

Tadeusz WRÓBEL

Wojskowa Akademia Techniczna  
w WarszawiePRZYCZYNY PULSACJI NAPIĘCIA MAŁEJ CZĘSTOTLIWOŚCI  
W PRĄDNICACH TACHOMETRYCZNYCH PRĄDU STAŁEGO

**Streszczenie.** Zagadnienie pulsacji małej częstotliwości występujących w prądnicach tachometrycznych prądu stałego uporządkowano w oparciu o podany wzór uogólniający. Przeanalizowano wpływ różnych czynników na wartość tych pulsacji: niewspółosiowości silnika napędowego i prądnicy tachometrycznej skutkiem przesunięcia równoległego lub kąowego; mimośrodowości prostej lub złożonej powierzchni wirnika i wytoczenia stojana oraz anizotropii blach rdzenia wirnika. Zarzeczono wyniki badań własnych wpływu zastosowanego sprzęgła oraz anizotropii, na wartość pulsacji małej częstotliwości.

## 1. WSTĘP

W pracy [1] przedstawiono różne rodzaje pulsacji napięcia prądnic tachometrycznych prądu stałego. Wśród nich szczególnie dużą wartość osiągają - jak wykazano - pulsacje małej częstotliwości: obrotowe ( $f = p n \pi$  Hz) i biegunowe ( $f = 2pn \pi$  Hz). Prędkość obrotową  $n$  wyrażono w obr/s;  $\pi$  oznacza rząd harmonicznej danego rodzaju pulsacji.

Są to pulsacje spowodowane zasadniczo błędami wykonania (niedokładność wymiarów geometrycznych) i montażu prądnic tachometrycznych. Pulsacje napięcia małej częstotliwości  $\Delta U$  można przedstawić jako sumę pulsacji cząstkowych  $\Delta U_1$ , pochodzących od zmian różnych parametrów

$$\Delta U = \sum_{i=1}^{i=n} \Delta U_i = \Delta U_a + \Delta U_\beta + \Delta U_b + \Delta U_\delta + \Delta U_{R_M} = \frac{\partial U}{\partial a} a + \frac{\partial U}{\partial \beta} \beta + \frac{\partial U}{\partial b} b +$$

$$+ \frac{\partial U}{\partial \delta} \Delta \delta + \frac{\partial U}{\partial R_M} \Delta R_M. \quad (1)$$

Równanie (1) ilustruje wpływ różnych parametrów na wartość pulsacji małej częstotliwości. Są to:

$a$  - równoległe przesunięcie osi wału wirnika prądnicy tachometrycznej i osi wału napędowego;

- $\beta$  - kątowe przesunięcie osi wału wirnika prądnicy tachometrycznej i osi wału napędowego;
- b - przesunięcie osi geometrycznej powierzchni zewnętrznej wirnika względem osi wytoczenia stojana;
- $\Delta\delta$  - asymetria szczeliny powietrznej;
- $\Delta R_M$  - niejednakowa reluktancja w różnych kierunkach promieniowych.

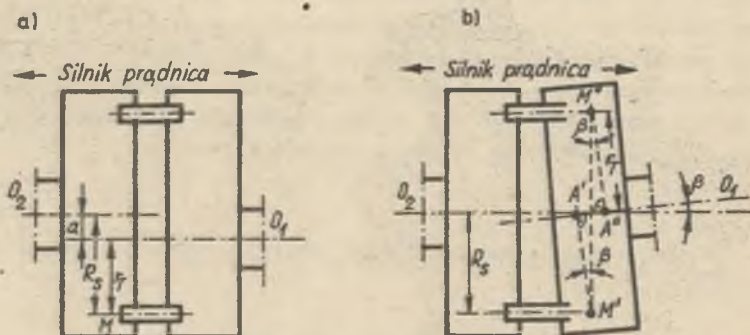
Przy określaniu pulsacji cząstkowych założono, że przyrost napięcia lub prędkości obrotowej jest zależny liniowo od wymienionych wielkości zmiennej.

## 2. PULSACJE WYWOŁANE OKRESOWĄ ZMIENNOŚCIĄ PRĘDKOŚCI

W ZWIĄZKU Z NIEWSPÓŁOSIOWOŚCIĄ SILNIKA NAPĘDOWEGO I PRĄDNI CY TACHOMETRYCZNEJ

Pulsacje te są bardziej zależne od rodzaju zastosowanego sprzęgła i sposobu jego zamocowania, aniżeli od samej prądnicy tachometrycznej. Przesunięcie osi wału wirnika prądnicy tachometrycznej w stosunku do osi wału napędowego jest przyczyną pulsacji prędkości kątowej prądnicy, przy stałej wartości prędkości kątowej silnika napędowego. Pulsacje prędkości kątowej są przyczyną powstawania pulsacji napięcia na zaciskach. Przyrost cząstkowy napięcia, spowodowany równoległym przesunięciem a

$$\Delta U_n = \frac{\partial U}{\partial a} a$$



Rys. 1. Niewspółosiowość osi wału prądnicy tachometrycznej  $O_1$  i osi wału napędowego  $O_2$ :

a - równoległe przesunięcie, b - przesunięcie kątowe

Istotę powstawania tych pulsacji (związanych z rodzajem zastosowanego sprzęgła lub przekładni) objaśnia następujące rozumowanie. Pomiędzy osią półsprzęgła silnika i półsprzęgła prądnicy tachometrycznej istnieje przesunięcie  $a$  (rys. 1a). Załóżmy, że ruch obrotowy jest przekazywany od silnika do prądnicy tachometrycznej za pomocą jednego tylko sworznia  $M$  (średnicy równej zeru), który jest umieszczony w odległości  $R_s$  od osi  $O_2$ . Aby sworznie  $M$  nie był sztywny względem półsprzęgła prądnicy tachometrycznej, wykonano w półsprzęgle wycięcie. Prędkość liniowa obu półsprzęgieł jest w dowolnej chwili jednakowa i równa

$$v = \omega_s R_s,$$

gdzie:

$\omega_s$  - prędkość kątowa wału silnika napędowego w rad/s.

