

Opis i analiza metod pomiaru prędkości kątovej.

Prądnic tachometryczne.

Prądnic tachometryczne są to małe prądnic elektryczne, których napięcie wyjściowe zawiera informację o prędkości obrotowej, a w niektórych przypadkach także o kierunku tej prędkości. Główne obszary zastosowań prądnic tachometrycznych to:

- mierniki prędkości obrotowej, w których prądnic tachometryczna współpracuje z odpowiednio wyskalowanym woltomierzem, częstotściomierzem lub rejestratorem,
- źródła napięcia sprzężenia zwrotnego w układach napędowych; współpracuje wtedy ze wzmacniaczami, regulatorami i silnikami wykonawczymi,
- elementy różniczkujące i całkujące,
- elementy tłumiące kołysania prędkości silników wykonawczych,
- nadajniki łączy tachometrycznych synchronicznych,
- mierniki przyspieszeń.

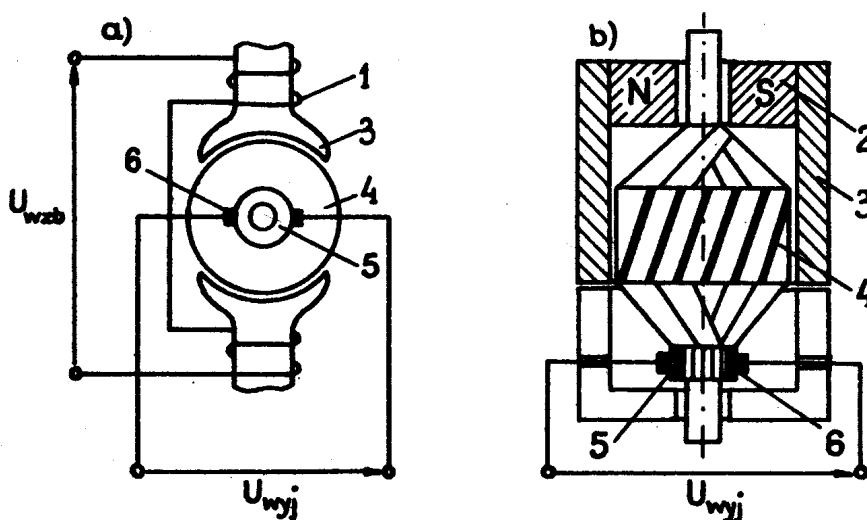
Najważniejszą cechą prądnic tachometrycznych jest zależność napięcia wyjściowego lub częstotliwości tego napięcia od prędkości obrotowej wirnika. Innymi cechami brany pod uwagę podczas doboru prądnicy do konkretnego zastosowania jest zakres prędkości, wrażliwość przebiegu charakterystyki wyjściowej na ewentualne obciążenie prądowe jej uzwojenia wyjściowego i zmiany temperatury otoczenia, kształt napięcia wyjściowego, wartość napięcia zerowego (przy $\Omega_r = 0$) oraz zakres liniowości charakterystyki.

Prądnic tachometryczne dzielą się na:

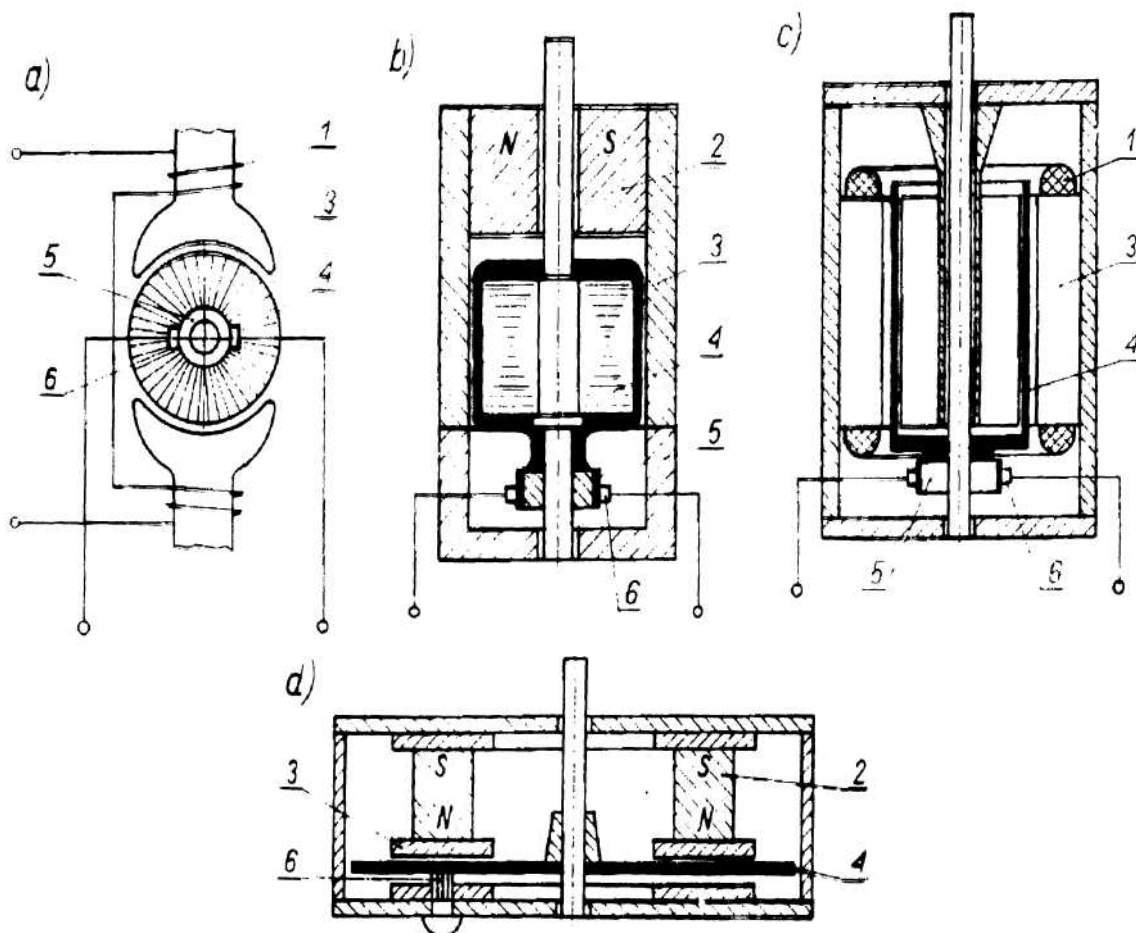
- prądnic tachometryczne prądu stałego (p.t.p.s.),
- prądnic tachometryczne indukcyjne (p.t.i.),
- prądnic tachometryczne synchroniczne (p.t.s.).

Prądnic tachometryczne prądu stałego.

Konstrukcja i zasada działania p.t.p.s. jest taka sama jak zwykłych prądnic prądu stałego. Są jedynie od nich dużo mniejsze, dokładniej wykonane oraz nie mają uzwojeń kompensacyjnych ani biegunów komutacyjnych.



