

**Zakład Napędów Wieloźródłowych
Instytut Maszyn Roboczych Ciężkich PW
Laboratorium Elektrotechniki i Elektroniki**

Ćwiczenie M 1 - instrukcja

**Badanie maszyn prądu stałego:
silnika bocznikowego i prądnicy obcowzbudnej**

Data wykonania ćwiczenia.....
Data oddania sprawozdania.....

Zespół wykonujący ćwiczenie:

	<i>Nazwisko i imię</i>	<i>ocena końcowa</i>
1.
2.
3.
4.
5.
6.
7.
8.
9.
10.

Wydział SiMR PW

Rok ak. 20.../20...

Semestr.....

Grupa.....

Warszawa 2007r.

SPIS TREŚCI

BADANIE MASZYN PRĄDU STAŁEGO

1. Cel ćwiczenia.....	3
2. Wiadomości teoretyczne.....	3
2.1. Budowa maszyn prądu stałego.....	3
2.2. Zasada działania i podstawowe zależności	4
2.3. Straty energii i sprawność maszyn	7
2.4. Oddziaływanie twornika.....	8
2.5. Komutacja.....	8
2.6. Rodzaje maszyn prądu stałego.....	8
3. Prądnica bocznikowa prądu stałego.....	9
3.1. Właściwości prądnic.....	9
3.2. Rodzaje prądnic bocznikowych.....	9
3.3. Charakterystyki prądnicy bocznikowej prądu stałego	11
3.3.1. Charakterystyki biegu jałowego.....	11
3.3.2. Charakterystyki zewnętrzne prądnic.....	12
3.3.3. Charakterystyka regulacyjna.....	13
3.3.4. Zastosowanie maszyn prądu stałego.....	13
4. Silnik bocznikowy prądu stałego.....	14
4.1. Właściwości silników.....	14
4.2. Rodzaje połączeń uzwojeń silników prądu stałego.....	15
4.3. Silnik bocznikowy prądu stałego.....	16
4.4. Rozruch silnika bocznikowego.....	17
4.5. Regulacja prędkości obrotowej silników.....	18
4.6. Charakterystyki obciążeniowe silnika.....	20
4.7. Charakterystyki regulacyjne.....	21
5. Pomiary	21
6. Literatura pomocnicza.....	21

Badanie maszyn prądu stałego

1. Cel ćwiczenia

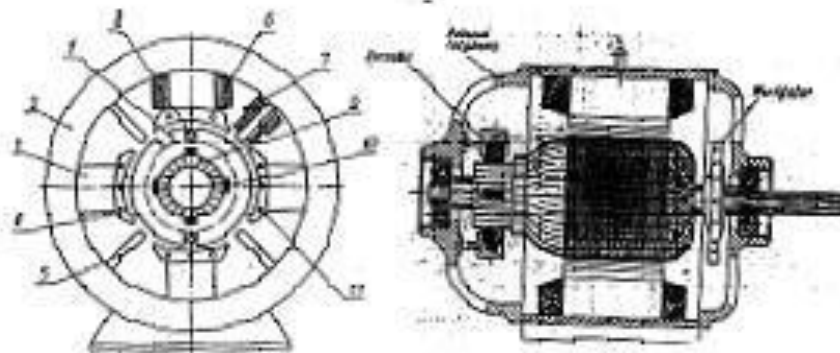
Celem ćwiczenia jest poznanie budowy, zasady działania maszyn prądu stałego, charakterystyk przy pracy prądnicowej i silnikowej oraz ich wyznaczenie poprzez pomiary w stanie biegu jałowego i obciążenia. Podstawowe badania eksploatacyjne to charakterystyki obciążenia i regulacyjne, a także w przypadku silnika próby rozruchowe.

2. Wiadomości teoretyczne

2.1. Budowa maszyn prądu stałego

Budowę maszyn prądu stałego pokazano na rys. 1. Podstawowe części to **stojan**, zwany **magneśnicą** i **wirnik** zwany **twornikiem**.