Prędkość kątowa prądnicy tachometrycznej

$$\omega_T = \frac{v}{r_T} = \frac{\omega_s R_s}{r_T},$$

gdzie:

$r_T$  - odległość pomiędzy osią prądnicy tachometrycznej i osią sworznia sprzęgła.

Odległość  $r_T$  zmienia się w czasie wirowania wału prądnicy tachometrycznej. Kiedy sworznie  $M$  znajduje się w górnym położeniu (rys. 1a), wówczas:

$$r_T = R_s + a.$$

Prędkość kątowa jest wtedy najmniejsza

$$\omega_{Tmin} = \frac{\omega_s R_s}{R_s + a}. \quad (2)$$

Kiedy sworznie  $M$  znajduje się w dolnym położeniu

$$r_T = R_s - a.$$

Prędkość kątowa jest wtedy największa

$$\omega_{Tmax} = \frac{\omega_s R_s}{R_s - a}. \quad (3)$$

Prędkość kątowa prądnicy tachometrycznej jest więc zmienna w ciągu jednego obrotu w związku ze zmiennością promienia  $r_T$ . Dla przesunięcia osi, przedstawionego na rys. 1a, jest ona równa prędkości silnika napędowego tylko wtedy, kiedy sworznie  $M$  znajduje się w płaszczyźnie poziomej, przechodzącej przez oś  $O_2$ .

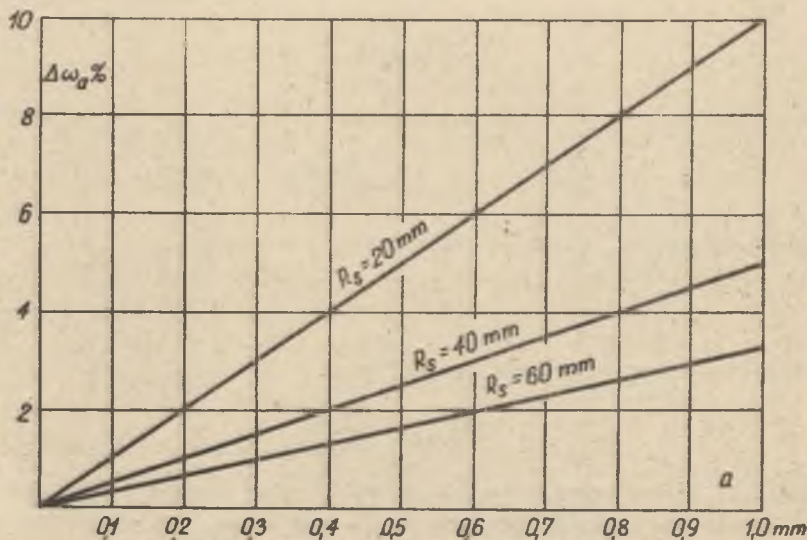
Procentową wartość pulsacji prędkości kątowej, spowodowanych przesunięciem równoległym osi wału silnika napędowego w stosunku do osi wału prędnicy (powodujących pulsacje napięcia indukowanego) określić można ze wzoru

$$\Delta\omega_a \% = \frac{\omega_{Tmax} - \omega_{Tmin}}{\frac{1}{2} (\omega_{Tmax} + \omega_{Tmin})}$$

Uwzględniając równania (2) i (3) otrzymujemy

$$\Delta\omega_a \% = \frac{\frac{\omega_s R_s}{R_s - a} - \frac{\omega_s R_s}{R_s + a}}{\frac{1}{2} \left( \frac{\omega_s R_s}{R_s - a} + \frac{\omega_s R_s}{R_s + a} \right)} 100\% = \frac{2a}{R_s} 100\%. \quad (4)$$

Wzór ten jest również ważny przy sworzniach o średnicy większej od zera i przy występującej w praktyce ich liczbie większej od jedności. Na podstawie wzoru (4) sporządzono wykres  $\Delta\omega_a \% = f(a)$  przy stałej wartości promienia półsprzęgła napędzającego  $R_s = \text{const.}$  (rys. 2). W ten sam sposób zmienia się procentowa wartość pulsacji napięcia spowodowanych równoległym przesunięciem  $a$  (przy założeniu stałości strumienia magnetycznego prądnicy tachometrycznej).