Zasada budowy prądnicy tachometrycznej prądu stałego: a) ze wzbudzeniem elektromagnetycznym; b) ze wzbudzeniem magnesysem trwałym; 1 – uzwojenie wzbudzenia, 2 – magnes trwały, 3 – nabiegunniki, 4 – wirnik, 5 – komutator, 6 – szczotki

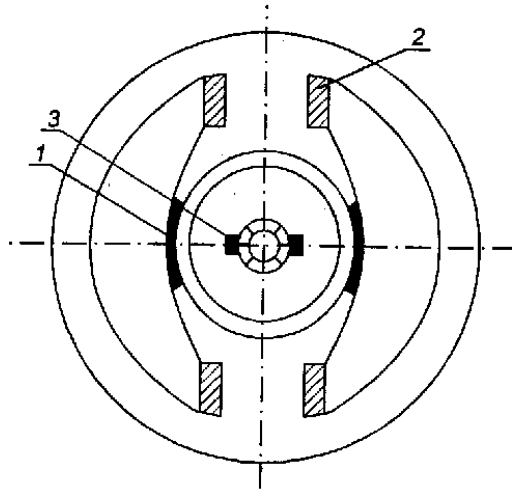


Zasada budowy prądnic tachometrycznych prądu stałego: a) ze wzbudzeniem elektromagnetycznym i o wirniku klasycznym; b) ze wzbudzeniem za pomocą magnesu trwałego i naklejonym uzwojeniu wirnika; c) ze wzbudzeniem elektromagnetycznym i wirnikiem kubkowym; d) ze wzbudzeniem za pomocą magnesu trwałego i wirnikiem tarczowym

1 – uzwojenie wzbudzenia, 2 – magnes trwały, 3 – nabiegunniki, 4 – wirnik, 5 – komutator, 6 - szczotki

W większości przypadków p.t.p.s. są wzbudzone wystarczonymi magnesami trwałymi. W p.t.p.s. o takich magnesach trwałych, strumień wzbudzenia może być z bardzo dobrym przybliżeniem uznany za stały. Wzbudzenie elektromagnetyczne, umożliwiające regulację stromości charakterystyki wyjściowej jest stosowane rzadziej, a prądnice tego typu muszą być zaopatrzone w boczniki magnetyczne, łączące różnoimienne bieguny stojana.

Na rysunku 2.2 przedstawiony jest szkic magnetowodu p.t.p.s. z bocznikami magnetycznymi. Zmiany strumienia wywołane różnicami temperatur pracy uzwojenia wzbudzenia i w związku z tym zmiany rezystancji uzwojenia, są kompensowane przez odpowiednie do zmian temperatury zmiany wartości strumienia rozproszonego, przebiegającego przez boczniki, który rośnie w temperaturach malejących a maleje w temperaturach rosnących. Strumień uzwojenia wzbudzenia skojarzony z uzwojeniem twornika pozostaje wskutek tego w przybliżeniu stały.



Szkic magnetowodu konwencjonalnej p.t.p.s. z bocznikami magnetycznymi i uzwojeniem twornika ułożonym w żłobkach wirnika: 1 – bocznik magnetyczny, 2 – uzwojenie wzbudzenia, 3 – komutator i szczotki

Najważniejszą charakterystyką prądnicy tachometrycznej jest zależność napięcia od prędkości obrotowej. Siła elektromotoryczna powstająca w uzwojeniu twornika jest proporcjonalna do prędkości obrotowej i strumienia:

$$E = k\Phi\Omega$$

Jeśli strumień jest stały, to:

$$E = k\Omega$$

Przy obciążeniu maszyny napięcie na szczotkach zmniejsza się o spadek napięcia:

$$U = E - IR_t - 2\Delta U_{sz}$$

gdzie: I – prąd obciążenia, R_t – rezystancja obwodu twornika łącznie z rezystancją przejścia na szczotkach.

Uwzględniając, że:

$$I = \frac{U}{R_{obc}}$$

gdzie R_{obc} – rezystancja obciążenia,

$$U = \frac{E}{1 + \frac{R_t}{R_{obc}}}$$

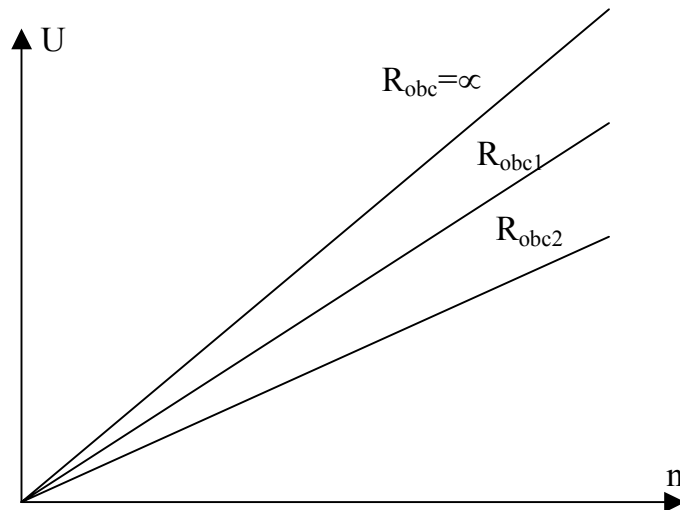
Jeśli rezystancje R_t i R_{obc} są stałe, to:

$$U = C''\Omega$$

gdzie:

$$C'' = C \frac{R_{obc}}{R_{obc} + R_t}$$

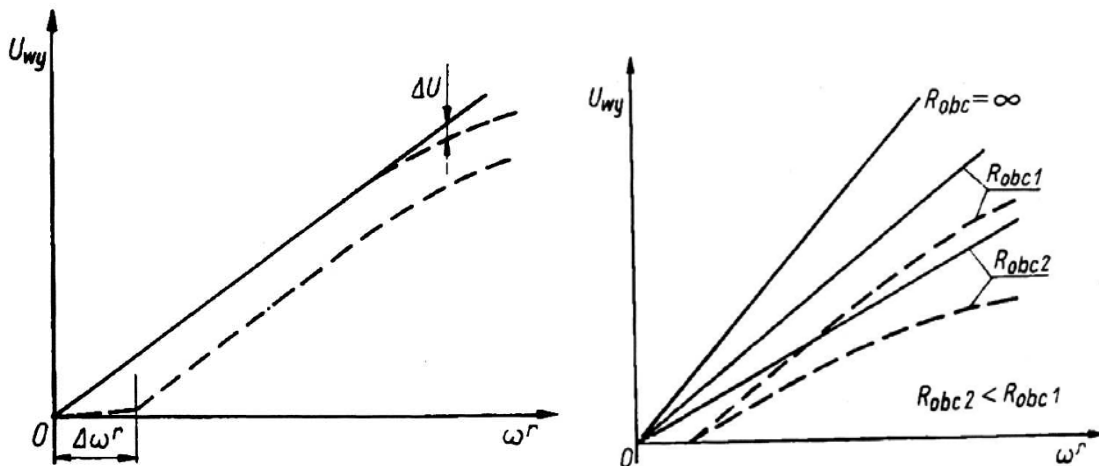
Im rezystancja obciążenia jest większa, tym charakterystyka robocza prądnicy tachometrycznej jest bardziej zbliżona do charakterystyki przy biegu jałowym.



Charakterystyki prądnicy tachometrycznej prądu stałego

Przy obciążeniu maszyny powstaje oddziaływanie twornika, które powoduje zmniejszenie wartości strumienia. Wskutek tego napięcie jest zależne nie tylko od prędkości obrotowej, lecz także od obciążenia. Ponadto rezystancja R_t obwodu twornika nie jest stała, gdyż zawiera w sobie rezystancję przejścia na szczotkach, która zmniejsza ze wzrostem obciążenia. Uchyb względny, spowodowany oddziaływaniem twornika, jest tym większy, im mniejsza jest rezystancja obciążenia i rośnie wraz ze wzrostem prędkości obrotowej. Z tego powodu powinna być obciążana przez możliwie dużą rezystancję obciążenia, a prędkość obrotowa nie powinna przekraczać wartości określonej dopuszczalnym uchybem.

