego
i z uzwojeniem poprzecznym magnesującym zgodnie, a na rys.2
analogiczne rozkłady pola dla różnych liczb zwojów uzwojenia
poprzecznego magnesującego przeciwnie.

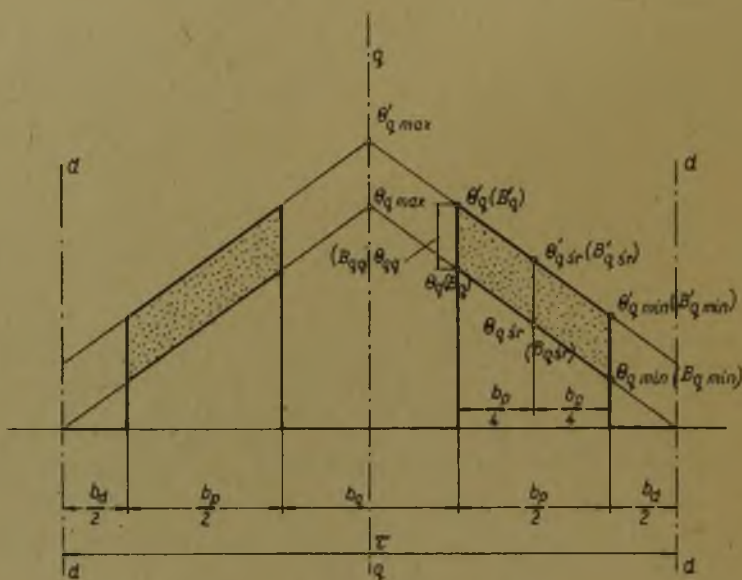
f) Oporność przejścia szczotek poprzecznych przyjmujemy,
jako stałą i wprowadzamy do wzorów za pomocą współczynnika
korekcyjnego

$$\xi_s = \frac{R_{tw}}{R_{tw} + R_{sz}} \quad (2.3)$$

gdzie

R_{tw} - oporność twornika,

R_{sz} - średnia wartość oporności przejścia szczotek dla rozpatrywanego przedziału prądu poprzecznego.

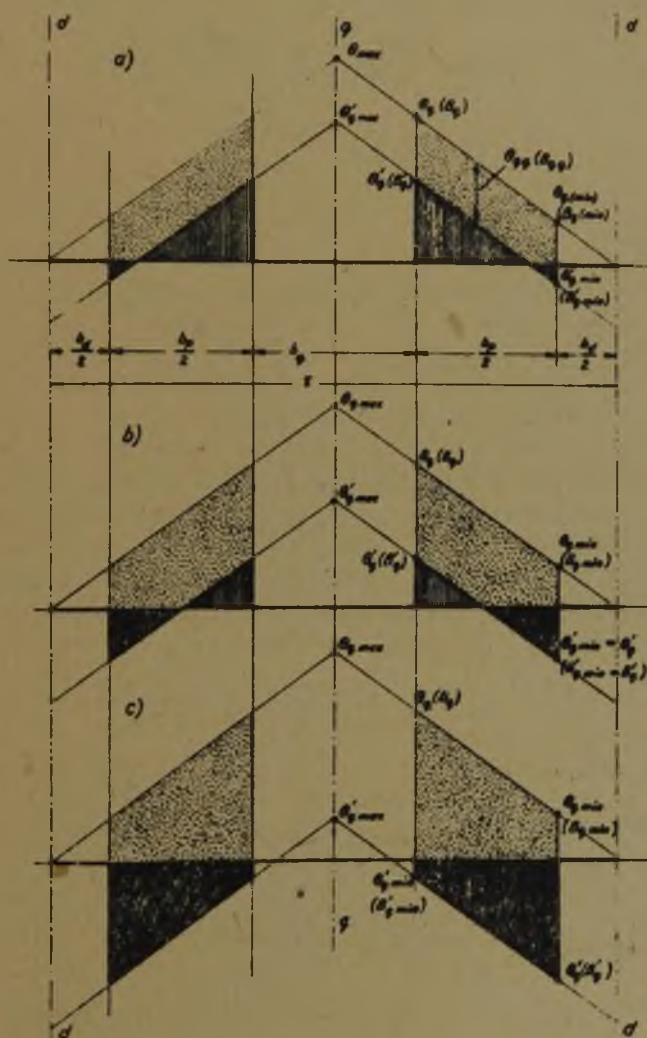


Rys.1. Uproszczony rozkład przepływu θ i indukcji B w osi poprzecznej amplitudyny nienasyconej: θ_q, B_q - bez uzwojenia poprzecznego; θ'_q, B'_q - z uzwojeniem poprzecznym; θ_{qq}, B_{qq} - od uzwojenia poprzecznego

g) W oddziaływaniu podłużnym obwodu poprzecznego wyodrębniamy dwa składniki:

θ_{zk} - oddziaływanie podłużne zezwojów komutujących w osi poprzecznej, przy czym zakładamy proporcjonalność między tym oddziaływaniem i prądem poprzecznym twornika,

θ_{Fe} - oddziaływanie podłużne histerezowe i od prądów wirowych w żelazie twornika. Zakładamy, że jest ono proporcjonalne do strumienia poprzecznego.



Rys.2. Rozkład pola poprzecznego w amplitudynie z uzwojeniem poprzecznym magnesującym przeciwnie: pole wypadkowe a) dodatnie, b) zerowe $k = 0,5$ c) ujemne

W amplidynie ze szczotkami zwartymi przyjmujemy proporcjonalność między strumieniem i prądem poprzecznym, w związku z czym możemy dla obu składników oddziaływania napisać następujące zależności [4, 8, 11]:

$$\theta_{zk} = m_{zk} \cdot z_s \cdot I_q \quad (2.4a)$$

$$\theta_{Fe} = m_{Fe} \cdot z_s \cdot I_q \quad (2.4b)$$

gdzie oznaczają

- z_s - liczbę zwojów uzwojenia sterującego na parę biegunów,
- I_q - prąd poprzeczny,
- m_{zk} i m_{Fe} - współczynniki redukcyjne.

W rozważaniach, dotyczących amplidyny z uzwojeniem poprzecznym, gdzie jako zmienna występuje liczba zwojów z_q nie można zakładać proporcjonalności między strumieniem poprzecznym ϕ'_q i prądem I'_q . Strumień ϕ'_q jest tu złożoną funkcją parametru k , a mianowicie:

$$\phi'_q = \Lambda_q \left[z_{tw} \pm z_q(k) \right] \cdot I'_q(k) \quad (2.5)$$

przy czym

Λ_q - przewodność magnetyczna w osi poprzecznej.

Znak "+" dotyczy zgodnego, a znak "-" przeciwsobnego magnesowania uzwojenia twornika i uzwojenia poprzecznego.

Przekształcając (2.1) otrzymujemy

$$z_q = \frac{k}{1-k} z_{tw} \quad (2.6)$$

Wykorzystując zależności (2.5) i (2.6) oraz współczynniki m_{zk} i m_{Fe} możemy wypisać zależności funkcyjne na przepływ θ'_{Fe} , a mianowicie:

- dla amplidyny z uzwojeniem poprzecznym magnesującym zgodnie:

$$\theta'_{Fe} = \frac{m_{Fe}}{1-k} z_s \cdot I'_q \quad (2.7)$$

- dla amplidyny z uzwojeniem poprzecznym nagnesującym przeciwnie:

$$\theta'_{Fe} = \frac{1-2k}{1-k} m_{Fe} \cdot z_s \cdot I'_q \quad (2.8)$$

Wyrażenie na θ'_{zk} jest w obu przypadkach analogiczne jak w amplidynie ze szczotkami zwartymi ($\theta_{zk} = m_{zk} \cdot z_s \cdot I'_q$).

Oddziaływanie zezwojów komutujących θ_{zk} (lub θ'_{zk}) można więc zastąpić równoważnym oddziaływaniem dodatkowego uzwojenia skupionego umieszczonego na biegunach w osi podłużnej i włączonego do obwodu poprzecznego [8, 11], przy czym liczba zwojów tego uzwojenia będzie równa

$$z_{qd} = m_{zk} \cdot z_s$$

Oddziaływanie θ_{Fe} można natomiast zastąpić (w założeniu proporcjonalności $\theta_{Fe} = \Phi_q$) oddziaływaniem podłużnym pewnego dodatkowego uzwojenia twornika o zastępczej liczbie zwojów $z_{td} = m_{Fe} \cdot z_s$ i oporności R_{td} tak dobranej, by był spełniony warunek

$$\theta_{Fe} = z_{td} \cdot I_{td}$$

Zastępczy schemat obwodu elektromagnetycznego amplidyny, uwzględniający powyższe założenia, a w szczególności oba opisane sprzężenia uwidacznia rysunek 3. Dla przejrzystości rysunku i oznaczeń uzwojenie dodatkowe z_{td} narysowano umow-

nie na osobnym tworniku (w ten sposób poprzeczny obwód magnetyczny jest na rys.3 dwukrotnie powtórzony).

Wyniki analizy statycznej nie ulegną zmianie, jeżeli przez Θ_{zk} oznaczymy dowolne oddziaływanie podłużne proporcjonalne do prądu poprzecznego, np. spowodowane wysunięciem szczotek poprzecznych z osi obojętnej, bądź też nawinięciem realnego uzwojenia z_{qd} , jak na schemacie 3. Jeżeli w rzeczywistej maszynie występują równocześnie omówione oddziaływania składowe, to przez Θ_{zk} rozumiemy oddziaływanie wypadkowe, stanowiące sumę algebraiczną przepływów składowych.

Podobnie należy interpretować oddziaływanie Θ_{Fq} , a mianowicie, jako sumę algebraiczną wszelkich przepływów w osi podłużnej, proporcjonalnych do strumienia poprzecznego Φ_q .

Dla maszyny odpowiadającej wszystkim sformułowanym powyżej założeniom rezerwujemy w niniejszej pracy określenie "amplidyna rzeczywista".

W dalszej analizie będzie również rozpatrywana, jako szczególny przypadek, amplidyna bez oddziaływania obwodu poprzecznego na oś podłużną oraz z pominięciem spadku napięcia na szczotkach poprzecznych ($m_{Fq} = 0$, $m_{zk} = 0$, $\xi_S = 1$). Maszynę taką będziemy dalej określać terminem "amplidyna idealna".