Rys. 2. Zależność procentowej wartości pulsacji prędkości kątowej  $\Delta\omega_a \%$  w funkcji przesunięcia  $a$  osi wału prądnicy tachometrycznej w stosunku do osi wału napędowego, przy stałej wartości promienia półsprzęgła napędzającego  $R_s = \text{const.}$

Na rys. 2 widoczny jest duży wpływ promienia półsprzęgła napędzającego na wartość pulsacji spowodowanych równoległym przesunięciem. Przykładowo można odczytać z rys. 2, że przy wartości przesunięcia  $a = 0,3$  mm często spotykanym w eksploatacji, procentowa wartość pulsacji prędkości kątowej dla  $R_s = 20$  mm wynosi 3%, co jest zdecydowanie wartością zbyt dużą; dla  $R_s = 40$  mm wynosi 1,5% a dla  $R_s = 60$  mm już tylko 1%, co może być uważane za wartość zadowalającą.

Jeżeli przy bardzo dobrym wycentrowaniu osi wałów jest na przykład  $a = 0,05$  mm, wówczas dla  $R_s = 20$  mm  $\Delta\omega_s\%$  wynosi 0,5%; dla  $R_s = 40$  mm 0,25% zaś dla  $R_s = 60$  mm tylko 0,17%,

Niewspółosiowość może być również wyrażona przez przemieszczenie kątowe osi sprzęgła w stosunku do osi prądnicy tachometrycznej (rys. 1b), co powoduje powstanie pulsacji napięcia

$$\Delta U_p = \frac{\partial U}{\partial \beta} \beta.$$

Również w tym przypadku niewspółosiowość jest przyczyną nierównomiernej prędkości kątowej prądnicy tachometrycznej, która powoduje pulsacje napięcia wyjściowego.

Biorąc pod uwagę rys. 1b założmy, że kąt przemieszczenia osi wału prądnicy tachometrycznej w stosunku do osi wału silnika napędowego leży w płaszczyźnie pionowej i że sprzęgło ma tylko jeden sworzeń napędzający M, który znajduje się w odległości  $R_s$  od osi wału silnika napędzającego. Odległość  $r_T$  punktu M od osi  $O_1$  (osi wału prądnicy) zmienia się. Kiedy sworzeń znajduje się w dolnym położeniu ( $M'$ ), wówczas  $r_T = \overline{A'M'}$ , kiedy zaś znajduje się on w górnym położeniu, wówczas  $r_T = \overline{A''M''}$ . W obu tych przypadkach promienie  $r_T$  są najmniejsze i równe sobie, gdyż  $A'M' = A''M''$ . Z konstrukcji geometrycznej jest widoczne, że w obu tych przypadkach  $r_T = R_s \cos \beta$ .

Kiedy promień  $r_T$  jest równy

$$r_T = r_{Tmin} = R_s \cos \beta, \quad (5)$$

jest on wówczas promieniem najmniejszym, któremu odpowiada maksymalna prędkość prądnicy tachometrycznej, wynosząca po uwzględnieniu równania (5)

$$\omega_{Tmax} = \omega_s \frac{R_s}{r_{Tmin}} = \omega_s \frac{1}{\cos \beta}.$$

Kiedy sworzeń M znajduje się na płaszczyźnie poziomej przechodzącej przez oś (po obu jej stronach), wówczas prędkość kątowa prądnicy tachometrycznej jest najmniejsza - jest ona wówczas równa prędkości kątowej silnika napędowego.

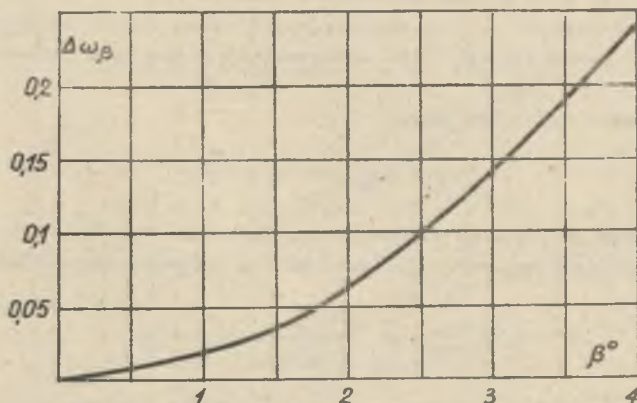
Procentowa wartość pulsacji prędkości kątowej spowodowanych przemieszczeniem kątowym

$$\Delta\omega_{\beta} \% = \frac{\omega_{Tmax} - \omega_{Tmin}}{\frac{1}{2}(\omega_{Tmax} + \omega_{Tmin})} 100\% = \frac{\frac{\omega_s}{\cos\beta} - \omega_s}{\frac{1}{2}(\frac{\omega_s}{\cos\beta} + \omega_s)} 100\% = \frac{2(1 - \cos\beta)}{1 + \cos\beta} 100\%. \quad (6)$$

Kąt  $\beta$  jest w praktyce bardzo mały, zaś przy małych  $\beta$  można założyć w przybliżeniu  $1 + \cos\beta \approx 2$ . Po uwzględnieniu tego we wzorze (6) otrzymujemy

$$\Delta\omega_{\beta} \% = (1 - \cos\beta) 100\%. \quad (7)$$

Zależność procentowej wartości pulsacji prędkości kątowej w funkcji kąta przemieszczenia  $\beta$ , wykreślona na podstawie wzoru (7), przedstawiono na rys. 3. Chociaż do wzoru (7) dochodzi się po przyjęciu założenia upraszczającego, że dla bardzo małych kątów  $1 + \cos\beta \approx 2$ , to jednak otrzymana na podstawie tego wzoru krzywa na rys. 3 jest wystarczająco dokładna, o czym świadczą to, że nawet dla największego kąta, występującego na wykresie ( $4^\circ$ ), wyliczone z dokładnego wzoru (6)  $\Delta\omega_{\beta} \%$  wyniosło po zaokrągleniu 0,2403%, podczas gdy z wykresu można odczytać odpowiednio  $\Delta\omega_{\beta} = 0,24\%$ .