W prądnicach tachometrycznych prądu stałego stosowanie szczotek węglowych jest niewskazane ze względu na znaczne wartości napięcia przejścia ΔU_p między szczotką a wycinkiem komutatora. Powoduje to przesunięcie charakterystyki wyjściowej i wprowadza błąd nieliniowości tej charakterystyki.



W związku z występowaniem napięcia ΔU_p pojawia się martwa strefa (strefa A na rysunku 2.4) odpowiadająca zakresowi prędkości obrotowych, w którym na zaciskach prądnicy brak jest napięcia wyjściowego. W celu zmniejszenia strefy martwej stosuje się w prądnicach tachometrycznych prądu stałego szczotki o małej rezystancji przejścia, a więc metalowe. Najczęściej są to szczotki pokryte srebrem lub złożone z pręcików irydowo-platynowych.

Napięcie na zaciskach prądnicy tachometrycznej nie jest idealnie stałe, lecz pulsujące. Zjawisko pulsacji napięcia wyjściowego może być bardzo szkodliwe, szczególnie przy stosowaniu p.t.p.s. w układach automatycznych regulacji.

Do podstawowych przyczyn występowania pulsacji zalicza się:

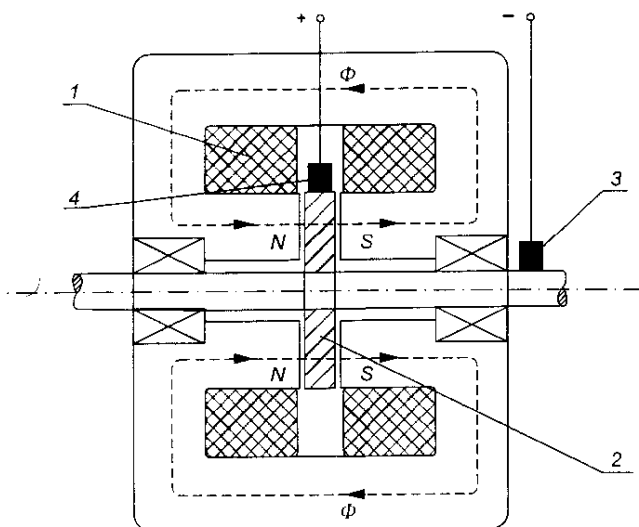
- niedoskonałość konstrukcji prądnicy (liczba żłobków i działek komutatora, dobór skosu żłobków, wymiarów bieguna i szczeliny powietrznej itp.),
- usterki produkcyjne (bicie komutatora, nierównomierna szczelina powietrzna, luzy w łożyskach, złe dotarcie szczotek itp.),
- niewłaściwa eksploatacja (złe sprzężenie prądnicy z silnikiem),

W składowej zmiennej można wyróżnić kilka częstotliwości pulsacji:

- pulsacje niskiej częstotliwości odpowiadające prędkości obrotowej prądnicy, które są spowodowane niecentrycznością osadzenia wirnika oraz anizotropią blach wirnika,
- pulsacje średniej częstotliwości pochodzące od pulsacji strumienia na skutek użłobkowania wirnika oraz związane z liczbą działek komutatora,
- pulsacje dużych częstotliwości pochodzące od iskrzenia szczotek.

Konstrukcja prądnic tachometrycznych powinna zapewniać minimalne wartości pulsacji napięcia wyjściowego przez odpowiedni dobór liczby i skosu żłobków, działek komutatora, kształtu nabiegunków i dokładność wykonania. W celu zmniejszenia pulsacji można stosować układy filtrujące RC. Zastosowanie ich jednak powoduje zwiększenie stałych czasowych układów regulacji. Innym sposobem zmniejszenia pulsacji jest stosowanie wirników bezżłobkowych, na przykład drukowanych. Jednak przy takiej konstrukcji znaczne zwiększenie szczeliny powietrznej dla strumienia wzbudzenia pociąga za sobą konieczność zwiększenia energii wzbudzenia.

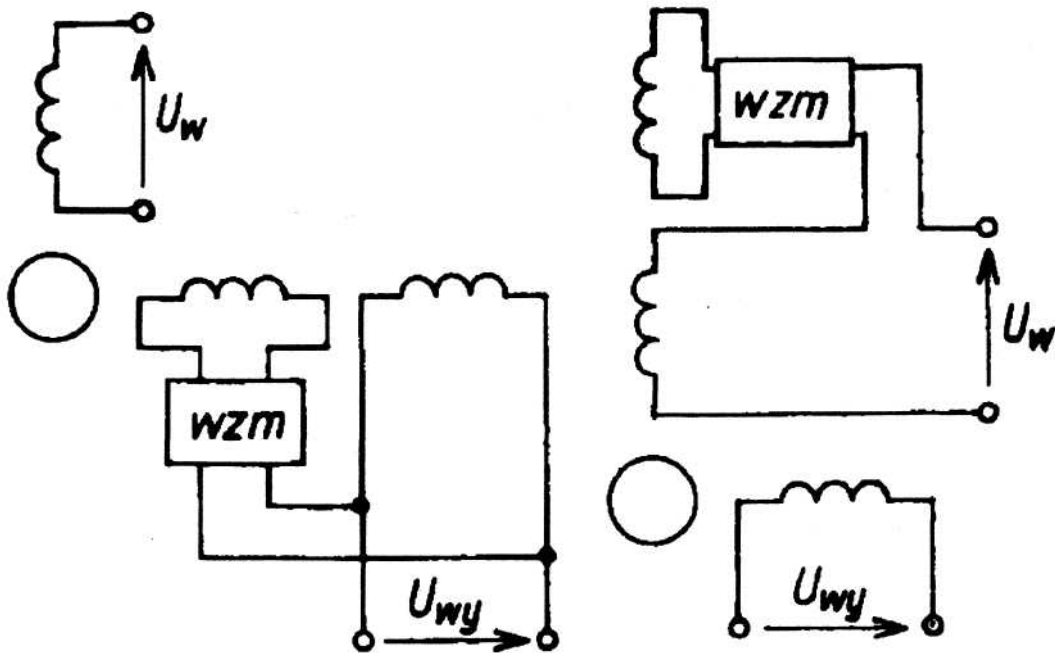
Pulsacji napięcia wyjściowego pozbawione są prądnice tachometryczne zbudowane jako maszyny homopolarne.



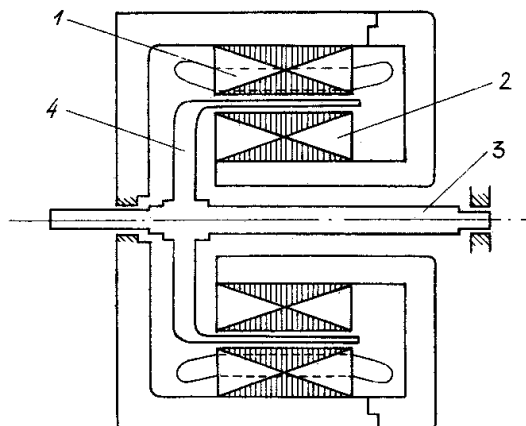
Zasada konstrukcji prądnicy homopolarnej: 1 – uzwojenie wzbudzenia zasilane prądem stałym, 2 – tarcza przewodząca (twornik), 3,4 – szczotki

Prądnice homopolarne cechuje mała stała napięciowa, co zmniejsza stromość charakterystyki wyjściowej, wskutek tego praktyczny zakres stosowania takich p.t.p.s. rozpoczyna się od około 4000 obr/min. Ponadto ten rodzaj maszyn prądu stałego wrażliwy jest szczególnie na zmiany temperatury i na zewnętrzne pole magnetyczne.