2.2. Zmiana oporności obwodu poprzecznego w funkcji parametru k przy $V_q = \text{const}$

Funkcja ta ma znaczenie podstawowe dla wyprowadzenia dalszych wzorów. Jej ogólny charakter wynika stąd, że nie zależy ona od sposobu włączenia uzwojenia poprzecznego (zgodne lub przeciwne), jak również od rodzaju i kierunku wewnętrznych sprzężeń zwrotnych.

Wprowadzamy następujące oznaczenia:

- dla uzwojenia poprzecznego

R_q - oporność w omach,

z_q - liczba zwojów na parę biegunów,

S_q - przekrój 1 zwoju w cm^2 ,

l_q - średnia długość zwoju w cm,

V_q - objętość uzwojenia w cm^3 ,

a_q - liczba gałęzi równoległych (przyjmujemy dalej $a_q = 1$),

- dla uzwojenia twornika

R_{tw} - oporność w omach,

l_{tw} - średnia długość zwoju w cm,

S_{tw} - przekrój zwoju w cm^2 ,

V_{tw} - objętość uzwojenia w cm^3 ,

N - liczba czynnych prętów,

a - liczba par gałęzi równoległych.

- oznaczenia wspólne

ρ - oporność właściwa miedzi w $\frac{om \cdot mm^2}{m}$,

p - liczba par biegunów,

R_{sz} - oporność szczotek poprzecznych w omach.

Stosując powyższe oznaczenia możemy wzory na oporności uzwojeń podać w następującej postaci:

$$R_q = \rho p^2 \frac{z_q^2 l_q^2}{V_q} \cdot 10^{-4} \quad (2.9)$$

$$R_{tw} = \rho \frac{N^2 l_{tw}^2}{16 a^2 V_{tw}} \cdot 10^{-4} \quad (2.10)$$

Z wzorów (2.9) i (2.10) otrzymujemy stosunek obu oporności:

$$\frac{R_q}{R_{tw}} = 16 a^2 p^2 \left(\frac{l_q}{l_{tw}} \right)^2 \cdot \frac{V_{tw}}{V_q} \left(\frac{z_q}{N} \right)^2 \quad (2.11)$$

W oparciu o wykres przepływu uwidoczniony na rys.1 i pamiętając, że liczba zwojów twornika liczona na parę biegunów wynosi $\frac{N}{4ap}$, ustalamy następujące charakterystyczne

wartości przepływu poprzecznego w amplidynie ze szczotkami zwartymi (oznaczenia wg rys.1):

$$\theta_q = I_q \cdot \frac{N}{4ap} \cdot \frac{b_p + b_d}{\tau} \quad (2.12)$$

$$\theta_{qsr} = I_q \cdot \frac{N}{4ap} \cdot \frac{0,5 b_p + b_d}{\tau} \quad (2.13)$$

Ze wzoru (2.13) wynika, że zastępcza liczba zwojów skupionych, wytwarzających przy zasilaniu prądem I_q przepływ o wartości θ_{qsr} wynosi (na parę biegunów):

$$z_{tw} = \frac{N}{4ap} \cdot \frac{0,5 b_p + b_d}{\tau} \quad (2.14)$$

Z przekształcenia wzoru (2.1) oraz z zależności (2.14) otrzymujemy:

$$z_q = \frac{k}{1-k} \cdot \frac{N}{4ap} \cdot \frac{b_p + 2b_d}{2\tau} \quad (2.15)$$

Przy pomocy wzoru (2.15) eliminujemy liczbę zwojów z_q z zależności (2.11) otrzymując funkcję $\frac{R_q}{R_{tw}} = f(k)$, a mianowicie

$$\frac{R_q}{R_{tw}} = C \left(\frac{k}{1-k} \right)^2 \quad (2.16)$$

Bezwymiarowa stała C zawiera parametry niezmiennie, jak objętości V_{tw} i V_q , średnie długości zwojów oraz wymiary geometryczne obwodu magnetycznego. Wartość jej wynosi:

$$C = \frac{1}{4} \left(\frac{b_p + 2b_d}{\tau} \right)^2 \left(\frac{1}{l_{tw}} \right)^2 \cdot \frac{V_{tw}}{V_q} \quad (2.17)$$

Oznaczenia wymiarów geometrycznych na rys.1 i we wzorach (2.12) do (2.17) są następujące:

τ - podziałka biegunowa,

b_p - długość łuku nabiegownika (obu połówek rozciętego bieguna łącznie),

b_q, b_d - szerokości dużych żłobków: w osi poprzecznej i w osi podłużnej.

W przypadku szczególnym, gdy $b_d = b_q$ (amplidyny krajo-we), jest $\tau = b_p + 2b_d$, w związku z czym niektóre wzory upraszczają się, a mianowicie:

$$z_{tw} = \frac{N}{8ap}, \quad z_q = \frac{k}{1-k} \cdot \frac{N}{8ap} \quad (2.18)$$

$$C = \frac{1}{4} \left(\frac{l_q}{l_{tw}} \right)^2 \cdot \frac{V_{tw}}{V_q} \quad (2.19)$$

W dalszym ciągu będziemy stosować wzory uproszczone (2.18) i (2.19).

Stosunek oporności całego obwodu poprzecznego amplidyny z uzwojeniem poprzecznym i amplidyny ze szczotkami poprzecznymi zwartymi wyrazi się zależnością

$$1 + C_s \cdot \frac{R_q}{R_{tw}},$$

która jako funkcja parametru k przybiera postać

$$\frac{R_{tw} + R_q}{R_{tw}} = 1 + C_s \left(\frac{k}{1-k} \right)^2 \quad (2.20)$$

We wzorze (2.20) przez C_s oznaczono iloczyn stałych

$$C_s = \xi_s \cdot C \quad (2.21)$$

W przypadku "amplidyny idealnej" będzie - zgodnie z założeniami punktu 2.1 - $\xi_s = 1$ i $C_s = C$.

Zależność (2.20) występuje jako człon składowy w większości dalej wyprowadzonych funkcji i wywiera decydujący wpływ na ich przebiegi.

2.3. Zmiany współczynników wzmacnienia

Podstawowym warunkiem uzyskania prawidłowych zależności względnych jest wyprowadzenie odpowiednich wzorów dla amplidyny z uzwojeniem poprzecznym oraz amplidyny ze szczotkami zwartymi przy założeniu stałości pewnych wybranych, w obu wypadkach tych samych parametrów.

W szczególności analiza porównawcza może się odbywać:

- przy stałym prądzie sterującym ($I = I'_s$),
- przy stałej wartości SEM podłużnej ($E_d = E'_d$),
- przy stałej indukcji obwodu magnetycznego w osi poprzecznej ($B_q = B'_q$).

Dla każdego z wymienionych przykładowo niezmiennych parametrów uzyskamy rozmaite funkcje $f(k)$ np. dla prądu i gęstości w obwodzie poprzecznym, dla SEM poprzecznej i podłużnej bądź też dla mocy wejściowej lub wyjściowej, natomiast zmiany wypadkowych lub częściowych współczynników wzmacnienia nie zależą (jako funkcje k) od wartości SEM, strumieni i prądów przy których porównujemy amplidynę z uzwojeniem poprzecznym z amplidyną ze szczotkami zwartymi.

Obojętne jest zatem, czy do obliczania stosunków współczynników wzmacnienia (wzory 2.2) posłużymy się przypadkiem a, b czy też c.

W dalszych rozważaniach będziemy dla celów porównawczych przyjmować $I_s = I'_s = \text{const}$.

Pierwszy stopień wzmacnienia. Zgodnie z oznaczeniami kierunków przepływów w osi podłużnej pokazanymi na rys.3 możemy (w założeniu idealnej kompensacji $\Phi_k = \Phi_{dtw}$) wypisać następujące równania dla SEM poprzecznych:

- w amplidynie ze szczotkami zwartymi

$$E_q = \frac{m_1}{z_s} (z_s \cdot I_s - \theta_{zk} - \theta_{Fe}) = m_1 (I_s - m_q \cdot I_q) \quad (2.22)$$

- w amplitudynie z uzwojeniem poprzecznym magnesującym zgodnie z uzwojeniem twornika

$$E'_q = \frac{m_1}{z_s} (z_s I_s - \theta'_{zk} - \theta'_{Fe}) = m_1 \left[I_s - (m_{zk} + \frac{m_{Fe}}{1-k}) I'_q \right] \quad (2.23)$$

- w amplitudynie z uzwojeniem poprzecznym magnesującym przeciwnie do uzwojenia twornika

$$E'_q = m_1 \left[I_s - (m_{zk} + \frac{1-2k}{1-k} m_{Fe}) \cdot I'_q \right] \quad (2.24)$$

Porównując amplitudynę bez i z uzwojeniem poprzecznym przy $I_s = \text{const.}$ (a więc i $U_s = \text{const.}$) otrzymujemy przez podzielenie stronami równania (2.23) i (2.24) przez (2.22) odpowiednie stosunki wzmożeń napięciowych $K'_{u1}/K_{u1} = E'_q/E_q$.