Rys. 3. Zależność procentowej wartości pulsacji prędkości kątowej  $\Delta\omega_{\beta} \%$  w funkcji kąta przemieszczenia  $\beta$ , uzyskana na drodze obliczeniowej

Przykładowo z wykresu na rys. 3 można odczytać, że przy jednym z często zdarzających się w praktyce kątów  $\beta = 2^\circ$ ,  $\Delta\omega_{\beta} = 0,06\%$ , zaś przy dokładnym wycentrowaniu osi wałów, kiedy np.  $\beta = 30'$ ,  $\Delta\omega_{\beta} = 0,01\%$ .

Przez stosowanie sprzęgieł o specjalnej konstrukcji można doprowadzić do zmniejszenia pulsacji wywołanych przemieszczeniami kątowymi, i tak w pracy [2] podano przykładowo o wystąpieniu pulsacji napięcia 0,1% przy kącie  $\beta = 3^\circ$ , podczas gdy na podstawie wykresu z rys. 3 przy  $\beta = 3^\circ$ ,  $\Delta\omega_\beta = 0,14\%$ . Stosowane mogą być różne rodzaje sprzęgieł, wśród nich na uwagę zasługują sprzęgła mieszkowe [3].

Wpływ rodzaju zastosowanego sprzęgła na wartość pulsacji obrotowych prądnicy tachometrycznej potwierdzają badania przeprowadzone przez autora niniejszego artykułu. Badano importowaną prądnicę tachometryczną typu TM - 30 o danych:  $U_n = 460$  V;  $U_w = 110$  V;  $I_w = 0,07$  A;  $P = 30$  W;  $Z = 17$ ;  $K = 51$ , którą napędzano silnikiem prądu stałego typu PAKO 072-74 o mocy  $P = 30$  W. Uzwojenia wzbudzenia badanej prądnicy zasilano z zasilacza stabilizowanego P-314.

Zbadano dla porównania widmo pulsacji napięcia wyjściowego prądnicy w stanie jałowym, przy sprzęgnięciu jej z silnikiem napędzającym za pomocą węża igelitowego (przy starannym wycentrowaniu) oraz za pomocą sprzęgła mieszkowego. Prądnicę napędzano z prędkością obrotową  $n = 30$  obr/s. Wyniki analizy widmowej przeprowadzonej za pomocą analizatora harmonicznych typu C5-3 zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Porównanie pulsacji obrotowych dla dwu rodzajów sprzęgieł łączących prądnicę tachometryczną TM - 30 z silnikiem napędzającym:  $I_w = 0,07$  A;  $n = 30$  obr/s

Rodzaj pulsacji	f Hz	Rodzaj zastosowanego sprzęgła			
		Wąż igelitowy U = 150 V		Sprzęgło mieszkowe U = 146 V	
		$U_w$ V	$\frac{U_w}{U}$ 100%	$U_w$ V	$\frac{U_w}{U}$ 100%
Obrotowe	30	0,28	0,187	0,065	0,045
Biegunowe + 2 harm. obrotowych	60	2,85	1,9	2,5	1,712
2 harm. biegunowych + 4 harm. obrotowych	120	0,24	0,160	0,10	0,069
3 harm. biegunowych + 6 harm. obrotowych	180	0,38	0,253	0,34	0,233
7 harm. obrotowych	210	0,07	0,047	0,016	0,011

W tabeli zestawiono jedynie wyniki badania harmonicznej obrotowej (zależnej od zastosowanego sprzęgła) i jej znaczących wyższych harmonicznych. Jest widoczne znaczne zmniejszenie procentowej wartości pulsacji obrotowej

wych w przypadku zastosowania sprzęgła mieszkowego w porównaniu z połączeniem za pomocą węża igelitowego.

Mniejsze są również dla sprzęgła mieszkowego (choć nie w tak znacznym stopniu) amplitudy (i wartości procentowe) pulsacji, przy częstotliwościach odpowiadających harmonicznym pulsacji obrotowych. Zmniejszenie różnicy amplitud pulsacji dla sprzęgła mieszkowego i węża igelitowego przy tych częstotliwościach jest spowodowane tym, że są to jednocześnie pulsacje biegunowe i ich harmoniczne, które nie zależą od zastosowanego sprzęgła. Znaczna różnica jest znów widoczna w przypadku siódmej harmonicznej pulsacji obrotowych.

Sprzęgło mieszkowe kompensuje występującą niewspółosiowość osi wału silnika napędowego i prądnicy tachometrycznej. Cylindryczny miech, wykonany z brązu, ogranicza nierównomierność prędkości kątowej prądnicy tachometrycznej, wywołaną przesunięciem równoległym lub kątowym osi wału napędowego i wału prądnicy tachometrycznej. To działanie sprzęgła mieszkowego jest bardziej skuteczne przy zwiększonej liczbie zębów sprzęgła. Z drugiej strony, zbyt duża liczba zębów doprowadziłaby do znacznych skręceń pomiędzy wałami przy zmianach prędkości obrotowej, wprowadzając błąd wskazania prądnicy tachometrycznej.