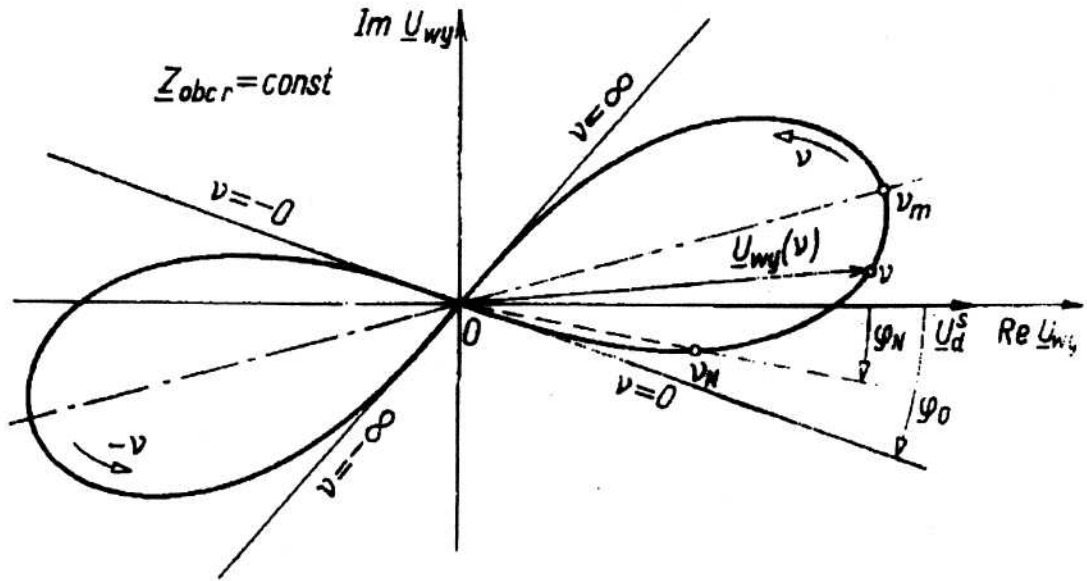
Prądnice tachometryczne indukcyjne.



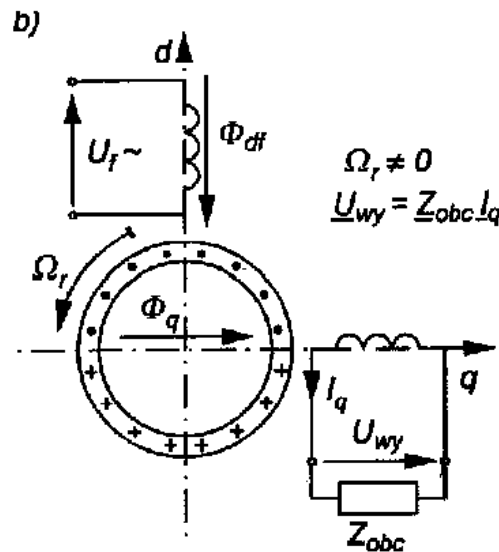
Konstrukcja prądnic tachometrycznych indukcyjnych niczym nie różni się od dwubiegunowych, dwupasmowych, dwufazowych silników indukcyjnych o lekkich wirnikach kubkowych. Są one natomiast dużo dokładniej wykonane pod względem mechanicznym, a ich blachowane magnetowody są po wykrawaniu i spakietowaniu poddawane specjalnej obróbce cieplnej, w celu uzyskania pełnej symetrii magnetycznej. Uzwojenie stojana, umieszczone w żłobkach składa się z dwóch identycznych pasm nawiniętych tak, aby ich osie magnetyczne były wzajemnie do siebie prostopadłe. Wirnik kubkowy wykonany jest z materiału przewodzącego elektrycznie. Jest to albo aluminium z domieszką manganu, albo brąz fosforowy o większej od aluminium rezystywności.



Przekrój poprzeczny asynchronicznej prądnicy tachometrycznej: 1 – blachowany stojan zewnętrzny, 2 – blachowany stojan wewnętrzny, 3 – wał, 4 – wirnik kubkowy



Czasami spotyka się konstrukcje, w których jedno pasmo uzwojenia znajduje się w żłobkach rdzenia stojana zewnętrznego, a drugie – wewnętrznego – w stosunku do kubka wirnika.



Zasada działania prądnicy tachometrycznej indukcyjnej.

Na powyższym rysunku przedstawiona jest schematycznie zasada działania prądnicy tachometrycznej indukcyjnej. Pasma wzbudzenia jest zasilone napięciem przemiennym U_f ze źródła o stałej, a nawet stabilizowanej amplitudzie i częstotliwości – najczęściej 400 lub 500 Hz. Pasma sygnału jest dołączone do zacisków przyrządu pomiarowego lub wzmacniacza o dużej impedancji wejściowej (5 – 10 kΩ). Przy nieruchomym wirniku, strumień oscylacyjny uzwojenia wzbudzenia indukuje w materiale przewodzącym kubka wirnika napięcie transformacji, dające prądy, przepływ i strumień oddziaływania skierowane przeciwnie (tak jak we wtórnym uzwojeniu transformatora) do strumienia uzwojenia wzbudzenia. Ustala się pewien oscylacyjny strumień wypadkowy (magnesujący) Φ_{df} w osi podłużnej (wzbudzenia) maszyny. Strumień ten nie jest skojarzony z uzwojeniem sygnału i przy $\Omega_r = 0$ napięcie wyjściowe p.t.i. jest teoretycznie równe zero. Po nadaniu wirnikowi pewnej prędkości różnej od zera, strumień Φ_{df} spowoduje powstanie w wirniku napięcia rotacji o amplitudzie zależnej

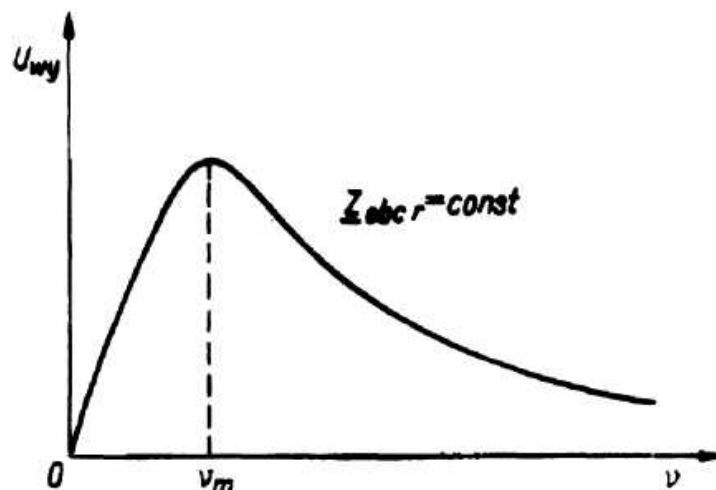
od tej prędkości i o częstotliwości strumienia magnesującego Φ_{df} , czyli o częstotliwości napięcia zasilania. Napięcie to wywoła prąd i strumień Φ_q wirnika w osi poprzecznej, w pełni sprzężony z pasmem sygnału, indukujący w nim napięcie transformacji U_{iq} , zależne od prędkości wirnika posiadające częstotliwość napięcia zasilającego pasmo uzwojenia wzbudzenia, przy czym zmiana kierunku obrotów wirnika spowoduje zmianę fazy napięcia wyjściowego o wartość π rad el.