Eliminując następnie z otrzymanych wyrażeń prąd poprzeczny $I_q = E_q/(R_{tw} + R_{sz})$ oraz $I'_q = E'_q/(R_{tw} + R_q + R_{sz})$ otrzymujemy po przekształceniach następujące funkcje parametru k dla stosunków wzmożeń pierwszego stopnia w amplitudynie z uzwojeniem poprzecznym magnesującym zgodnie:

- dla wzmożenia napięciowego

$$\frac{K'_{u1}}{K_{u1}} = \frac{C_{mq} \left[1 + C_s \left(\frac{k}{1-k} \right)^2 \right]}{C_{zk} + C_{Fe} \frac{1}{1-k} + C_s \left(\frac{k}{1-k} \right)^2} \quad (2.25)$$

- dla wzmożenia prądowego ($K'_{i1}/K_{i1} = I'_q/I_q$)

$$\frac{K'_{i1}}{K_{i1}} = \frac{C_{mq}}{C_{zk} + C_{Fe} \frac{1}{1-k} + C_s \left(\frac{k}{1-k} \right)^2} \quad (2.26)$$

- dla wzmocnienia mocy

$$\frac{K'_{w1}}{K_{w1}} = \frac{K'_{u1}}{K_{u1}} \cdot \frac{K'_{i1}}{K_{i1}} = \frac{C_{mq}^2 \left[1 + C_s \left(\frac{k}{1-k} \right)^2 \right]}{\left[C_{zk} + C_{Fe} \frac{1}{1-k} + C_s \left(\frac{k}{1-k} \right)^2 \right]^2} \quad (2.27)$$

Analogiczne zależności w przypadku uzwojenia poprzecznego załączonego przeciwnie przybierają postać:

$$\frac{K'_{u1}}{K_{u1}} = \frac{C_{mq} \left[1 + C_s \left(\frac{k}{1-k} \right)^2 \right]}{C_{zk} + C_{Fe} \frac{1-2k}{1-k} + C_s \left(\frac{k}{1-k} \right)^2} \quad (2.28)$$

$$\frac{K'_{i1}}{K_{i1}} = \frac{C_{mq}}{C_{zk} + C_{Fe} \frac{1-2k}{1-k} + C_s \left(\frac{k}{1-k} \right)^2} \quad (2.29)$$

$$\frac{K'_{w1}}{K_{w1}} = \frac{C_{mq}^2 \left[1 + C_s \left(\frac{k}{1-k} \right)^2 \right]}{\left[C_{zk} + C_{Fe} \frac{1-2k}{1-k} + C_s \left(\frac{k}{1-k} \right)^2 \right]^2} \quad (2.30)$$

Nowe oznaczenia we wzorach (2.22) do (2.28):

$m_1 = \frac{E}{I_s}$ - nachylenie charakterystyki magnesowania na pierwszym stopniu wzmocnienia,

$m_q = m_{zk} + m_{Fe}$ - wypadkowy współczynnik redukcyjny (patrz wzory 2.4 do 2.9),

C_{zk}, C_{Fe}, C_{mq} - stałe, które obliczamy według następujących zależności:

$$C_{zk} = 1 + \frac{m_1 \cdot \xi_s \cdot m_{zk}}{R_{tw}} = 1 + m_{zk} \cdot K_{i1} \quad (2.31)$$

$$C_{Fe} = \frac{m_1 \cdot \xi_s \cdot m_{Fe}}{R_{tw}} = m_{Fe} \cdot K_{i1} \quad (2.32)$$

$$C_{mq} = C_{zk} + C_{Fe} \quad (2.33)$$

Ze wzorów (2.31) do (2.33) wynika, że stałe C_{zk} , C_{Fe} i C_{mq} można wyznaczyć pomiarowo lub obliczeniowo w amplidyne bez uzwojenia poprzecznego i następnie wykorzystać przy dobieraniu liczby zwojów tego uzwojenia [9].

Podstawiając we wzorach (2.26) do (2.30) wartości $\xi_s = 1$, $C_s = C$, $m_{zk} = 0$, $m_{Fe} = 0$, $m_q = 0$, $C_{zk} = 1$, $C_{Fe} = 0$, $C_{mq} = 1$ otrzymujemy analogiczne zależności, słuszne dla "amplidyny idealnej".

Drugi stopień wzmocnienia. Ponieważ oddziaływania θ_{zk} i θ_{Fe} wpływają tylko na wielkość strumienia podłużnego, więc wzory na stosunkowe współczynniki wzmocnienia na drugim stopniu nie zależą od wewnętrznych sprzężeń zwrotnych i pozostają takie same dla amplidyny "rzeczywistej" i amplidyny "idealnej" (pod warunkiem zastąpienia w nich stałej C_s przez stałą C).

Otrzymujemy tu następujące zależności w funkcji parametru k :

- dla amplidyny z uzwojeniem poprzecznym zgodnym:

$$\frac{K'_{u2}}{K_{u2}} = \frac{1}{(1-k) \left[1 + C_s \left(\frac{k}{1-k} \right)^2 \right]} \quad (2.34)$$

$$\frac{K'_{i2}}{K_{i2}} = \frac{1}{1-k} \quad (2.35)$$

$$\frac{K'_{w2}}{K_{w2}} = \frac{1}{(1-k)^2 \left[1 + C_s \left(\frac{k}{1-k} \right)^2 \right]} \quad (2.36)$$

- dla amplidyny z uzwojeniem poprzecznym magnesującym przeciwnie:

$$\frac{K'_{u2}}{K_{u2}} = \frac{1-2k}{1-k} \cdot \frac{1}{1 + C_s \left(\frac{k}{1-k}\right)^2} \quad (2.37)$$

$$\frac{K'_{12}}{K_{12}} = \frac{1-2k}{1-k} \quad (2.38)$$

$$\frac{K'_{w2}}{K_{w2}} = \frac{(1-2k)^2}{(1-k)^2} \frac{1}{1 + C_s \left(\frac{k}{1-k}\right)^2} \quad (2.39)$$

Wypadkowe współczynniki wzmocnienia. Wymnażając stronami odpowiednie zależności dla pierwszego i drugiego stopnia otrzymujemy wzory na wypadkowe współczynniki wzmocnienia, a mianowicie

- dla amplidyny z uzwojeniem poprzecznym magnesującym zgodnie

$$\frac{K'_w}{K_w} = \left(\frac{K'_u}{K_u}\right)^2 = \left(\frac{K'_i}{K_i}\right)^2 = \frac{C_{mq}^2}{(1-k)^2 \left[C_{zk} + C_{Fe} \frac{1}{1-k} + C_s \left(\frac{k}{1-k}\right)^2 \right]^2} \quad (2.40)$$

- dla amplidyny z uzwojeniem poprzecznym magnesującym przeciwnie:

$$\frac{K'_w}{K_w} = \left(\frac{K'_u}{K_u}\right)^2 = \left(\frac{K'_i}{K_i}\right)^2 = \frac{(1-2k)^2}{(1-k)^2} \frac{C_{mq}^2}{\left[C_{zk} + C_{Fe} \frac{1-2k}{1-k} + C_s \left(\frac{k}{1-k}\right)^2 \right]^2} \quad (2.41)$$

Analogiczne zależności dla amplitudyny idealnej przybierają dużo prostszą postać. Dla maszyny z uzwojeniem poprzecznym zgodnym otrzymujemy z wzoru 2.40:

$$\frac{K'_w}{K_w} = \left(\frac{K'_u}{K_u}\right)^2 = \left(\frac{K'_1}{K_1}\right)^2 = \frac{1}{(1-k)^2 \left[1 + c\left(\frac{k}{1-k}\right)^2\right]^2} \quad (2.42)$$

Dla maszyny z uzwojeniem poprzecznym magnesującym przeciwnie (z wzoru 2.41):

$$\frac{K'_w}{K_w} = \left(\frac{K'_u}{K_u}\right)^2 = \left(\frac{K'_1}{K_1}\right)^2 = \left(\frac{1-2k}{1-k}\right)^2 \cdot \frac{1}{\left[1 + c\left(\frac{k}{1-k}\right)^2\right]^2} \quad (2.43)$$

Analiza wzorów funkcyjnych. Dzięki ogólnej zależności

$$\frac{K'_u}{K_u} = \frac{K'_1}{K_1} = \sqrt{\frac{K'_w}{K_w}}$$

wystarczy przeanalizować przebieg wzmocnienia mocy K'_w/K_w w funkcji parametru k . Badając pierwszą i drugą pochodną przebiegów (2.40) i (2.41) znajdujemy wszystkie wartości parametru k , przy których odpowiednie funkcje osiągają swe maksima.

W przypadku amplitudyny z uzwojeniem poprzecznym zgodnym maksimum funkcji K'_w/K_w jest większe od jedności, a więc może służyć jako kryterium doboru liczby zwojów uzwojenia poprzecznego. Odpowiednią wartość parametru k oznaczamy indeksem k_m .

Ponieważ - z uwagi na korzyści omówione w p.1 - wskazany jest wybór możliwie największej liczby zwojów z_q , celowe jest również obliczenie takiej wartości $k > k_m$ przy której amplitudyna z uzwojeniem poprzecznym ma wzmocnienie takie samo, jak amplitudyna ze szczotkami zwartymi. Dla tej wartości k rezerwujemy dalej określenie "wartość krytyczna" i oznaczamy symbolem k_{kr} .

Dla wartości k większych od krytycznej wzmocnienie amplidyny z uzwojeniem poprzecznym jest mniejsze od wzmocnienia amplidyny ze szczotkami zwartymi ($K'_w/K_w < 1$).

W przypadku uzwojenia poprzecznego magnesującego przeciwnie maksimum wzmocnienia występuje w zakresie $0,5 < k < 1$, a więc wtedy, gdy przepływ uzwojenia poprzecznego jest większy od przepływu twornika. Wypadkowe pole poprzeczne ma tu zwrot przeciwny, niż w normalnej maszynie. Odpowiednią wartość k oznaczymy przez k_{mi} .

Amplidynę tego rodzaju będziemy dalej nazywać amplidyną z "odwróconym polem poprzecznym" lub z "ujemnym polem poprzecznym".

W tabelicy 2.1 zestawiono wzory, umożliwiające obliczenie wartości charakterystycznych k_m , k_{kr} , k_{mi} oraz odpowiadających im wartości względnego wzmocnienia mocy w "amplidynie rzeczywistej".