W **magneśnicy** wytwarzany jest strumień magnetyczny, a w **tworniku** - siła elektromotoryczna $E(\text{sem})$ i moment elektromagnetyczny M_e . Do **jarzma** 2 w kształcie cylindra przymocowane są: **rdzenie biegunów głównych** 3 z nawiniętymi **uzwojeniami** 6 - wytwarzające główny strumień magnetyczny ? oraz **bieguny komutacyjne** 5 z uzwojeniami 7 - służące do poprawy warunków komutacji. Maszyna może mieć tylko parzystą liczbę biegunów głównych p : 2, 4, 6, lub ogólnie liczbę p par biegunów. Rdzenie biegunów (elektromagnesów) wykonane są z cienkich blach magnetycznych o grubości ok. 1mm, izolowanych między sobą. **Uzwojenie kompensacyjne** 11 nawinięte na **nabiegunnikach** 4 - biegunów głównych służy do ograniczenia niekorzystnego skutku oddziaływania twornika.



Rys. 1. Przekrój maszyny prądu stałego

1 - wirnik, 2 - jarzmo, 3 - rdzeń bieguna głównego, 4 - nabiegunnik, 5 - rdzeń bieguna komutacyjnego, 6 - uzwojenie bieguna głównego, 7 - uzwojenie bieguna komutacyjnego, 8 - uzwojenie wirnika, 9 - komutator, 10 - szczotki, 11 - uzwojenie kompensacyjne.

Wirnik 1 w formie walca ze żłobkami, w których jest umieszczone *uzwojenie twornika* 8, jest wykonany również z izolowanych blach magnetycznych (stal twornikowa) osadzonych na wale. Na wale jest zamocowany *komutator*, wykonany z izolowanych między sobą wycinków cylindrycznego walca miedzianego, do którego są przyłączone początki i końce zwojów uzwojenia. Po komutatorze ślizgają się *szczotki* 10 służące do przepływu prądu twornika., umocowane w *trzymadłach szczotkowych* (zw. *szczotkotrzymaczami*).

2.2. Zasada działania i podstawowe zależności

Zasadę działania maszyny prądu stałego mającej jedną parę biegunów oraz uzwojenie wirnika składające się z jednego zwoju, którego końce są przyłączone do dwu wycinków komutatora k_1 i k_2 wraz ze szczotkami b_1 i b_2 ślizgającymi się po komutatorze, łącząc uzwojenie wirnika z obwodem zewnętrznym – podano na rys 2.

Przy wirowaniu wirnika w polu magnetycznym wytworzonym przez bieguny główne stojana zachodzą dwa podstawowe zjawiska:

1. W przewodach twornika indukuje się *sem* E o wartości określonej wzorem:

$$E = B l v \quad [V] \quad (1)$$

gdzie: B - indukcja magnetyczna w teslach, l - długość przewodu w m,

v - prędkość, z jaką przewód przecina w kierunku prostopadłym linii sił pola magnetycznego w m/s.

Kierunek *sem* E można określić regułą *prawej dłoni*.

2. Przy przepływie prądu w przewodach twornika działa na nie siła mechaniczna o wartości:

$$F = B I l \quad [N, T, A, m] \quad (2)$$

Gdzie: I - natężenie prądu w amperach A.