Napięcie wyjściowe jest w ogólnym przypadku zależne nie tylko od parametrów samej prądnicy, ale także od wartości i charakteru impedancji obciążenia. Charakterystyka wyjściowa ma przebieg nieliniowy, z wyraźnym maksimum ograniczającym zakres jednoznaczności sygnału wyjściowego. Postać charakterystyki dobrze opisuje równanie:

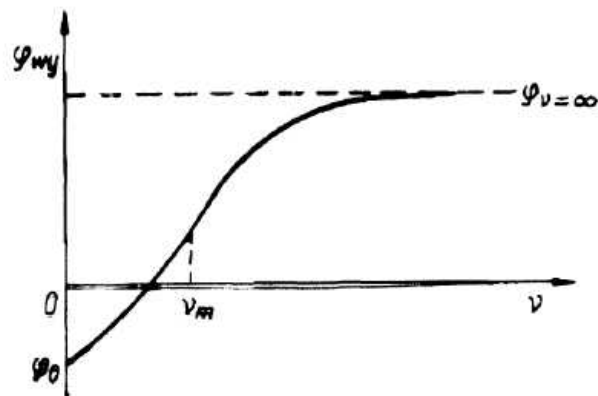
$$\underline{U}_{wy} = \frac{\underline{U}f}{\underline{a} + \underline{b}\Omega_r + \underline{c}\Omega_r^2} \Omega_r$$

w którym:

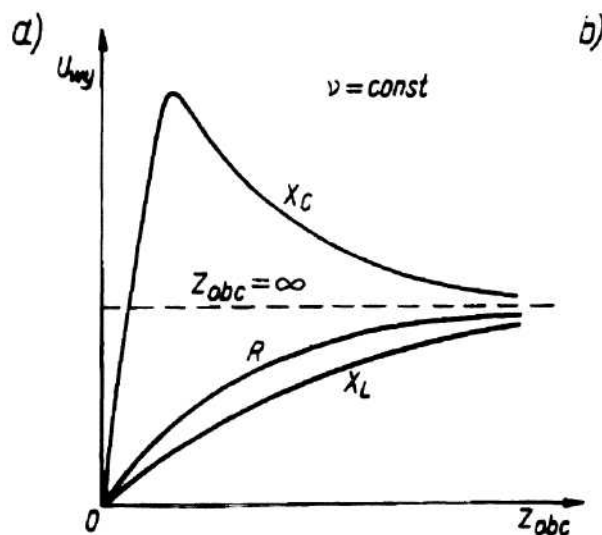
\underline{a} , \underline{b} , \underline{c} – współczynniki zależne od impedancji obwodu wyjściowego p.t.i.,
 \underline{U}_f – napięcie wzbudzenia.



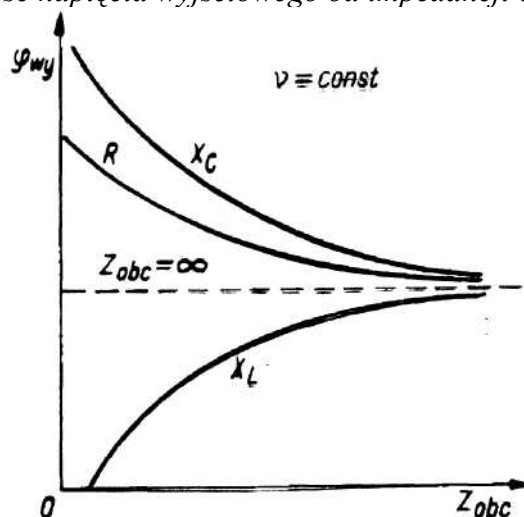
Charakterystyka wyjściowa $u = f(\Omega)$ prądnicy tachometrycznej indukcyjnej



Zależność fazy napięcia wyjściowego od prędkości



Zależność napięcia wyjściowego od impedancji obciążenia



Zależność fazy napięcia wyjściowego od impedancji obciążenia

Na powyższym rysunku widzimy przykładowy przebieg charakterystyki wyjściowej $u = f(\Omega)$ dla impedancji obciążenia $Z_{obc} = \text{const}$. W celu uzyskania jednoznacznej charakterystyki napięcia wyjściowego zakres prędkości roboczych prądnicy musi zawierać się w przedziale $(0; \Omega_{\max})$, natomiast w celu uzyskania zadawalającej liniowości jest on jeszcze bardziej ograniczony i wynosi $(0; (0,3 \div 0,5) \Omega_{\max})$.

Amplituda napięcia wyjściowego i kąt przesunięcia fazowego zależą od wartości i charakteru impedancji obciążenia.

Dla obciążenia o charakterze rezystancyjno-pojemnościowym można otrzymać niezależność amplitudy napięcia wyjściowego od wartości impedancji obciążenia. Taka niezależność otrzymuje się dla warunku $r = x_C$. Podobnie będzie dla kąta przesunięcia fazowego napięcia wyjściowego w przypadku obciążenia prądnicy impedancją o charakterze rezystancyjno-indukcyjnym spełniającą warunek $r = x_L$. Z powyższych zależności wynika, że jednoczesne uniezależnienie amplitudy i kąta przesunięcia fazowego od wartości obciążenia nie jest możliwe.

O przydatności prądnicy tachometrycznej indukcyjnej w układach automatyki decydują wartości błędów jej charakterystyki wyjściowej i wartości błędów wynikających z warunków jej eksploatacji.

Jeżeli jako nośnik informacji o prędkości wykorzystuje się amplitudę lub wartość skuteczną napięcia wyjściowego, to decydującym czynnikiem przy doborze prądnicy dla konkretnego zastosowania jest błąd amplitudowy. Jest on określany jako największa odchyłka w przedziale roboczym prędkości prądnicy przebiegu charakterystyki wyjściowej od przebiegu liniowego, przeprowadzonego przez punkty charakterystyki odpowiadające prędkościom $\Omega_r = 0$ i $\Omega_r = \Omega_N$.

$$\Delta U = \max_{0 \leq \Omega \leq \Omega_N} [U_{wyj} - U_l]$$

gdzie U_l – napięcie z charakterystyki liniowej,

$$\Delta u\% = \frac{\Delta U}{U_{wyjN}} \cdot 100\%$$

We współczesnych prądnicach jej wartości leżą w bardzo szerokim przedziale – od 0,02% - dla najlepszych prądnic, do – 2% - dla przeciętnych. Minimalną wartość błędu amplitudowego otrzymuje się przy obciążeniu prądnicy impedancją o charakterze pojemnościowym. Wartość tego błędu zależy również od rezystancji wirnika i maleje ze wzrostem tej rezystancji.

Błąd fazowy prądnicy tachometrycznej indukcyjnej jest to maksymalna, w znamionowym zakresie prędkości, różnica między fazą napięcia wyjściowego rzeczywistego a fazą tego napięcia przy prędkości znamionowej. Błąd ten decyduje o przydatności prądnicy do pracy w układach o sterowaniu fazowym. Najczęściej ten błąd mieści się w granicach $0,5^\circ$ - 2° .