Tablica 2.1

Charakterystyczne wartości parametru k i względnego wzmocnienia mocy K'_w/K_w w "amplidynie rzeczywistej"

| Wartość k | Wartość wzmocnienia K'_w/K_w |
|---|---|
| $k_m = 1 - \sqrt{\frac{C_s}{C_{zk} + C_s}}$ | $\left(\frac{K'_w}{K_w}\right)_{\max} = \frac{C_{mg}^2}{4C_s \left(\sqrt{C_{zk} + C_s} - \sqrt{C_s + \frac{C_{Fe}}{2\sqrt{C_s}}} \right)^2}$ |
| $k_{kr} = \frac{C_{zk}}{C_{zk} + C_s}$ | $\frac{K'_w}{K_w} = 1$ |
| $k_{mi} = \frac{\sqrt{C_s} + \sqrt{C_s + C_{zk}}}{2\sqrt{C_s} + \sqrt{C_s + C_{zk}}}$ | $\left(\frac{K'_w}{K_w}\right)_{\max u} = \frac{C_{mg}^2}{4C_s \left(\sqrt{C_{zk} + C_s} + \sqrt{C_s} - \frac{C_{Fe}}{2\sqrt{C_s}} \right)^2}$ |

Wykonując objaśnione poprzednio podstawienia $C_{zk} = 1$, $C_{Fe} = 0$, $C_{mg} = 1$, $C_s = C$ otrzymamy analogiczne wzory dla "amplidyń idealnej" zestawione w tabelicy 2.2.

Tabela 2.2

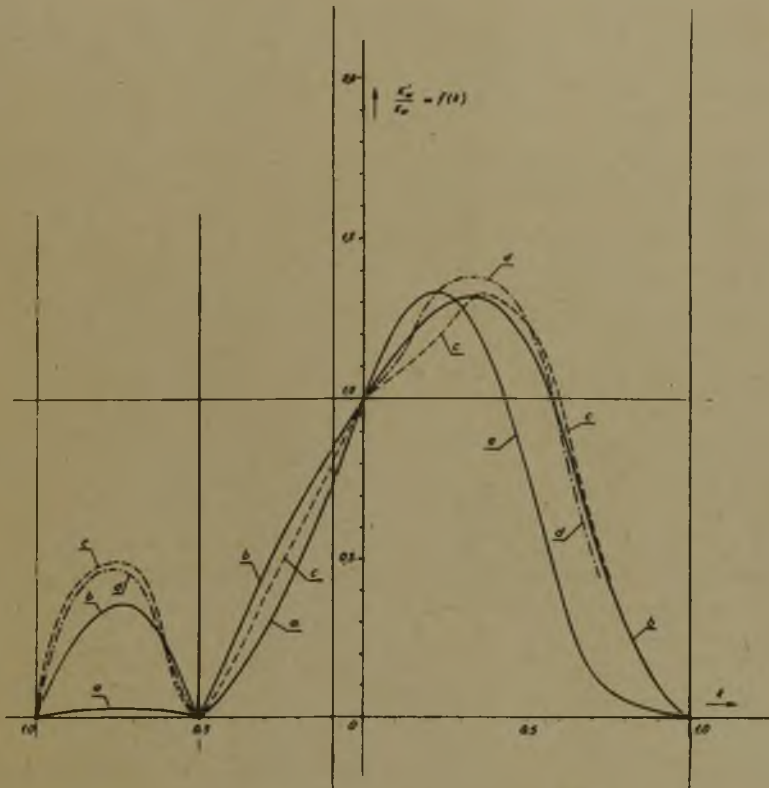
Charakterystyczne wartości parametru k oraz względnego wzmocnienia mocy K'_w/K_w w "amplidyń idealnej"

| Wartość k | Wartość wzmocnienia K'_w/K_w |
|--|--|
| $k_m = 1 - \sqrt{\frac{C}{1+C}}$ | $\left(\frac{K'_w}{K_w}\right)_{\max} = \frac{1}{4C(\sqrt{1+C} - \sqrt{C})^2}$ |
| $k_{kr} = \frac{1}{1+C}$ | $\left(\frac{K'_w}{K_w}\right) = 1$ |
| $k_{\mu} = \frac{\sqrt{C} + \sqrt{1+C}}{2\sqrt{C} + \sqrt{1+C}}$ | $\left(\frac{K'_w}{K_w}\right)_{\max} = \frac{1}{4C(\sqrt{1+C} + \sqrt{C})^2}$ |

Przykłady obliczonych przebiegów względnego wzmocnienia $K'_w/K_w = f(k)$ dla dwóch amplidyń doświadczalnych o różnych stosunkach objętości V_q/V_{tw} uwidoczniono na rysunkach 4 i 5 (krzywe a i b).

Na rysunkach tych naniesiono również dla celów porównawczych przebiegi uzyskane drogą pomiarów na maszynach dla których wykonano obliczenia. Parametry maszyn niezbędne do wykonania obliczeń podane są w podpisach pod rysunkami. Uzwojenie poprzeczne w stojanach maszyn doświadczalnych składało się z 16 cewek po 36 zwojów (na każdej połowie bieguna po 4 cewki). Odpowiednie łączenie cewek umożliwiło uzyskanie (przy $V_q = \text{const.}$) pięciu różnych wartości liczby zwojów z_q (na parę biegunów), a mianowicie:

$$z_q = 18 - 36 - 72 - 144 - 288.$$

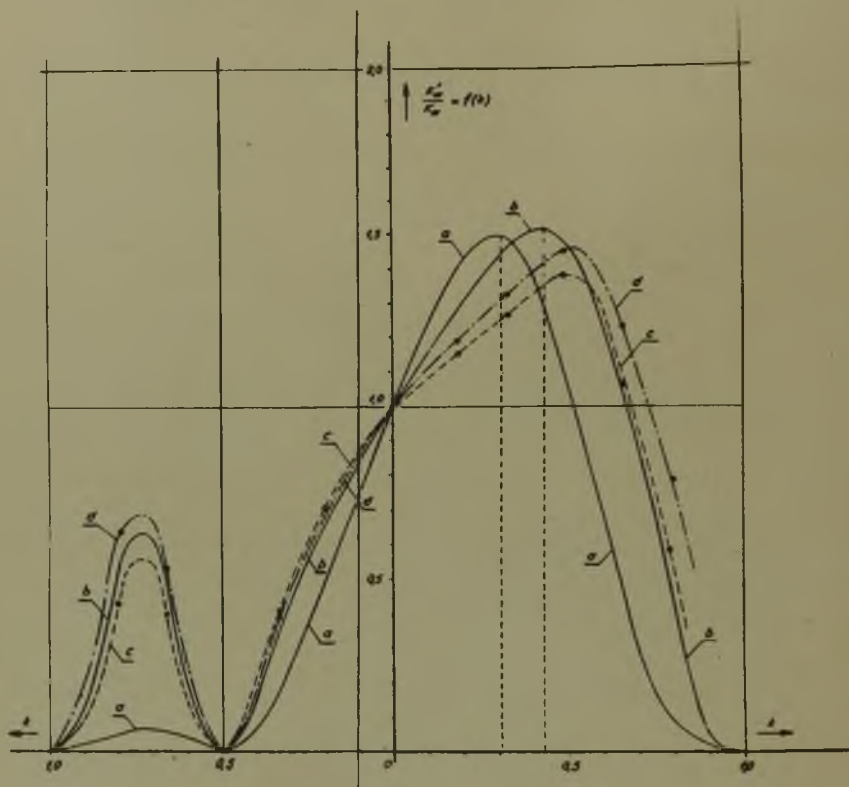


Rys.4. Porównanie przebiegu wzmocnienia $\frac{K'_w}{K_w} = f(k)$ w amplitdynie "idealnej" i "rzeczywistej"

Obliczenia i pomiary wykonane dla twornika o danych: $N = 990$,
 $V_{tw} = 682 \text{ cm}^3$, $V_g = 239 \text{ cm}^3$, $C = 1,54$; $C_j = 2,09$; $\beta_B = 0,734$;
 $C_s = 1,13$; $m_1 = 345 \text{ V/A}$; $m_{Fe} = 0,50 \cdot 10^{-2}$; $m_{zk} = 0,26 \cdot 10^{-2}$
 $C_{Fe} = 1,15$; $C_{zk} = 1,60$; $C_{mq} = 2,75$

a - krzywa obliczona dla amplitdyny "idealnej", b - krzywa obliczona dla amplitdyny "rzeczywistej", c - przebieg według pomiaru 1, d - przebieg według pomiaru 2

Pomiar 1 i 2: wartości średnie z pomiarów dla dwóch kierunków wirowania i jednego kierunku magnesowania: 1 - magnesowanie (+), 2 - magnesowanie (-)



Rys.5. Porównanie przebiegu wzmacnienia $\frac{K'_w}{K_w} = f(k)$ w amplidy-
nie "idealnej" i rzeczywistej

Obliczenia i pomiary dla twornika o danych: $N = 594$, $V_{TW} = 410 \text{ cm}^3$, $V_q = 239 \text{ cm}^3$, $C = 0,925$; $C_1 = 1,26$; $\epsilon_{TS} = 0,62$; $C_s = 9,574$, $m_1 = 215 \text{ V/A}$; $m_{Fe} = 0,37 \cdot 10^{-2}$; $m_{zk} = 0,085 \cdot 10^{-2}$
 $C_{Fe} = 0,75$; $C_{zk} = 1,17$; $\sigma_{mq} = 1,92$

a - krzywa obliczona dla amplidydy "idealnej", b - krzywa obliczona dla amplidydy "rzeczywistej", c - przebieg wg pomiaru: wartości średnie z pomiarów dla dwóch kierunków wirowania i dwóch kierunków magnesowania, d - przebieg wg pomiaru: wartości średnie z pomiaru dla jednego kierunku magnesowania i dwóch kierunków wirowania

Dla tych wartości z_q wykonano pomiary względnych wzmocnień mocy K'_w/K_w .

W celu eliminacji błędów wywołanych różnymi zjawiskami ubocznymi w pomiarach zastosowano metodykę, opisaną szczegółowo w przytoczonej literaturze [9, 15].

3. Gęstość prądowa i warunki nagrzewania się uzwojenia poprzecznego

Rozważania niniejsze mają na celu sprawdzenie, czy przy powiększaniu liczby zwojów uzwojenia poprzecznego z_q , nie będzie nadmiernie wzrastać gęstość prądowa j'_q w tym uzwojeniu.

Określimy tym samym termicznie dopuszczalny przedział zmienności parametru k .

Zmianę gęstości j'_q będziemy ujmować również porównawczo, przyjmując jako wielkość odniesienia gęstość poprzeczną twornika w amplitudynie bez uzwojenia poprzecznego j_{twq} . Gęstość ta jako niezależna od parametru k jest w naszych rozważaniach wielkością stałą i wyraża się wzorem

$$j_{twq} = \frac{I_q}{2aS_{tw}} \quad (3.1)$$

Po włączeniu uzwojenia poprzecznego prąd poprzeczny przybierze wartość I'_q a gęstość j'_q będzie równa $j'_q = I'_q/S_q$.