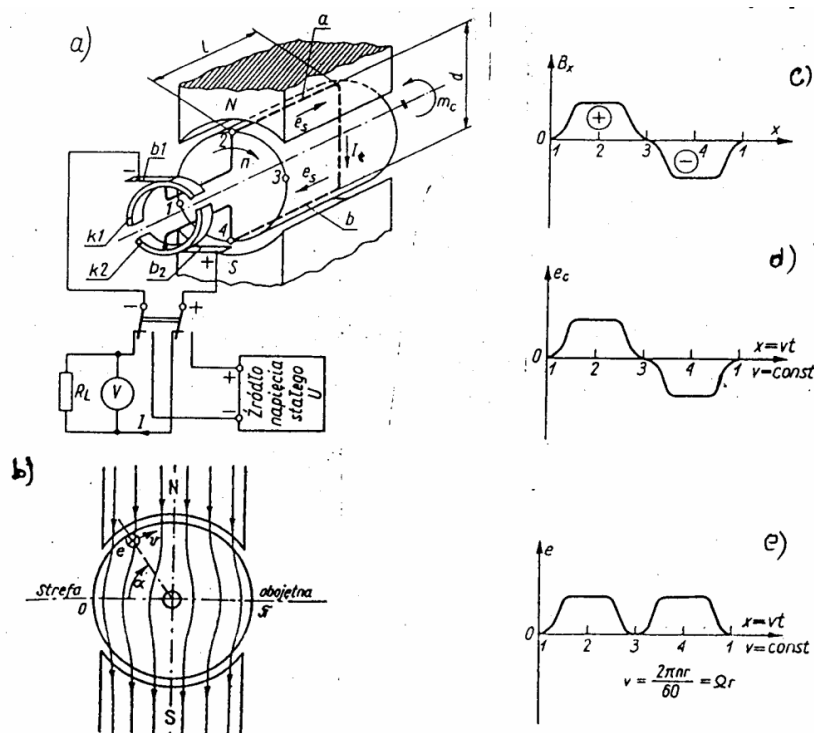
Kierunek tej siły F można określić posługując się regułą *lewej dłoni*.

Siły mechaniczne działające na przewody twornika powodują powstanie momentu elektromagnetycznego M_e , którego kierunek jest zależny od rodzaju pracy maszyny: *prądnicowej*, lub *silnikowej*.

Przy pracy **prądnicowej** moment M_e skierowany jest przeciwnie do kierunku wirowania i w związku z tym do wału prądnicy należy dostarczyć energii mechanicznej (poprzez silnik napędowy), która w prądnicy zamieniana jest na **energię elektryczną**.

Przy pracy **silnikowej** natomiast moment elektromagnetyczny M_e ma kierunek zgodny z kierunkiem wirowania, jest więc **momentem napędowym**, pod wpływem, którego energia elektryczna jest zamieniana na energię mechaniczną, dostarczaną przez silnik napędowy maszynie roboczej.

Jak wynika ze wzoru (1), przy wirowaniu twornika w nieruchomym polu magnetycznym stojana, indukcja B (rys 2b) jest funkcją położenia przewodu, określonego kątem α .



Rys.2. Zasada działania maszyny prądu stałego.

a) szkic maszyny, b)przekrój, c) przebieg indukcji magnetycznej na obwodzie wirnika, d) przebieg SEM na końcach uzwojenia wirnika k1-k2, e) przebieg SEM na szczotkach b1-b2 po prostowaniu przez komutator k1-k2

Przez uzwojenie nieruchomych biegunów płynie prąd wzbudzenia I_f (magnesujący) wytwarzający strumień magnetyczny Φ_{fa} (rys. 2b).

Rozkład indukcji B_x wzdłuż obwodu wirnika jest przedstawiony na rys. 2c; W osi obojętnej maszyny (rys. 2b.) wartość tej indukcji jest równa zero.

Jeśli wirnik obraca się z prędkością v , to w każdym boku o długości $l/2$ jego uzwojenia o długości l indukuje się *sem* o wartości chwilowej e_c . Na zaciskach uzwojenia składającego się z dwóch boków otrzymujemy, zatem *sem*

$$e_c = B_x l/2 \cdot 2 v = B_x l v \quad (3)$$

Przy stałych wartościach l oraz v , zmienność *sem* w czasie (rys. 2d) zależy od zmienności indukcji, B_x (rys. 2c).

Komutator dokonuje przełączeń końców uzwojenia twornika poprzez wycinki k1-k2 i szczotki b1-b2 w chwilach, gdy *sem* $e_c = 0$. Dzięki temu na szczotkach otrzymuje się *sem* e o jednym zwrocie (rys. 2e). Komutator spełnia rolę prostownika mechanicznego.