Charakterystycznym dla p.t.i. jest tzw. błąd niedokładności zera, zwany inaczej napięciem zerowym. Określa on wartość napięcia indukowanego w uzwojeniu wyjściowym przy zahamowanym wirniku. Napięcie to zawiera dwie składowe przemienne: stałą – uzależnioną od asymetrii obwodu elektromagnetycznego oraz zmienną – uzależnioną od symetrii przewodności wirnika. Źródłem tego błędu są nieuniknione w procesie technologicznym niedokładności wykonania magnetowodu, uzłobkowanie blach stojana, praktycznie niemożliwe – wobec skończonej liczby zębów – takie ułożenie pasm uzwojeń, aby ich osie były do siebie prostopadłe, wreszcie nieunikniona, nawet przy najstaranniejszej obróbce mechanicznej i cieplnej, niewielka anizotropia magnetowodu. Jednym ze sposobów kompensacji składowej stałej jest włączanie szeregowo z uzwojeniem wyjściowym urządzeń kompensujących wytwarzających napięcie równe co do wartości, lecz o przeciwnej fazie niż składowa stała. Innym sposobem jest umieszczenie jednego uzwojenia na stojanie zewnętrznym, a drugiego na stojanie wewnętrznym prądnicy, przy możliwości obracania tych stojanów względem siebie o pewien niewielki kąt i zamocowania ich w położeniu zapewniającym minimalną wartość składowej stałej błędu. Można także stosować dodatkowe uzwojenia kompensujące umieszczone w osi uzwojenia wyjściowego. Jedynym sposobem zmniejszenia składowej zmiennej jest symetryzacja wirnika polegająca na mechanicznym usunięciu części materiału kubka wirnika. W dobrych prądnicach wartość napięcia zerowego rzadko przekracza 10 mV. Początek charakterystyki wyjściowej powinien być przesunięty na osi o wartość tego napięcia. Wartość napięcia zerowego powinna być dla wzmacniaczy współpracujących z prądnicą „niewidoczna”, tzn. być progiem, od którego zaczynają działać.

Błędy temperaturowe powstają w wyniku zmian rezystancji uzwojeń prądnic oraz zmiany rezystancji wirnika. Największy wpływ na ten rodzaj błędów ma zmiana rezystancji wirnika, jednak większość bardzo dokładnych prądnic ma wirnik wykonany z materiałów o bardzo małym współczynniku temperaturowym, dlatego wszystkie metody kompensacyjne będą się sprowadzały do kompensacji zmian rezystancji uzwojenia wzbudzenia. Jednym z takich sposobów jest włączenie do obwodu wzbudzenia dodatkowego rezystora o takim współczynniku temperaturowym, aby wynikowy współczynnik dla uzwojenia był bliski zeru.

Odchylenia częstotliwości napięcia wzbudzenia prowadzą do zmiany prędkości obrotowej synchronicznej oraz do zmiany nachylenia charakterystyki wyjściowej prądnicy. Sposób kompensacji tych błędów jest bardzo złożony. W praktyce kompensacja błędu amplitudowego, spowodowanego odchyleniami częstotliwości powoduje wzrost błędu fazowego.

Błędy spowodowane zmianami napięcia wzbudzenia można wyeliminować stosując odpowiednie zasilacze stabilizowane.

Prądnice tachometryczne synchroniczne

Prądnice tachometryczne synchroniczne są to małe bezstykowe maszyny synchroniczne wzbudzone magnesem trwałym umieszczonym na wirniku lub maszyny typu indukcyjnego o nieuzwojonym uzębionym wirniku i uzwojeniach umieszczonych w stojanie.

W uzwojeniu wyjściowym p.t.s. indukowane jest napięcie U_{wyj} o częstotliwości f . Charakterystyki wyjściowe mogą być wyrażone wzorami:

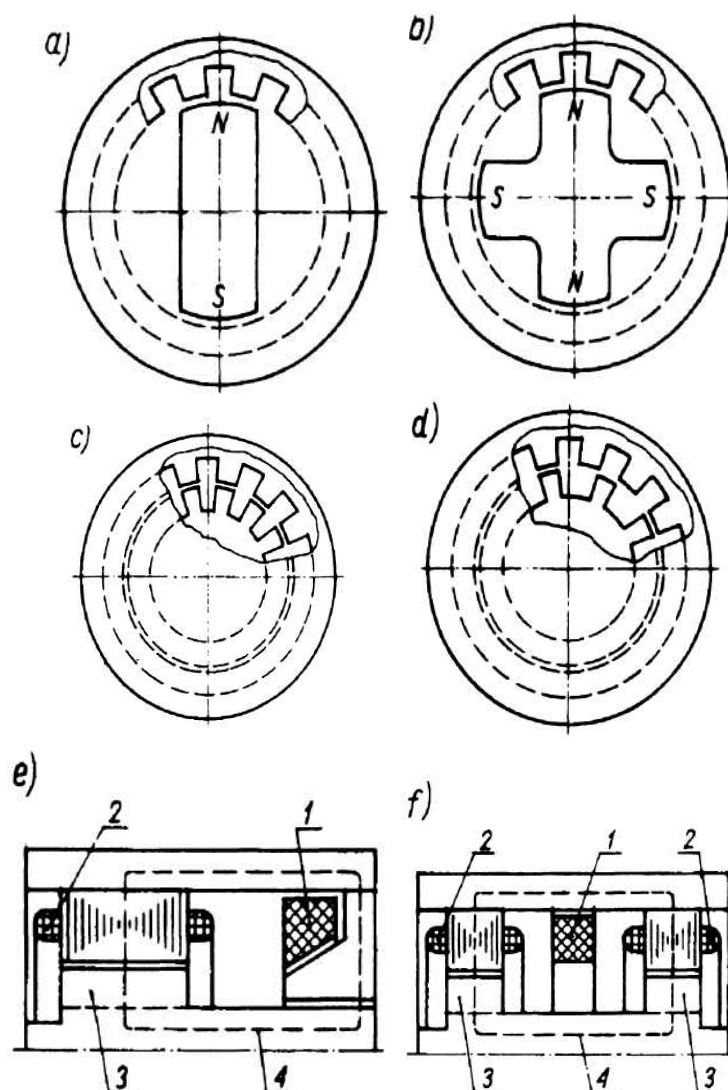
$$U_{wyj} = \frac{1}{\sqrt{2}} \Phi k_q z p \Omega_r$$

lub:

$$f = \frac{p \Omega_r}{2\pi}$$

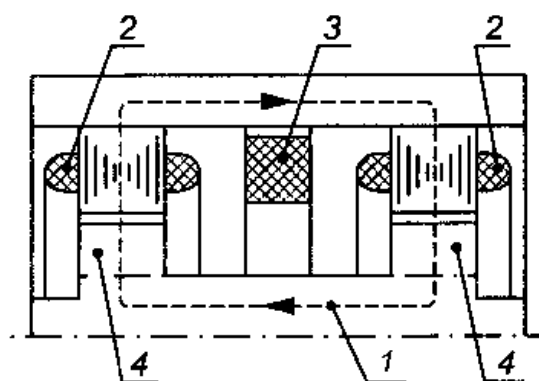
przy czym: z – liczba zwojów uzwojenia lub fazy uzwojenia wyjściowego, p – liczba par biegunów magnesu trwałego lub liczba zębów wirnika p.t.s. indukcyjnej.

Prądnice tachometryczne synchroniczne o magnesach trwałych wykonuje się jako dwu- lub czterobiegunowe. Jedno- lub wielofazowość uzwojenia otrzymuje się przez ułożenie uzwojenia w żłobkach stojana.



Zasady konstrukcji prądnic tachometrycznych synchronicznych: a) i b) o wzbudzeniu magnesem trwałym dwu- lub czterobiegunowym i o uzwojeniu wyjściowym jedno* lub wielopasmowym w stojanie; c) i d) induktorowej o uzwojeniu wyjściowym jedno- lub wielopasmowym; e) i f) induktorowej o wzbudzeniu homopolarnym jedno- lub dwuwieżkowej
 1 - uzwojenie wzbudzenia, 2 - uzwojenie wyjściowe, 3 - wieńce zębów wirnika, 4 - droga strumienia wzbudzenia

Prądnice tachometryczne synchroniczne indukcyjne mają uzwojenia wzbudzenia i uzwojenia wyjściowe ułożone w stojanie. Maszyny te mogą być wykonane jako przemiennobiegunowe (heteropolarne) lub jako jednakobiegunowe (homopolarne). W pierwszym przypadku uzwojenia wzbudzenia są nawijane na tych samych zębach stojana, na których umieszczono uzwojenie wyjściowe. W drugim przypadku cewkę uzwojenia wzbudzenia umieszcza się poza uzwojeniem wyjściowym, tworząc układy o jednym lub dwóch wieńcach zębów.