Biorąc pod uwagę zależności $V_{tw} = 0,5 N l_{tw} \cdot S_{tw}$ oraz $V_q = p z_q \cdot l_q \cdot S_q$ otrzymujemy ogólny wzór wyjściowy dla funkcji zmian gęstości

$$\frac{j'_q}{j_{twq}} = C_j \frac{I'_q}{I_q} \frac{k}{1-k} \quad (3.2)$$

przy czym stałą C_j obliczamy z zależności

$$C_j = 0,5 \frac{V_{tw}}{V_q} \cdot \frac{l_q}{l_{tw}} \quad (3.3)$$

Zmiana prądu poprzecznego I'_q/I_q zależy od warunków, przy których porównujemy amplitudę z uzwojeniem i bez uzwojenia poprzecznego.

Wynikają stąd różne funkcje dla zmian gęstości, a mianowicie:

- dla amplitudyny z uzwojeniem poprzecznym zgodnym:

przy $I_s = \text{const.}$

$$\frac{j'_q}{j_{twq}} = \frac{C_j C_{mq} \cdot k}{(1 - k) \left[C_{zk} + C_{Fe} \frac{1}{1-k} + C_s \left(\frac{k}{1-k} \right)^2 \right]} \quad (3.4)$$

przy $B_q = \text{const.}$

$$\frac{j'_q}{j_{twq}} = C_j \frac{(1 + \alpha_r) \cdot k}{1 + (1 - k)\alpha_r} \quad (3.5)$$

przy $E_d = \text{const.}$ $\frac{j'_q}{j_{twq}} = C_j \cdot k \quad (3.6)$

- dla amplitudyny z uzwojeniem poprzecznym magnesującym przeciwnie:

przy $I_s = \text{const.}$

$$\frac{j'_q}{j_{twq}} = \frac{C_j C_{mq} \cdot k}{(1 - k) \left[C_{zk} + C_{Fe} \frac{1 - 2k}{1 - k} + C_s \left(\frac{k}{1 - k} \right)^2 \right]} \quad (3.7)$$

przy $B_q = \text{const.}$

$$\frac{j'_q}{j_{twq}} = C_j \cdot \frac{(1 + \alpha_r) \cdot k}{(1 - 2k) + (1 - k)\alpha_r} \quad (3.8)$$

przy $E_d = \text{const.}$

$$\frac{j'_q}{j_{twq}} = C_j \frac{k}{1-2k} \quad (3.9)$$

Ostatni warunek jest tu równoznaczny z warunkiem $B'_{qsr} = -B_{qsr} = \text{const.}$, w związku z czym funkcja (3.9) ma punkt nieciągłości dla $k = 0,5$ (wynika to stąd, że przy $k = 0,5$ jest $\Phi'_q = 0$, a więc i $B'_{qsr} = 0$ dla każdej skończonej wartości prądu I'_q).

Ogólna analiza wzorów (3.4) do (3.9), uwzględniająca również uzmiennienie stosunku V_q/V_{tw} przekracza ramy niniejszego artykułu [4]. Ograniczymy się tu do oszacowania termicznie dopuszczalnego przedziału parametru k przy uzwojeniu poprzecznym zgodnym. Analizę przeprowadzimy przy tym na liczbach szczególnych dla przeciętnych warunków konstrukcyjnych amplidyn o średnich mocach (2÷10 kW).

Jeżeli założymy, że w amplidynie bez uzwojenia poprzecznego $I_q \approx 0,3 I_d \approx 0,3 I_{tw}$, a gęstość skuteczna twornika

$$j_{tw} \sim 4 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}, \text{ to dla gęstości poprzecznej wypada wartość}$$

$$j_{twq} = 1,3 \text{ A/mm}^2.$$

Przyjmijmy wartość gęstości $j'_q \text{ dop} = 2,6 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$ jako dopuszczalną dla uzwojeń stojana.

Przy takich założeniach dopuszczalna termicznie zmiana gęstości wyniesie $(j'_q/j_{twq}) \text{ dop} = 2$.

Dla celów szacunkowych będziemy rozpatrywać amplidynę przy niezmiennym wykorzystaniu obwodu magnetycznego ($B_q = \text{const.}$), przy czym weźmiemy pod uwagę funkcję gęstości rosnącą nieco szybciej niż funkcja (3.5), a za to dużo prostszą (przypadek bardziej niekorzystny):

$$j'_q/j_{twq} = C_j (1 + \alpha_T) \cdot k \quad (3.10)$$

Przyjmując w przybliżeniu $\alpha_T = 0,56$ otrzymujemy wzór na dopuszczalną wartość k

$$k_{\text{dop}} = 1,28/C_j \quad (3.11)$$

Posługując się wzorami dla "amplidyny idealnej" (tabl. 2.2) sporządzamy poniższe zestawienie wartości k_m , k_{kr} i k_{dop} przy konkretnych stosunkach V_q/V_{tw} wziętych z amplidyn doświadczalnych:

$$a) V_q/V_{tw} = 0,140; \quad k_m = 0,115; \quad k_{kr} = 0,214; \\ k_{dop} = 0,251$$

$$b) V_q/V_{tw} = 0,186; \quad k_m = 0,140; \quad k_{kr} = 0,262; \\ k_{dop} = 0,329$$

$$c) V_q/V_{tw} = 0,310; \quad k_m = 0,220; \quad k_{kr} = 0,370; \\ k_{dop} = 0,550$$

Z zestawienia tego widzimy, że nawet przy stosunkowo małych objętościach uzwojenia poprzecznego jest spełniony warunek $k_{kr} < k_{dop}$, a zatem uzwojenie poprzeczne nie będzie się przegrzewać w całym przedziale k , w którym otrzymujemy przyrost wzmocnienia. Twierdzenie to zostało sprawdzone podczas pomiarów wykonanych na amplidynach doświadczalnych [4].

4. Moc wyjściowa amplidyny

Podobnie jak przy badaniu przebiegów gęstości będziemy tu porównywać amplidynę z uzwojeniem i bez uzwojenia poprzecznego przy stałym maksymalnym nasyceniu obwodu magnetycznego w osi poprzecznej.

Z punktu widzenia wykorzystania maszyny uznanie tego stanu ($B'_B = B_B$) za stan znamionowy jest najbardziej racjonalne. Moc wyjściową powiększamy tu dzięki zwiększeniu SEM podłużnej, przy czym w przybliżeniu

$$\frac{P'_{dN} E'_{dN}}{P_{dN} E_{dN}} = \frac{B'_{qsr}}{B_{qsr}} = \frac{\alpha'_B}{\alpha_B} \quad (4.1)$$

gdzie $\alpha'_B = B'_{qsr}/B_q$, $\alpha_B = B_{qsr}/B_q$ są to współczynniki rozkładu indukcji odpowiednio w amplidynie z uzwojeniem i bez uzwojenia poprzecznego (patrz rys.1 i rys.2).

Korzystając z trapezowego rozkładu pola pokazanego na rys.1 i zakładając $b_d = b_q$ otrzymujemy dla amplitudyny z uzwojeniem poprzecznym zgodnym:

$$\frac{P'_{dN}}{P_{dN}} = \frac{\alpha'_B}{\alpha_B} = \frac{1 + \alpha_\tau}{1 + (1 - k)\alpha_\tau} \quad (4.2)$$

Dla $\alpha_\tau = 0,56$ i wartości k_{kr} przytoczonych w p.3 otrzymujemy dla tych samych stosunków V_q/V_{tw} następujące wartości mocy względnej:

- a) $V_q/V_{tw} = 0,140$; $k_{kr} = 0,214$; $P'_{dN}/P_{dN} = 1,08$
 b) $V_q/V_{tw} = 0,186$; $k_{kr} = 0,262$; $P'_{dN}/P_{dN} = 1,10$
 c) $V_q/V_{tw} = 0,310$; $k_{kr} = 0,370$; $P'_{dN}/P_{dN} = 1,15$

W przypadku uzwojenia poprzecznego magnesującego przeciwnie zależność analogiczna do (4.2) ma postać

$$\frac{P'_{dN}}{P_{dN}} = \frac{\alpha'_B}{\alpha_B} = \frac{(1 - 2k)(1 + \alpha_\tau)}{(1 - 2k) + (1 - k)\alpha_\tau} \quad (4.3)$$

Zgodnie z poprzednimi wywodami dla $k = 0,5$ jest tu $B'_{qsr} = 0$, a więc także $P'_{dN} = 0$, co wynika również wprost ze wzoru (4.3). Bliższą analizę tego wyrażenia pominiemy.

5. Zmiana stałych czasowych i dobroci wzmocnienia

Stała czasowa obwodu poprzecznego T'_q . W celu uzależnienia tej stałej od parametru k wychodzimy ze znanych wzorów na indukcyjność obwodu poprzecznego [4, 5, 8, 11], słusznych dla $p = 1$ i $b_d = b_q$:

- dla amplitudyny bez uzwojenia poprzecznego

$$L_q = L_{twq} = \frac{1}{4} \left(1 + \frac{1}{3} \alpha_\tau^2\right) \left(\frac{N}{4a}\right)^2 \Lambda q \quad (5.1)$$

- dla amplitudyny z uzwojeniem poprzecznym

$$L'_q = \left[\frac{1}{4} \left(1 + \frac{1}{3} \alpha_\tau^2 \right) \left(\frac{N}{4a} \right)^2 + \frac{N}{4a} z_q + z_q^2 \right] \Lambda_q \quad (5.2)$$

przy czym $\Lambda_q = \mu_0 \frac{lb}{2\delta}$ jest przewodnością magnetyczną obwodu poprzecznego.

Wartość współczynnika $1 + \frac{1}{3} \alpha_\tau^2$ można w przybliżeniu przyjąć równą 1,1 (np. dla amplitudyny PWMa5 jest $\alpha_\tau = 0,56$).