### 3. PULSACJE WYWOŁANE MIMOŚRODOWOŚCIĄ POWIERZCHNI WIRNIKA I WYTOCZENIA STOJANA

Niektórzy autorzy [2], [4], [5], [6], zwracają uwagę na dający się zaobserwować wpływ mimośrodowości wirnika i stojana na dokładność prądnic tachometrycznych.

Rozpatrzone w poprzednim punkcie pulsacje są związane z niewspółosiowością osi wału silnika napędowego i prądnicy tachometrycznej, a więc z błędami montażu lub wykonania sprzęgła. W tym punkcie zostaną rozpatrzone pulsacje spowodowane niedokładnością wykonania samej prądnicy tachometrycznej, polegającą na przesunięciu osi geometrycznej powierzchni zewnętrznej wirnika względem jego osi obrotu, określane w literaturze jako "bicie" wirnika

$$\Delta u_{\delta} = \frac{\partial u}{\partial \delta} \Delta \delta$$

oraz na przesunięciu osi geometrycznej powierzchni zewnętrznej wirnika (gdą pokrywa się ona z jego osią obrotu) względem osi symetrii wytoczenia stojana

$$\Delta u_b = \frac{\partial u}{\partial b} b.$$

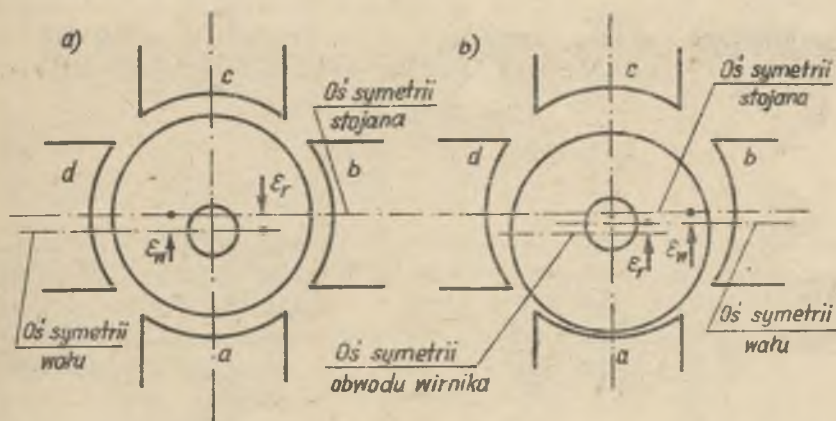


Oba te przypadki mimośrodkowości mogą zachodzić oddzielnie lub też łącznie, jako mimośrodkowość złożona.

Jeżeli występuje tylko niewspółosiowość osi geometrycznej powierzchni zewnętrznej wirnika w stosunku do osi symetrii wytoczenia stojana, to wówczas występuje stała nierównomierność szczeliny powietrznej, która sama nie wywołuje pulsacji napięcia, jednak ma wpływ na jej wartość w przypadku mimośrodkowości złożonej oraz na wartość pulsacji zióbkowych.

Na rys. 4a,b przedstawiono przypadek mimośrodkowości złożonej przy założeniu  $\varepsilon_w = \varepsilon_r$ , gdzie:

- $\varepsilon_w$  - przesunięcie osi geometrycznej powierzchni zewnętrznej wirnika względem osi symetrii wytoczenia stojana;  
 $\varepsilon_r$  - przesunięcie geometrycznej osi symetrii powierzchni zewnętrznej wirnika względem osi obrotu.



Rys. 4. Mimośrodkowość złożona w przypadku  $\varepsilon_w = \varepsilon_r$ :

a -  $\varepsilon_w$  i  $\varepsilon_r$  odejmują się, b -  $\varepsilon_w$  i  $\varepsilon_r$  sumują się

W położeniu wirnika pokazanym na rys. 4a skutkiem równości przesunięć  $\varepsilon_w = \varepsilon_r$  następuje odejmowanie mimośrodkowości i szczelina powietrzna pod wszystkimi biegunami jest jednakowa. Po obróceniu wirnika o pół obrotu mimośrodkowości się dodają i szczelina powietrzna pod różnymi biegunami ma różną wartość.

Średnia wartość szczeliny powietrznej przy mimośrodkowości złożonej (zgodnie z rys. 5)

$$\delta_o = \frac{D_a - D_w}{2}$$

W czasie wirowania wirnika szczelina powietrzna zmienia się o  $2 \epsilon_r$ . Na przykład w przypadku przedstawionym na rys. 5 szczelina  $\delta_1$  zmienia się od wartości

$$\delta_{1\max} = \delta_0 + \epsilon_w + \epsilon_r \quad (8)$$

do wartości

$$\delta_{1\min} = \delta_0 + \epsilon_w - \epsilon_r. \quad (9)$$

Zmiana szczeliny powietrznej

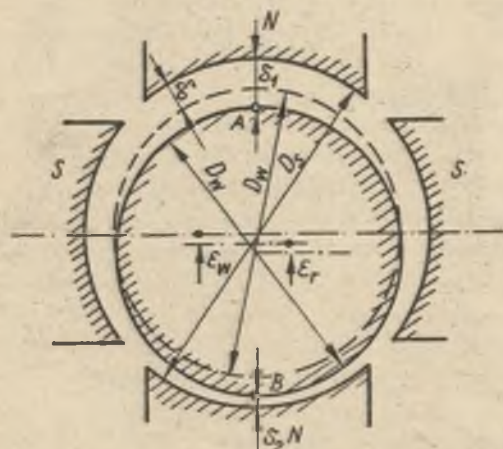
$$\Delta \delta_1 = \delta_{1\max} - \delta_{1\min} = 2 \epsilon_r. \quad (10)$$

Podobnie:

$$\delta_{2\max} = \delta_0 - \epsilon_w + \epsilon_r, \quad (11)$$

$$\delta_{2\min} = \delta_0 - \epsilon_w - \epsilon_r, \quad (12)$$

$$\Delta \delta_2 = 2 \epsilon_r.$$



Rys. 5. Zmienność szczeliny powietrznej przy mimośrodkowości złożonej

Szczelina  $\delta_1 > \delta_2$ , co spowodowane jest niewspółosiowością wytoczenia stojana i powierzchni zewnętrznej wirnika.