Konstrukcja prądnicy tachometrycznej synchronicznej induktorowej dwuwieżkowej; 1 – droga strumienia wzbudzenia, 2 – uzwojeny stojan, 3 – uzwojenie wzbudzenia, 4 – zębony wieniec wirnika

Przy jednofazowym uzwojeniu wyjściowym podziałki zębów stojana i wirnika są jednakowe. Uzwojenie wzbudzenia może być łączone szeregowo, równoległe lub szeregowo-równoległe, zależnie od parametrów źródła zasilania. Uzwojenie wyjściowe łączy się przeważnie szeregowo w celu otrzymania możliwie dużej amplitudy napięcia wyjściowego, a przy tym możliwie dużego nachylenia charakterystyki wyjściowej p.t.s.

Przy wielofazowym uzwojeniu wyjściowym stosunek podziałek zębów stojana i wirnika zależy od liczby faz tego uzwojenia. Uzwojenie wzbudzenia może być nawinięte jako homopolarne lub jako heteropolarne, analogicznie jak w p.t.s. jednofazowej induktorowej.

W prądnicy tachometrycznej z wyjściem przemiennonapięciowym parametrem wyjściowym jest amplituda napięcia wyjściowego. Ponieważ wraz ze zmianą prędkości obrotowej zmienia się częstotliwość napięcia wyjściowego, dlatego też zmienia się sumaryczna impedancja obwodu wyjściowego (uzwojenia i obciążenia). Powoduje to nieliniowość amplitudy napięcia wyjściowego. Z tego względu p.t.s. o wyjściu przemiennonapięciowym nie może być stosowana w układach regulacji automatycznej. Jedynym jej zastosowaniem może być pomiar prędkości obrotowej przy użyciu indywidualnie wycechowanego woltomierza. Dokładność takiego pomiaru jest niewielka i zależy od klasy miernika oraz precyzji cechowania układu. Aby uzyskać jak największą czułość napięciową prądnicy tego rodzaju nawija się jednopasmowo, łącząc wszystkie zwoje szeregowo.

W prądnicy tachometrycznej synchronicznej stałonapięciowej parametrem wyjściowym jest napięcie wyprostowane w dwupołkowym układzie prostowniczym. W celu dodatkowego wygładzenia wyprostowanego napięcia można stosować filtry RC. Zastosowanie filtru zwiększa jednak wydatnie stałą czasową obwodu wyjściowego, co pogarsza jej właściwości dynamiczne – wydłuża czas reakcji na wymuszenie prędkościowe. Prądnica z takim filtrem jest rzeczywistym elementem inercyjnym. Zamiast filtrów pomiarowych stosuje się uzwojenia wielopasmowe, w prądnicach induktorowych nawet 24-pasmowe, co przy jednocześnie dużej liczbie zębów wirnika, zwiększającej częstotliwość napięcia indukowanego przed prostownikiem, powoduje, że pulsacje napięcia wyjściowego za prostownikiem nie przekraczają w p.t.s. induktorowych 0,1% i są o rząd wielkości mniejsze niż w prądnicach tachometrycznych prądu stałego. Zaletą tych prądnic jest bezstykowość, praktycznie brak pulsacji, liniowość charakterystyki. Wadą natomiast jest znaczna masa wirnika i duży moment bezwładności oraz brak detekcji kierunku wirowania.

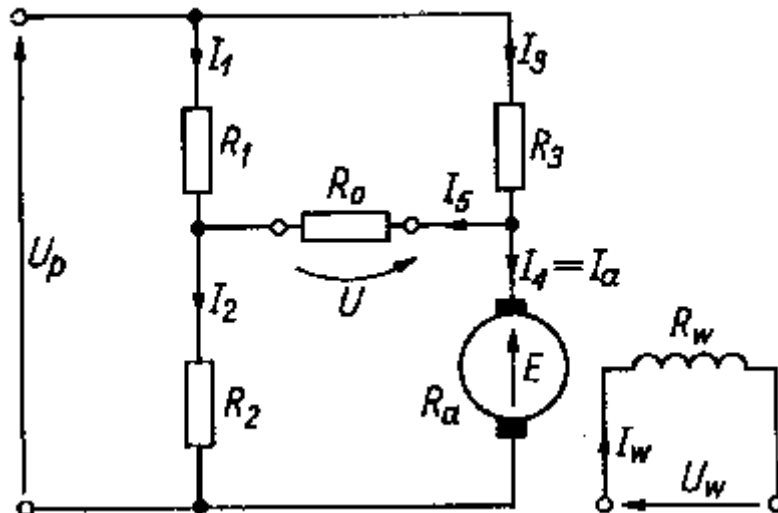
Najkorzystniejsze właściwości mają prądnice tachometryczne synchroniczne z wyjściem częstotliwościowym. Ich charakterystyki są ściśle liniowe. Prądnice takie to idealne elementy proporcjonalne. W celu uniezależnienia się od zmian amplitudy napięcia

wyjściowego występujących przy zmianach prędkości, prądnice takie wyposaża się często w elektroniczne układy formujące napięcie w ciąg impulsów o standardowej, stałej wysokości i zmiennej – zależnej od okresu zmienności napięcia – szerokości. Sprawia to, że nadają się one idealnie do współpracy z cyfrowymi układami sterowania, cyfrowymi miernikami częstotliwości i liczby impulsów, mikroprocesorami itp. Ponieważ układy formujące działają dopiero od pewnej progowej wartości napięcia, to w związku z tym w pobliżu zera prędkości wystąpi pewna niewielka strefa nieczułości, tym mniejsza im mniejsze napięcie wyzwalałoby układ formujący.

Mostek tachometryczny prądu stałego

W układach automatyki, w których zachodzi potrzeba przetworzenia prędkości obrotowej układu na sygnał elektryczny, można zrezygnować z prądnicy tachometrycznej, a wykorzystać silnik wykonawczy jako źródło sygnału własnej prędkości obrotowej. Układem umożliwiającym przetworzenie prędkości obrotowej silnika wykonawczego jest mostek tachometryczny spełniający w układzie automatyki rolę tachometrycznego sprzężenia zwrotnego.

Na poniższym rysunku przedstawiony jest schemat układu mostka tachometrycznego prądu stałego.



Układ mostka tachometrycznego prądu stałego.