Dzieląc stronami wyrażenia (5.1) i (5.2) oraz pamiętając że znak "-" w (5.2) odnosi się do uzwojenia poprzecznego, magnesującego przeciwnie, otrzymujemy:

- dla amplitudyny z uzwojeniem poprzecznym zgodnym:

$$\frac{L'_q}{L_q} = \frac{\frac{1}{3} \alpha_\tau^2 + \left(\frac{1}{1-k} \right)^2}{1 + \frac{1}{3} \alpha_\tau^2} \approx 0,09 + 0,91 \left(\frac{1}{1-k} \right)^2 \quad (5.3)$$

- dla amplitudyny z uzwojeniem poprzecznym magnesującym przeciwnie:

$$\frac{L'_q}{L_q} = \frac{\frac{1}{3} \alpha_\tau^2 + \left(\frac{1-2k}{1-k} \right)^2}{1 + \frac{1}{3} \alpha_\tau^2} \approx 0,09 + 0,91 \left(\frac{1-2k}{1-k} \right)^2 \quad (5.4)$$

Dla odpowiednich stosunków stałych czasowych obwodu poprzecznego $T'_q/T_q = (L'_q/L_q) \cdot (R_q/R'_q)$ przy uwzględnieniu (2.20) mamy:

- dla amplitudyny z uzwojeniem poprzecznym zgodnym:

$$\frac{T'_q}{T_q} = \frac{0,09 + 0,91 \left(\frac{1}{1-k} \right)^2}{1 + c_B \left(\frac{k}{1-k} \right)^2} \quad (5.5)$$

- dla amplitudyny z uzwojeniem poprzecznym nagnesującym przeciwnie:

$$\frac{T'_q}{T_q} = \frac{0,09 + 0,91 \left(\frac{1-2k}{1-k}\right)^2}{1 + C_s \left(\frac{k}{1-k}\right)^2} \quad (5.6)$$

Zastępcza stała czasowa i dobroć wzmacnienia

Wzór wyjściowy dla określenia zmiany wypadkowej, dobroci wzmacnienia mocy można napisać w ogólnej postaci

$$\frac{Q'_w}{Q_w} = \frac{K'_w}{K_w} \cdot \frac{T_z}{T'_z} \quad (5.7)$$

gdzie Q'_w/Q_w , K'_w/K_w , T'_z/T_z oznaczają odpowiednio stosunki dobroci wypadkowych, wzmacnień mocy oraz zastępczych stałych czasowych w amplitudynie z uzwojeniem i bez uzwojenia poprzecznego.

Stosunki K'_w/K_w obliczamy ze wzorów (2.40) lub (2.41), a w przypadku amplitudyny idealnej z analogicznych zależności (2.42) lub (2.43).

Obliczenie zastępczych stałych czasowych wymaga wyprowadzenia wzorów na funkcje przejścia amplitudyny, co można wykonać metodą uproszczoną [14], pomijając stałe czasowe strumieni rozproszenia.

Zaniedbując ponadto stałą czasową T_{qd} uzwojenia z q_d , zastępującego oddziaływanie zezwojów komitujących (rys.3 i [8, 10, 11, 14]) dochodzimy do następujących wyrażeń:

- dla amplitudyny ze szczotkami zwartymi:

$$T_z = \frac{(1+h) T_q}{1 + m_q \cdot K_{11}} \quad (5.8)$$

- dla amplitudyny z uzwojeniem poprzecznym zgodnym:

$$T'_z = \frac{T_q}{1 + (m_{zk} + \frac{m_{Fe}}{1-k}) \cdot K'_{i1}} \left(h + \frac{T'_q}{T_q} \right) \quad (5.9)$$

- dla amplitudyny z uzwojeniem poprzecznym przeciwnym:

$$T'_z = \frac{T_q}{1 + (m_{zk} + \frac{m_{Fe}}{1-2k}) \cdot K'_{i1}} \cdot \left(h + \frac{T'_q}{T_q} \right) \quad (5.10)$$

przy czym za T'_q/T_q podstawiamy: do wzoru (5.9) wartość według (5.5), a do (5.10) - według (5.6).

Nowe oznaczenia we wzorach (5.8) do (5.10): K'_{i1} , K_{i1} - współczynniki wzmocnienia prądowego w amplitudynie bez wewnętrznych sprzężeń zwrotnych, dla których zgodnie z (2.29) obowiązuje zależność (przy $C_{zk} = 1$, $C_{Fe} = 0$, $C_{mq} = 1$):

$$K'_{i1} = \frac{K_{i1}}{1 + C_s \left(\frac{k}{1-k} \right)^2} \quad (5.11)$$

h = stosunek stałych czasowych obwodów magnesujących po-dłużnie i poprzeczne w amplitudynie ze szczotkami zwartymi (parametr stały, niezależny od k).

Przy zastosowanych uproszczeniach

$$h = \frac{T_s + T_{td}}{T_q} \quad (5.12)$$

gdzie $T_s = L_s/R_s$ stała czasowa uzwojenia sterującego, a $T_{td} = L_{td}/R_{td}$ stała czasowa obwodu zastępczego z $_{td}$ (rys.3).

W przypadku normalnej amplitudyny (bez dodatkowego uzwoje-nia z $_{td}$) przyjmujemy $T_{td} \approx 0$.

Dzieląc stronami wzory 5.9 i 5.10 przez 5.8 otrzymujemy następujące przebiegi zastępczych stałych czasowych w funkcji parametru k :

- dla amplitudyny z uzwojeniem poprzecznym zgodnym:

$$\frac{T'_z}{T_z} = \frac{C_{mq} \left[1 + C_s \left(\frac{k}{1-k} \right)^2 \right]}{(1+h) \left[C_{zk} + \frac{C_{Fe}}{1-k} + C_s \left(\frac{k}{1-k} \right)^2 \right]} \left[h + \frac{0,09 + 0,91 \left(\frac{1}{1-k} \right)^2}{1 + C_s \left(\frac{k}{1-k} \right)^2} \right] \quad (5.13)$$

- dla amplitudyny z uzwojeniem poprzecznym nagnesującym przeciwnie:

$$\frac{T'_z}{T_z} = \frac{C_{mq} \left[1 + C_s \left(\frac{k}{1-k} \right)^2 \right]}{(1+h) \left[C_{zk} + C_{Fe} \frac{1-2k}{1-k} + C_s \left(\frac{k}{1-k} \right)^2 \right]} \left[h + \frac{0,09 + 0,91 \left(\frac{1-2k}{1-k} \right)^2}{1 + C_s \left(\frac{k}{1-k} \right)^2} \right] \quad (5.14)$$

Podstawiając do ogólnego wyrażenia (5.7) wartości według (2.40) i (5.13) oraz (2.41) i (5.14) dostajemy zależności dla przebiegów wypadkowej dobroci wzmacnienia, a mianowicie:

- dla amplitudyny z uzwojeniem poprzecznym zgodnym:

$$\frac{Q'_z}{Q_z} = \frac{(1+h) \cdot C_{mq}}{\left[C_{zk} + \frac{C_{Fe}}{1-k} + C_s \left(\frac{k}{1-k} \right)^2 \right] \cdot \left[(h+0,09)(1-k)^2 + h C_s \cdot k^2 + 0,91 \right]} \quad (5.15)$$

- dla amplitudyny z uzwojeniem poprzecznym magnesującym przeciwnie:

$$\frac{Q'_w}{Q_w} = \frac{(1+h) \cdot C_{mq}}{\left[C_{zk} + C_{Fe} \frac{1-2k}{1-k} + C_s \left(\frac{k}{1-k} \right)^2 \right] \left[(h+0,09) \left(\frac{1-k}{1-2k} \right)^2 + h C_s \left(\frac{k}{1-2k} \right)^2 + 0,91 \right]} \quad (5.16)$$

Zgodnie z rozumowaniem pogładowym stosunek Q'_w/Q_w wg wzoru (5.16) jest równy jedności dla $k = 0$ oraz zeru dla $k = 0,5$ (wtedy $K'_w = 0$, $T'_z > 0$).

Dla $k > 0,5$ (pole poprzeczne odwrócone) dobroć wg wzoru 5.16 pozostaje również - w założeniu realnych wartości stałych C_{zk} i C_{Fe} - dodatnia.

Zarówno funkcje zmian zastępczych stałych czasowych, jak i dobroci wzmocnienia są stosunkowo skomplikowane i z braku miejsca pominiemy ich szczegółową analizę [4], podając tylko jej wyniki. Duży wpływ na przebiegi $T'_z/T_z = f(k)$ oraz $Q'_w/Q_w = f(k)$ mają wewnętrzne sprzężenia zwrotne oraz stosunek stałych czasowych h (wzór 5.12). W przypadku $h = 0$ oraz przy pominięciu wewnętrznych sprzężeń jest $T'_z/T_z = T'_q/T_q$, natomiast przy $h \neq 0$ i przy istnieniu sprzężeń otrzymujemy zupełnie odmienne krzywe.

Rozbieżność między obu przebiegami ilustruje przykładowo rys.6 (przeliczenia dla jednej z omówionych poprzednio amplitud doświadczalnych).