W związku z opisaną zmiennością szczeliny powietrznej, spowodowaną mimośrodkowością, powstają pulsacje napięcia indukowanego. Na przykład, napięcia indukowane w prętach znajdujących się w pobliżu punktu A (rys. 5).

$$E_A = k v_A B_A = k \omega (R_w - \epsilon_r) B_A, \quad (13)$$

zaś w prętach znajdujących się w pobliżu punktu B

$$E_B = k v_B B_B = k \omega (R_w + \epsilon_r) B_B, \quad (14)$$

gdzie:

- $v_A, v_B$  - prędkość obwodowa w punktach A i B;  
 $B_A, B_B$  - indukcja magnetyczna w punktach A i B;  
 $R_w$  - promień rdzenia wirnika.

#### 4. PULSACJE WYWOŁANE ZMIANAMI RELUKTANCJI OBWODU MAGNETYCZNEGO W ZWIĄZKU Z ANIZOTROPIĄ RDZENIA TWORNIKA

Są to zaobserwowane w prądnicach tachometrycznych pulsacje napięcia, które związane są z anizotropią własności magnetycznych rdzenia wirnika. Problem powstaje dlatego, ponieważ w trakcie produkcji blach wirnika ich własności magnetyczne ukształtują się w ten sposób, że są one lepsze w kierunku walcowania, aniżeli w innych kierunkach, co jest przyczyną powstawania pulsacji napięcia w uzwojeniu ruchoмого twornika. Innymi słowy, w czasie wirowania wirnika zmienia się reluktancja  $R_M$  obwodu magnetycznego. Ta zmiana reluktancji powoduje pulsacje napięcia

$$\Delta U_{RM} = \frac{\partial U}{\partial R_M} \Delta R_M.$$

Anizotropia własności magnetycznych blach rdzenia jest bardzo duża w przypadku blachy walcowanej na zimno. Choć dla blachy walcowanej na gorąco ma ona mniejsze znaczenie, to jednak w przypadku prądnicy tachometrycznej odgrywa istotną rolę, gdyż może wywołać znaczne pulsacje napięcia wyjściowego.

Wartość tych pulsacji może być nawet rzędu 1 - 2% napięcia znamionowego, zaś częstotliwość

$$f_p = 2 p n \dot{\varphi} \text{ Hz}, \quad (15)$$

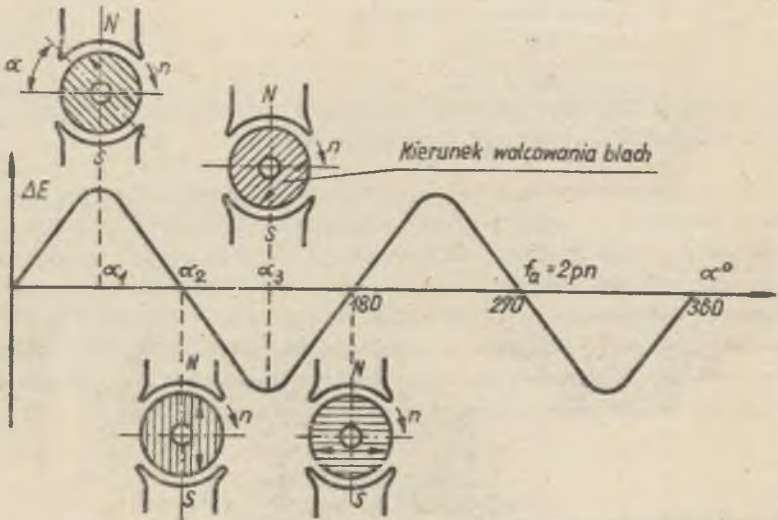
gdzie:

- $n$  - liczba obrotów na sekundę;  
 $\dot{\varphi}$  - rząd harmonicznej pulsacji biegunowych.

Pulsacje te są trudne do odfiltrowania, jako pulsacje małej częstotliwości, szczególnie w przypadku najczęściej spotykanej, dwubiegunowej prądnicy tachometrycznej.

Sposób powstawania pulsacji wywołanych przez anizotropię blach wirnika z uzasadnieniem ich częstotliwości można objaśnić na przykładzie prądnicy dwubiegunowej, posługując się rysunkiem 6. Na rysunku widoczny jest schemat dwubiegunowej prądnicy tachometrycznej z zaznaczeniem kierunku walcowania blach, przedstawiony dla różnych położeni wirnika, gdy wirnik jest ustawiony w sposób, że kierunek wirowania pokrywa się z kierunkiem osi bie-

gunów, wówczas reluktancja obwodu magnetycznego jest najmniejsza, gdy jest on ustawiony prostopadłe do tego kierunku - reluktancja jest największa.