Napięcie robocze jest U spadkiem napięcia na elemencie R_0 , stanowiącym obciążenie układu mostkowego. Z reguły żąda się, aby przy nieruchomym silniku napięcie robocze było równe zero, wówczas musi być spełniony warunek równowagi mostka:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_a} = h$$

Aby określić zależność napięcia roboczego od prędkości silnika, należy rozwiązać układ równań opisujących obwód przedstawiony na rysunku 2.13, uwzględniając to, że napięcie indukowane w wirniku jest przy stałym strumieniu proporcjonalne do prędkości obrotowej:

$$E = c_E n$$

Jeżeli prędkość idealnego biegu jałowego (przy $i_a=0$) przy zasilaniu silnika napięciem znamionowym oznaczy się przez n_0 , wówczas:

$$U_N = c_E n_0$$

stąd napięcie indukowane można wyrazić zależnością:

$$E = U_N \frac{n}{n_0} = U_N \Omega$$

Po podstawieniu na podstawie wzoru 2.13 $R_1=hR_2$ oraz $R_3=hR_a$, analiza obwodu mostka prowadzi do układu równań:

$$\begin{bmatrix} hR_2 & R_2 & 0 & 0 & 0 \\ hR_2 & 0 & -hR_a & 0 & -R_0 \\ 0 & R_2 & 0 & -R_a & R_0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_p \\ 0 \\ U_N v \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Rozwiązując ten układ równań względem prądu I_5 otrzymuje się:

$$I_5 = \frac{h(h+1)U_N \Omega}{2h(R_a + R_2) + (h+1)^2 R_0}$$

zaś napięcie robocze wyraża się zależnością:

$$U = I_5 R_0 = \frac{h(h+1)R_0 U_N \Omega}{2h(R_a + R_2) + (h+1)^2 R_0}$$

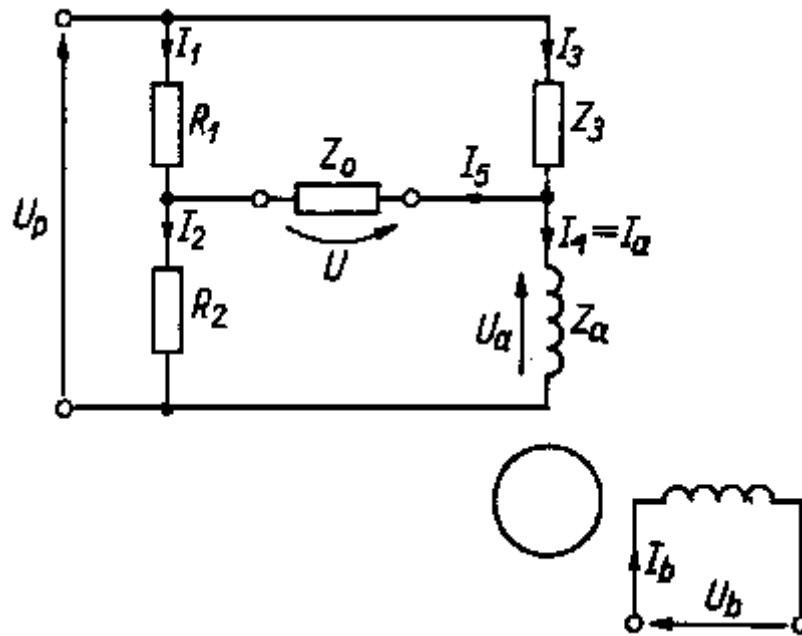
Stąd dla stanu jałowego otrzymuje się:

$$U_0 = \frac{h}{h+1} U_N \Omega$$

Napięcie robocze zarówno dla stanu obciążenia, jak i dla stanu jałowego nie jest zależne od wartości napięcia sterowania U_p . Zależność napięcia roboczego od prędkości obrotowej jest liniowa. Dla stanu jałowego wielkość napięcia roboczego przy danej prędkości, czyli nachylenie charakterystyki $U=f(v)$ zależy od współczynnika h . Wraz ze wzrostem tego współczynnika charakterystyka staje się bardziej stroma. Napięcie robocze w stanie jałowym nie zależy od doboru wartości rezystancji R_1 i R_2 , ani od rezystancji wirnika R_a , natomiast przy obciążeniu układu mostkowego rezystancje te, jak również rezystancja obciążenia wpływają na wartość napięcia roboczego.

Mostek tachometryczny prądu przemiennego

Podobnie jak w przypadku silnika wykonawczego prądu stałego możliwe jest przy użyciu silnika dwufazowego uzyskanie sygnału zależnego z pewnym przybliżeniem liniowo od prędkości obrotowej tego silnika bez stosowania prądnicy tachometrycznej. Zadanie to realizuje się przy pomocy mostka tachometrycznego.



Schemat układu mostka tachometrycznego prądu zmiennego.

Zależność napięcia roboczego U od prędkości obrotowej przy obciążeniu obwodu zewnętrznego impedancją Z_0 otrzymuje się przez rozwiązanie układu mostka przedstawionego na rysunku 2.14. Impedancja wejściowa Z obwodu sterowania silnika jest funkcją napięcia wzbudzenia i prędkości silnika.

$$I_a = \frac{U_a(Z_1 + Z_2) + jU_b(Z_2 - Z_1)}{2Z_1Z_2}$$

stąd napięcie na zaciskach uzwojenia sterującego:

$$U_a = \frac{2Z_1Z_2}{Z_1 + Z_2} I_a - jU_b \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} = C_1 I_a + C_2 U_b$$

Przy nieruchomym wirniku mostek jest zrównoważony i zachodzi równość:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{Z_3}{Z_a} = h$$

W tym stanie prąd I_5 jest równy zeru, a zatem napięcie robocze u też jest równe zeru. Przy dowolnej prędkości impedancja uzwojenia sterującego zmienia się i powoduje nierównowagę mostka, skutkiem czego przez impedancję Z_0 płynie prąd I_5 . Równania napięć oczkowych i prądów węzłowych w tym stanie pracy można zapisać w postaci jednego równania macierzowego:

$$\begin{bmatrix} R_1 & R_2 & 0 & 0 & 0 \\ R_1 & 0 & -hZ_a & 0 & -Z_0 \\ 0 & R_2 & 0 & -C_1 & -Z_0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_p \\ 0 \\ C_2 U_b \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Rozwiązanie tego równania dla prądu I_5 ma postać:

$$I_5 = \frac{U_p (R_1 C_1 - h R_2 Z_a) + U_b (R_1 + R_2) h Z_a C_2}{[(R_1 + R_2) h Z_a + Z_{wy} + R_1 R_2] C_1 + h R_1 R_2 Z_a + (R_1 + R_2) h Z_a Z_0}$$

Podstawiając $R_1 = h R_2$ i wyrażenia na C_1 oraz C_2 ze wzoru 2.22 otrzymuje się:

$$U = I_5 Z_0 = \frac{E v + F \Omega^2}{M + N \Omega^2}$$

przy czym:

$$E = Z_0 j U_b (h + 1) h Z_a A_2$$

$$F = U_p h Z_0 (Z_{a0} - Z_a) A_3$$

$$M = (h + 1) [h (Z_a + Z_2) + (h + 1) Z_0] Z_a A_1$$

$$N = (h + 1) (h Z_{a0} Z_a + Z_0 Z_{a0} + h Z_a Z_0) + h R_2 (Z_{a0} + h Z_a) A_3$$

gdzie:

$$A_1 = Z_a (Z_{ra} + j X_m)^2$$

$$A_2 = -R_r X_m^2$$

$$A_3 = Z_{a0} (X_m + X_r)^2$$

Jeżeli obwód roboczy nie jest obciążony, wówczas otrzymuje się równanie w postaci:

$$U_0 = \frac{E_0 v + F_0 \Omega^2}{M_0 v + N_0 \Omega^2}$$

przy czym:

$$E_0 = j U_b (h + 1) Z_a A_2$$

$$F_0 = U_p h (Z_{a0} - Z_a) A_3$$

$$M_0 = (h + 1)^2 Z_a A_1$$

$$N_0 = (h + 1) (Z_{a0} + h Z_a) A_3$$

Związki powyższe umożliwiają określenie zależności napięcia roboczego od prędkości. Za wzorów widać, że napięcie ani w stanie jałowym, ani przy obciążeniu mostka impedancją Z_0 nie jest liniową funkcją prędkości, gdyż zarówno w liczniku, jak i w mianowniku występują składniki proporcjonalne do kwadratu prędkości. Jednak dla spotykanych silników dwufazowych stałe F i N są tak niewielkie w porównaniu ze stałymi E i M , że można z dobrym przybliżeniem uważać charakterystykę zewnętrzną układu mostka tachometrycznego za liniową.