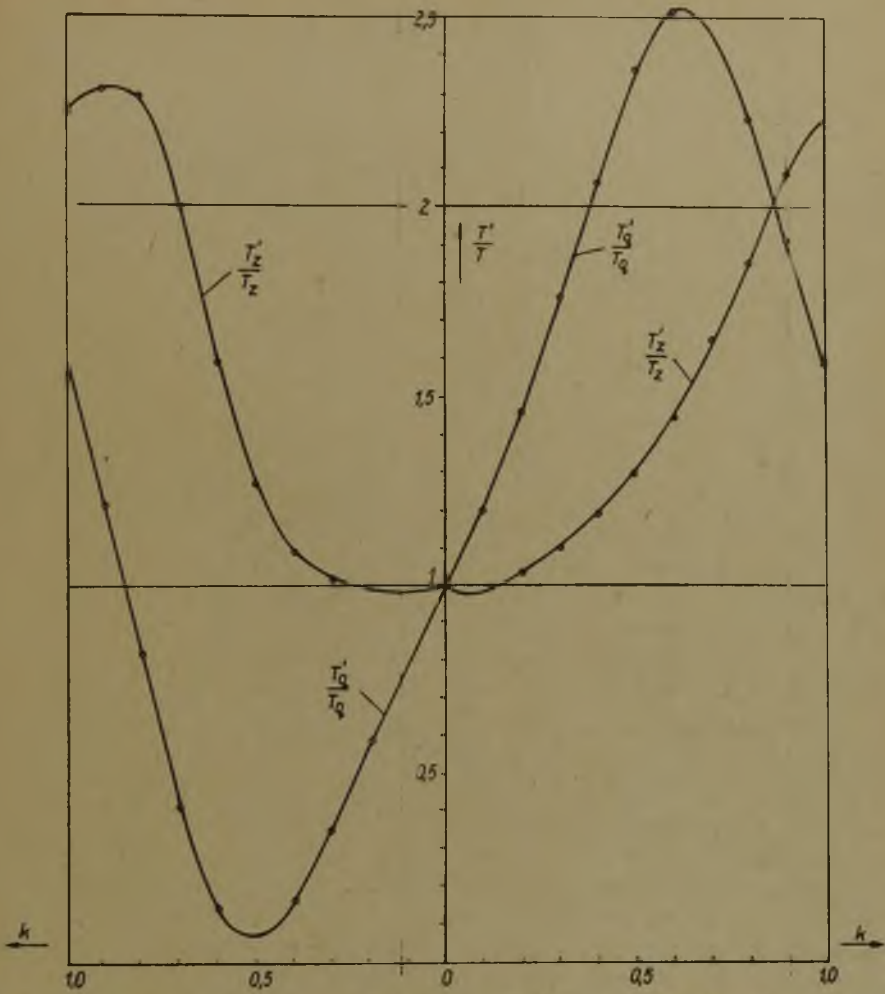
Analogiczne przebiegi dobroci wzmocnienia (dla $h = 2,5$ i $h = 0$) pokazano na rys.7, na którym uwidoczniono również przebiegi doświadczalne (przy $h \approx 2,5$). Z rys.7 wynika, że przy większych wartościach stosunku h można uzyskać poprawę dobroci wzmocnienia poprzez włączenie uzwojenia poprzecznego zgodnego, natomiast uzwojenie poprzeczne magnesujące przeciwnie powoduje znaczny spadek dobroci.

Przy małych wartościach stosunku h (np. w amplitudynie z dużym oporem włączonym w obwód uzwojenia sterującego) efekt włączenia uzwojenia poprzecznego jest odwrotny, tzn. uzwojenie zgodne wywołuje zmniejszenie współczynnika dobroci, natomiast przy słabym uzwojeniu przeciwnym można osiągnąć pewną nieznaczną poprawę dobroci.

W amplitudynie z "polem ujemnym" ($0,5 < k < 1$) współczynnik dobroci jest w obu wypadkach mniejszy, niż w amplitudynie z polem dodatnim.

6. Wnioski i zastosowania praktyczne

Optymalna liczba zwojów uzwojenia poprzecznego magnesującego zgodnie. Niezależnie od wartości stosunku objętości uzwojenia poprzecznego i uzwojenia twornika V/V_{tw} istnieje zawsze określona liczba zwojów uzwojenia poprzecznego (z_{qm}), a więc i odpowiadająca jej wartość parametru k_m ,



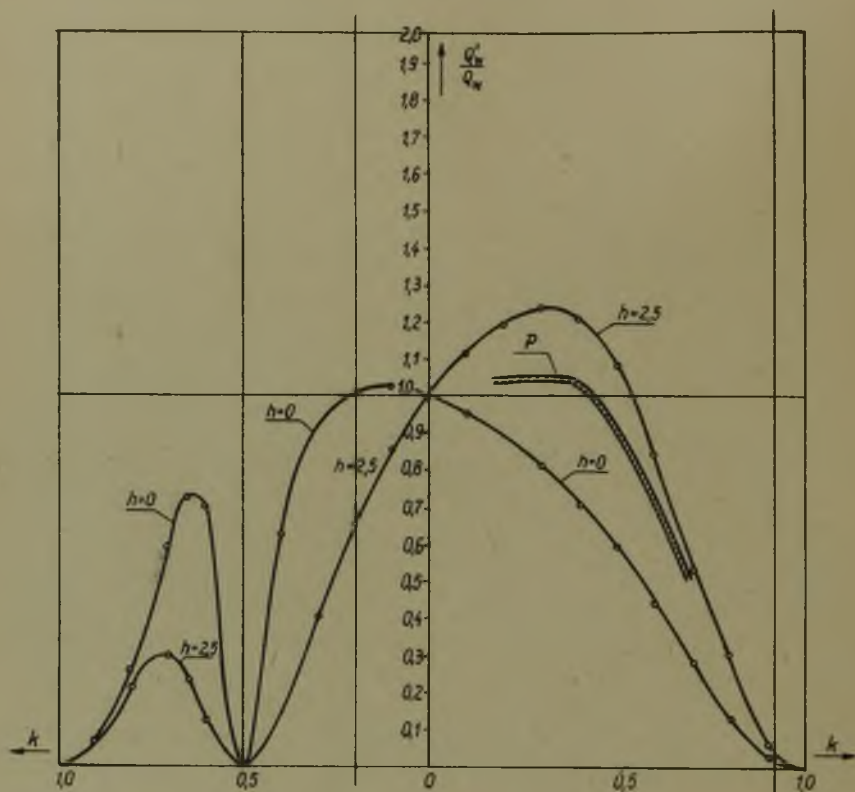
Rys.6. Przebieg zmian stałych czasowych w funkcji parametru "k" w amplitdynie "rzeczywistej"

1) $\frac{T'_q}{T_q} = f(k)$ - wypadkowa stała czasowa obwodu poprzecznego

2) $\frac{T'_z}{T_z} = f(k)$ - zastępcza stała czasowa obliczona przy

$$h = \frac{T_s + T_{zd}}{T_q} = 2,5$$

Dane twornika: $N = 594$, $V_{tw} = 410 \text{ cm}^3$, $V_q = 239 \text{ cm}^3$, $C = 0,925$, $C_s = 1,26$, $\xi_s = 0,62$, $C = 0,574$, $m_1 = 215 \text{ V/A}$, $m_{Fe} = 0,37 \cdot 10^{-2}$, $m_{zk} = 0,085 \cdot 10^{-2}$, $C_{Fe} = 0,75$, $C_{zk} = 1,17$, $C_{..} = 1,92$, $\alpha_r = 0,56$



Rys.7. Przebieg zmiany dobroci wzmacnienia mocy w amplitudynie "rzeczywistej" $\frac{Q'}{Q_w} = f(k)$

Dane twornika: $N = 594$, $V_{tw} = 410 \text{ cm}^3$, $V_q = 239 \text{ cm}^3$, $C = 0,925$, $C_j = 1,26$, $\xi_s = 0,62$, $C = 0,574$, $m_1 = 215 \text{ V/A}$,
 $m_{Fe} = 0,37 \cdot 10^{-2}$, $m_{zk} = 0,085 \cdot 10^{-2}$, $C_{Fe} = 0,75$, $C_{zk} = 1,17$,
 $C_{mq} = 1,92$, $h = \frac{T_s + T_{td}}{T_q} = 2,5$, $\alpha_t = 0,56$

Porównano przebiegi obliczone dla $h = 2,5$ oraz $h \approx 0$ (w obwodzie sterującym duży opór).

P - wyniki pomiaru dla $h \approx 2,5$

przy której w wyniku włączenia uzwojenia poprzecznego następuje maksymalny wzrost wzmocnienia amplidyny. Liczba ta (z_{qm} lub k) oraz odpowiadające jej maksimum zmiany wzmocnienia mocy (K'_w/K_w)_{max} są tym większe im większy jest stosunek V_q/V_{tw} (patrz wzory w tablicach 2.1 i 2.2). Liczbę z_{qm} można by zatem zdefiniować jako optymalną liczbę zwojów uzwojenia poprzecznego z uwagi na wzmocnienie statyczne.

Z teoretycznego punktu widzenia wzór na k_m podany w tablicy 2.1 można by wykorzystać do zaprojektowania optymalnego uzwojenia poprzecznego.

W praktyce - ze względu na kryteria wynikające z niezawodności ruchu i precyzji sterowania amplidyny - wskazane jest wybierać możliwie duże wartości parametru k , jednak nie większe od wartości krytycznej. Wynika stąd zalecany przedział parametru k :

$$1 - \sqrt{\frac{C_s}{C_{zk} + C_s}} \leq k \leq \frac{C_{zk}}{C_{zk} + C_s} \quad (6.1)$$

W powyższym przedziale - dla dowolnej wartości V_q/V_{tw} - amplidyna z uzwojeniem poprzecznym ma wzmocnienie mocy nie mniejsze niż amplidyna ze szczotkami zwartymi.

Analogiczne twierdzenie jest słuszne odnośnie dobroci wzmocnienia, jednak w założeniu istnienia wewnętrznych ujemnych sprzężeń, zwrotnych i dostatecznie dużej wartości stosunku stałych czasowych h (wzór 5.12).

Jest to zarazem przedział wartości k dopuszczalnych z punktu widzenia nagrzewania się uzwojenia poprzecznego pod warunkiem, że stosunek V_q/V_{tw} nie będzie bardzo mały ($V_q/V_{tw} \geq 0,1 \div 0,2$).

Należy zwrócić uwagę na bardzo małe rozbieżności między krzywymi obliczonymi dla amplidyny "rzeczywistej" i amplidyny "idealnej" (rys.4 i 5). W związku z tym zalecany przedział wyboru parametru "k" można z dostatecznym przybliżeniem określić dużo prostszymi wzorami (tablica 2.2), nie wymagającymi znajomości wewnętrznych sprzężeń zwrotnych:

$$1 - \sqrt{\frac{C}{1+C}} \leq k \leq \frac{1}{1+C} \quad (6.2)$$

Po przyjęciu parametru k obliczamy liczbę zwojów z_q (wzór 2.6) i kontrolujemy uzyskaną zmianę wzmocnienia mocy (2.40 lub 2.42), dobroci wzmocnienia (5.15), gęstości prądowej (3.5) i mocy wyjściowej (4.2).