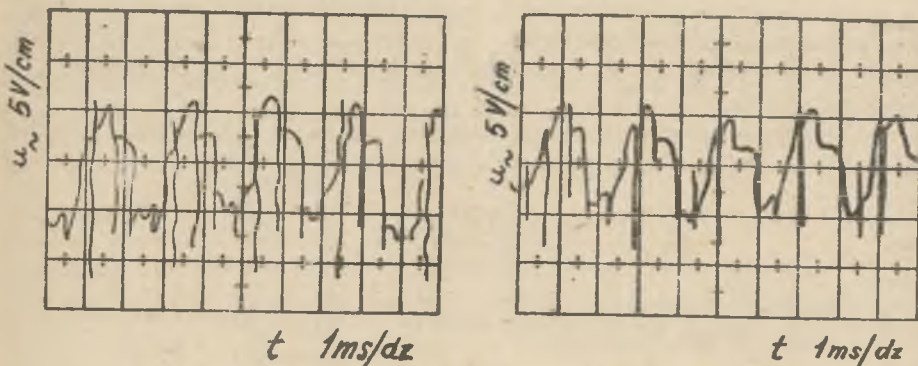


Rys. 6. Przebieg składowej przemiennej pulsacji napięcia indukowanego  $\Delta E$ , spowodowany anizotropią blach wirnika prądnicy tachometrycznej w funkcji kąta położenia wirnika

Gdy wirnik obraca się, zmienia się położenie kierunku walcowania w stosunku do kierunku osi biegunów. Gdy podczas wirowania kierunek walcowania blach znajdzie się w przybliżeniu w położeniu  $\alpha_1$  (rys. 6), następuje wówczas nagły wzrost strumienia magnetycznego, który powoduje wyindukowanie w uzwojeniu twornika maksymalnego napięcia indukowanego pulsacji  $\Delta E$ . Podczas gdy kierunek walcowania osiąga punkt  $\alpha_2$ , nie następuje już wzrost strumienia magnetycznego i napięcie indukowane pulsacji  $\Delta E = 0$ . Natomiast jeżeli kierunek walcowania osiąga punkt  $\alpha_3$ , występuje zmniejszanie się strumienia magnetycznego i wówczas napięcie indukowane pulsacji ma maksimum przeciwnego znaku. Z rysunku 6 wynika, że te zmiany pulsacji odbywają się z częstotliwością  $f_p = 2pn$ , gdyż przy  $p=1$  w ciągu jednego obrotu wirnika kierunek walcowania dwukrotnie pokrywa się z osią biegunów, więc częstotliwość pulsacji jest równa dwu okresom w ciągu jednego obrotu.

Wpływ anizotropii na pulsacje napięcia na wyjściu prądnicy tachometrycznej prądu stałego potwierdzają badania własne przeprowadzone na modelu eksperymentalnym prądnicy tachometrycznej, który stanowił seryjny silnik uniwersalny BKr 90/49 o liczbie zębów wirnika  $Z=12$  i liczbie wycinków komutatora  $K=24$ . Zastosowanie silnika uniwersalnego w charakterze prądnicy tachometrycznej do badań pulsacji napięcia jest korzystne, gdyż składowa przemienne występuje wyraźnie w krzywej napięcia wyjściowego, ponieważ silnik ten nie jest projektowany z myślą o ograniczeniu harmonicznych,

a ponadto ma pakietowany rdzeń stojana, który nie tłumi składowej zmiennej strumienia. Celowo dobrano silnik o liczbie żłobków  $Z_{m12}$ , aby nie eliminować nieparzystych harmonicznych strumienia, co dałoby zastosowanie nieparzystej liczby żłobków.



Rys. 7. Oscylogram przebiegu składowej przemiennej napięcia modelu prądnicy tachometrycznej o  $Z = 12$ ,  $K = 24$  przy biegu jałowym dla  $n = 35$  obr/s: a - dla nasyconego obwodu magnetycznego (prąd wzbudzenia  $I_w = 1,8A$ ), b - dla nienasyconego obwodu magnetycznego ( $I_w = 0,9 A$ )

Na oscylogramie przebiegu składowej zmiennej napięcia wyjściowego tego modelu (rys. 7a) pulsacje wywołane przez anizotropię (o  $f_p = 2 p n$ ) są wyrażone w postaci obwiedni krzywej pulsacji żłobkowych; widoczne zakrzywienie przebiegu jest nieznaczne, gdyż oscylogram był zdejmowany przy nasyconym obwodzie magnetycznym, kiedy to wpływ anizotropii ujawnia się słabiej.

Procentowa wartość pulsacji wywołanych przez anizotropię określona wzorem

$$\Delta V_{p1} \% = \frac{U_{p1}}{U_t} 100\% \quad (16)$$

wyniosła  $\Delta V_{p1} = 0,127\%$ .

We wzorze (16) oznaczają:

$U_{p1}$  - wartość amplitudy podstawowej harmonicznej pulsacji wywołanych przez anizotropię;

$U_t$  - napięcie wyjściowe.

Aby przekonać się o wpływie anizotropii na wartość tych pulsacji wykonano pomiary i zdjęto oscylogram dla nienasyconego obwodu magnetycznego (rys. 7b). Z oscylogramu (rys. 7b) jest widoczny wzrost amplitudy pulsacji biegunowych przy nienasyconym obwodzie magnetycznym w stosunku do przypadku obwodu nasyconego. Określona za pomocą analizatora harmonicznych, zgodnie ze wzorem (16), procentowa wartość podstawowej harmonicznej pul-

sacji wywołanych przez anizotropię przy nienasyconym obwodzie magnetycznym wyniosła  $\Delta W'_p, \% = 0,38\%$ . Tak więc przy nienasyconym obwodzie magnetycznym pulsacje biegunowe wzrosły prawie trzykrotnie w stosunku do przypadku obwodu nasyconego.

Ograniczenie pulsacji wywołanych przez anizotropię rdzenia jest możliwe przez ujednoczenie reluktancji drogą specjalnego montażu pakietu rdzenia, polegającego na "wachlarzowym" pakietowaniu blach, przy którym każda blacha jest przesunięta względem poprzedniej o jedną podziałkę żłobkową w tym samym kierunku.

Optymalną ze względu na anizotropię rdzenia liczbę blach pakietu twornika  $N_D$ , przy nieparzystej liczbie żłobków określa się ze wzoru

$$N_D = n Z,$$

gdzie:

- $n$  - dowolna liczba całkowita,
- $Z$  - liczba żłobków twornika.

Przy parzystej liczbie żłobków wystarczająca jest krotność połowy obrotu blachy. Wówczas liczba blach pakietu wirnika

$$N_p = n \frac{Z}{2}.$$

W przypadku pakietowania z przemieszczeniem blach względem siebie mogą powstać pulsacje o częstotliwości większej od częstotliwości podstawowej harmonicznej pulsacji, wywołanych przez anizotropię, lecz są one łatwiejsze do odfiltrowania.

Mniej skutecznym sposobem ujednoczania permeancji jest przekręcanie blach jedynie o kąt  $90^\circ$  względem sąsiedniej. W prądnicach bezżłobkowych przeciwdziała się niekiedy anizotropii rdzenia wirnika przez podzielenie go na dwa pakiety przekręcone w stosunku do siebie o kąt  $90^\circ$  [7].

Stosowany w dużych maszynach sposób, polegający na takim ukształtowaniu otworów wentylacyjnych, by zwiększyć reluktancję blachy w kierunku walcowania, w prądnicach tachometrycznych nie ma zastosowania ze względu na niewystępowanie otworów wentylacyjnych. W pracy [8] proponuje się stosowanie specjalnych wycięć w blachach (rys. 8) w celu zmniejszenia przekroju pakietu w kierunku walcowania. Zmniejszenie przekroju rdzenia twornika spowodowane przez te wycięcia powinno kompensować wpływ anizotropii.



Rys. 8. Wycięcia w blasze wirnika w celu ujednoczenia permeancji rdzenia

## LITERATURA

- [1] Wróbel T.: Pulsacje napięcia prądnic tachometrycznych prądu stałego. Przegląd Elektrotechn., nr 7/1978.
- [2] Puchol V., Jose M.: Dinamos taométricas (II). Tipos y detalles constructivos de las taodinamos de regulacion. Dyna nr 4/1967, (VI): Mantenimiento, formas constructivas, propulsion y tipos especiales. Dyna nr 10/1968.
- [3] Arbanas Ž.; Kriteriji za izbor tahogeneratora kod regulacije visoka točnosti, Automatika, nr 2/1972.
- [4] Bauer M.: Die Welligkeit der Gleichspannung von Tachometerdynamos und ihr Einfluss auf die Regelung, Regelungstechnik, nr 6/1959.
- [5] Bauer M.: Zvlňni sverkového napětí tachodynamu s dražkovanou kotvou. Automatizace, nr 4/1958.
- [6] Collamore F.N.: The nature of voltage ripple on DC generators, Trans. AIEE, Part II, Appl. and Ind. Vol. 73/1954.
- [7] Pustoża J.: Maszyny komutatorowe dla automatyki. WNT, Warszawa 1971.
- [8] Wodjacho J.M.: Pulsaciji naprjaženija w generatorach postojannogo toka wyzwanyje anizotropijej magnitnyh swojstw stali, Elektrotehnika, nr 7/1967.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Władysław Paszek

Wpłynęło do redakcji 5.IV.1982 r.

#### ПРИЧИНЫ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ НАПРЯЖЕНИЯ В ТАХОГЕНЕРАТОРАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

#### Р е з ю м е

На базе обобщенной формулы был усистематизирован вопрос низкочастотных пульсаций выступающих в тахогенераторах постоянного тока. Был произведен анализ влияния некоторых факторов на величину этих пульсаций: параллельного и углового смещения оси приводного двигателя и тахогенератора; простого или сложного эксцентриситета поверхности ротора и расточки статора, а также анизотропии листов сердечника ротора. Производятся результаты собственных исследований влияния примененной муфты, а также влияние анизотропии на величину низкочастотных пульсаций.

THE REASONS FOR SMALL FREQUENCY VOLTAGE RIPPLE IN D.C. .  
TACHOGENERATORS

S u m m a r y .

The problem of small frequency voltage ripple in DC tachogenerators is settled on the basis of a given generalized formula. The influence of various factors on the value of the ripple is analysed: misalignment of the driving motor and tachogenerator, armature eccentricity and the armature-core laminations grain orientation. The results of the author's own investigations of the influence of the used clutch and the grain orientation on the value of small frequency ripple are included.