Należy podkreślić, że podstawą do sformułowania ilościowego kryterium wyboru parametru k , a więc i liczby zwojów z_q jest przechodzenie przez maksimum krzywej wzmocnienia statycznego.

W związku z tym należy uznać za błędne obliczanie optymalnej liczby zwojów uzwojenia poprzecznego zgodnego w oparciu o minimum stałej czasowej obwodu poprzecznego [7].

Stała ta wzrasta i osiąga maksimum w pobliżu wartości k_{kr} (rys.6). Równoczesny wzrost wzmocnienia i stałej czasowej T_q w przedziale $0 < k < k_{kr}$ jest przyczyną stosunkowo słabego wpływu uzwojenia poprzecznego na dobroć wzmocnienia.

Silne załamanie krzywej dobroci obserwujemy dla $k > k_{kr}$. Wewnętrzne sprzężenia zwrotne i duża wartość stosunku h wpływają przy tym korzystnie na przebieg dobroci.

Właściwości amplidyny z uzwojeniem poprzecznym magnesującym przeciwnie. Dla zakresu $0 < k < 0,5$ wypadkowe pole poprzeczne ma zwrot taki sam, jak w amplidynie ze szczotkami zwartymi lub uzwojeniem poprzecznym zgodnym ("pole dodatnie"). Współczynnik wzmocnienia stale maleje i w całym omawianym przedziale jest $K'_w/K_w < 1$. Maleje również moc znamionowa, a więc żaden spośród statycznych parametrów nie może tu służyć jako kryterium doboru optymalnej liczby zwojów z_q . Nieznaczny wzrost dobroci wzmocnienia w przypadku $h = 0^q$ (rys.7) nie ma praktycznego znaczenia.

Stosowanie uzwojenia poprzecznego magnesującego przeciwnie jest więc (w zakresie "pola dodatniego") nieuzasadnione technicznie.

Dla zakresu $0,5 < k < 1$ wypadkowe pole poprzeczne ma zwrot przeciwny, niż pole w amplidynie ze szczotkami zwartymi (rys.4, 5, 6, 7). Otrzymujemy tu amplidynę z "ujemnym polem poprzecznym" [3].

Istotny wpływ na właściwości amplidyny ma w tym przypadku odwrócenie oddziaływania θ_{Fe} , dzięki czemu SEM poprzeczna E'_q jest tu kilkakrotnie większa niż w maszynie z "polem dodatnim" i pomimo znacznego wzrostu oporności obwodu poprzecznego uzyskujemy stosunkowo duży współczynnik wzmocnienia (rzędu 30%-70% wzmocnienia amplidyny ze szczotkami zwartymi - patrz krzywe b, c, d na rys.4 i 5). Odwróceniu

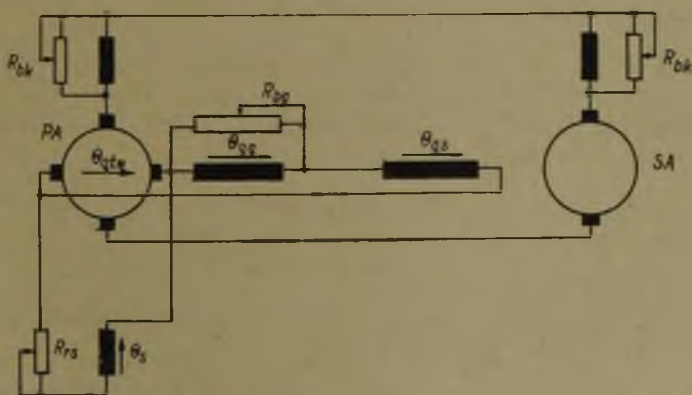
ulegnie również oddziaływanie podłużne twornika, które jest tu zgodne z przepływem sterującym. Nieskompensowana amplitdyna będzie się więc sama wzbudzać pod wpływem podłużnego prądu obciążenia. Uzwojenie kompensacyjne ma tutaj zadanie przeciwdziałać samowzbudzeniu się obciążonej maszyny.

Z uwagi na dodatnie wewnętrzne sprzężenie zwrotne wynikające z odwrócenia θ_{Pe} amplitdyna z "pojemnym" ma dużo mniejszą dobroć wzmacnienia, niż amplitdyna normalna, w związku z czym stosowanie jej jako wzmacniacza nie ma uzasadnienia, pomimo pewnych zalet, wynikających z dużej SEM i oporu w obwodzie poprzecznym (zawężenie strefy nieczułości).

Cenną natomiast właściwością, której nie można uzyskać w amplitdynie z "pojem dodatnim" jest możliwość płynnej regulacji strumienia poprzecznego poprzez bocznikowanie uzwojenia poprzecznego opornikiem nastawczym (w zasadzie jest to regulacja dwustronna z zakresem niesymetrycznym).

SEM poprzeczna nie zmienia przy takiej regulacji kierunku, a w zakresie "pola ujemnego" wartość jej waha się nieznacznie, co potwierdzono doświadczalnie. Dzięki temu do szczotek poprzecznych można przyłączyć uzwojenie sterujące. W takim układzie połączeń otrzymujemy samowzбудną prądnicą bocznikową z "ujemnym polem poprzecznym" z bardzo szerokim zakresem regulacji napięcia.

Powyższe własności regulacyjne umożliwiają zastosowanie amplitdyny z "pojem ujemnym" jako prądnicę sterującą w bezwzбудnicowym układzie Leonarda (rys.8).



Rys.8. Schemat połączeń bezwzбудnicowego układu Leonarda

Dzięki stosunkowo małym wahaniom SEM i prądu poprzecznego w obszarze "pola ujemnego" możemy do szczotek poprzecznych podłączyć również uzwojenie wzbudzające silnika, przy czym w celu ograniczenia poboru mocy z obwodu poprzecznego można jako silnik zastosować normalną amplidynę, wyposażoną również w uzwojenie poprzeczne stojana. Aby umożliwić pracę amplidyny - silnika przy stałym strumieniu należy do jego wzbudzania wykorzystać tylko uzwojenie poprzeczne i włączyć je szeregowo do obwodu poprzecznego prądnicy (rys.8).

Szczotki poprzeczne i uzwojenia sterujące są w silniku oczywiście zbędne, ponieważ maszynę tę wykorzystujemy tylko na drugim stopniu wzmocnienia. Jej obwód magnetyczny powinien być nasycony.

LITERATURA

- [1] Andrzejewski F.: Dwustopniowy wzmacniacz maszynowy (amplidyna) ze stosunkiem biegunów 1:1 w obu stopniach wzmocnienia. Zesz. Nauk. Pol. Wrocławskiej - 1954.
- [2] Epstein I.S.: Osobiennosti projektirowanja amplidynow. - Elektrichestwo 1945, Nr 12.
- [3] Gabryś W.: Wzmacniacz elektromaszynowy prądu stałego. Patent Nr 42150, 1958 r.
- [4] Gabryś W.: Wpływ niektórych danych uzwojenionych na parametry maszyn prądu stałego z polem poprzecznym. Praca doktorska, światłokopie w Bibl. Gł. Pol. Śląskiej Gliwice, czerwiec 1961.
- [5] Gogolewski Z., Gabryś W.: Maszyny prądu stałego - Warszawa, PWT, 1960.
- [6] Gorjainow F.A., Sałgus G.K.: Rasczot magnitnoj cepi elektromaszynowo usilitiela - Elektrichestwo 1948, Nr 9.
- [7] Gorjainow F.A.: Elektromaszynnyje usilitieli bolszoj moszcznosti - Elektroprivod i awtomatizacija promyslennych ustanowok. GEI, Moskwa 1960.
- [8] Paszek W.: Projektowanie wzmacniaczy maszynowych z polem poprzecznym. Sesja Naukowa Pol.Śl. Gliwice 1955.

- [9] P a s z e k W.: Analiza i pomiary oddziaływania podłużnego zezwojów komutujących twornika w maszynie prądu stałego ze szczególnym uwzględnieniem amplidyny - Sesja naukowa Politechniki Śląskiej Gliwice, 1955.
- [10] P a s z e k W.: Analiza stanów nieustalonych amplidyny - Zesz. Nauk. Pol. Śląskiej 1955 Elektryka Nr 4.
- [11] P a s z e k W.: Projektowanie wzmacniaczy maszynowych z polem poprzecznym. Arch. Aut. i Telem. 1957, t.II, Nr 3-4.
- [12] P e ł c z e w s k i W.: Wzmacniacze elektromaszynowe, Warszawa PWT, 1959.
- [13] L o o c k e G.: Elektrische Maschinenverstärker. Berlin 1958.
- [14] G a b r y ś W.: Uproszczona analiza stanów nieustalonych amplidyny. Zesz. Nauk. Pol. Śląskiej 1962, Elektryka Nr 4.
- [15] G a b r y ś W.: Czynniki uboczne w eksploatacji, konstrukcji i pomiarach amplidyn Zesz. Nauk. Pol. Śląskiej 1962, Elektryka Nr 13.
- [16] P a s z e k W.: Właściwości konstrukcyjne wielostopniowych wzmacniaczy elektromaszynowych. Zesz. Nauk. Pol. Śląskiej, 1962, Elektryka 12.

ПОПЕРЕЧНАЯ ОБМОТКА ОТАТОРА АМПЛИДИНА

В работе дан анализ влияния числа витков поперечной обмотки амплидина на статический коэффициент усиления, на постоянные времени, коэффициент добротности усиления и на нормальную мощность. Рассмотрены условия нагрева поперечной обмотки. Даны указания выбора числа витков согласновозбудительной обмотки и рассмотрены возможности применения встречновозбудительной обмотки в амплидине.

ENROULEMENT TRANSVERSALE DU STATOR DE L'AMPLIDYNE

Le mémoire analyse l'influence du nombre des spires de l'enroulement transversale du stator de l'amplidyne sur l'amplification, sur les constantes du temps, sur l'indice de qualité d'amplification et sur la puissance nominale.

L'auteur discute des conditions d'échauffement de l'enroulement transversale. Ensuite il donne des indications concernant le choix des nombres des spires d'un enroulement magnétisant en direction positive, aussi que la possibilité d'application d'une amplidyne avec l'enroulement transversale, magnétisant dans le sens inverse.