W maszynie obciążonej przez uzwojenie wirnika płynie prąd I_t . Oddziałuje on na strumień Φ_{fa} o indukcji B_x wytwarzając moment obrotowy, który dla jednego zwoju (dwóch boków) określa zależność

$$m_c = l d B_x I_t = \Psi_x I_t \quad (4)$$

gdzie: l – czynna długość boku uzwojenia, d – średnica wirnika, Ψ_x – strumień skojarzony.

W budowanych maszynach wirniki mają uzwojenia składające się ze znacznej liczby $2N_a$ boków. Komutator wykonany z N_a wycinków łączy szeregowo w zamkniętą pętlę poszczególne N_a zwojów. Otrzymana na szczotkach sem E oraz powstały w wirniku moment elektromagnetyczny M_e mają praktycznie stałe w czasie wartości i wyrażają się zależnościami:

- gdy ruch wirnika wyrazimy prędkością kątową ω , rad/s, lub pr. obrotową obr/min

$$E = C \Phi_{fa} \omega, \text{ lub } E = C \Phi_{fa} n, \quad \text{gdzie } C \text{ – stała konstrukcyjna} \quad (5),(6)$$

$$M_e = C \Phi_{fa} I_t \quad (7)$$

Gdy wirnik maszyny jest napędzany przez inną maszynę wirującą np. przez turbinę - mamy do czynienia z *pracą prądnicową*. Na zaciskach (szczotkach) prądnicy powstaje wówczas sem, której wartość można regulować przez zmianę prądu wzbudzenia I_f . Przyłączony do szczotek odbiornik R_L (rys.2a) pobierając energię elektryczną, wywołuje w tworniku (wirniku) przepływ prądu I_t . Napięcie U na zaciskach jest mniejsze od sem E o spadek napięcia na rezystancji twornika R_a i połączonych z nim szeregowo uzwojeniach komutacyjnym i kompensacyjnym. Całkowitą rezystancję obwodu wewnętrznego, przez który płynie prąd I_t , oznaczamy R_{at} . Stąd, w przypadku prądnicy napięcie na jej zaciskach:

$$U = E - R_{at} I_t \quad (9)$$

Prąd I_t ma zwrot zgodny ze zwrotem E , natomiast moment M_e jest skierowany przeciwnie do kierunku prędkości obrotowej n (prędkości kątowej ω).

Przy *pracy silnikowej* zaciski maszyny są przyłączone do źródła napięcia stałego U . W uzwojeniu twornika płynie wówczas prąd I_t , a w uzwojeniach biegunów prąd I_f wzbudzający strumień Φ_{fa} . Powstający w następstwie oddziaływania strumienia i prądu moment M_e nadaje wirnikowi prędkość obrotową n , zwroty M_e i n są zgodne. Indukująca się w uzwojeniu twornika sem E ma zwrot przeciwny do zwrotu napięcia U i jest od niego mniejsza. Stąd, w przypadku silnika

$$U = E + R_{at} I_t$$

$$I_t = \frac{U - E}{R_{at}}, \quad \Delta U = R_{at} \cdot I_t \quad (10a, b)$$

gdzie: ΔU - spadek napięcia na tworniku

Wprowadzając do wzoru (10) zależność (7), otrzymujemy wyrażenie na prędkość obrotową silnika, lub kątową:

$$n = \frac{U - R_{at} I_t}{C_E \Phi_{fa}} \quad \text{lub} \quad \omega = \frac{U - R_{at} I_t}{C \Phi_{fa}} \quad (11), (12)$$

W tabelicy 1 zestawiono podstawowe zależności prądnic i silników prądu stałego.

Tablica 1 Podstawowe zależności dotyczące maszyn elektrycznych prądu stałego

Prądnic	Prądnic i silnik	Silnik
$U = E - R_{at} \cdot I_t$	$E = C \Phi_{fa} \cdot n$ <u>lub</u> $E = C \Phi_{fa} \cdot \omega$ $M_e = C \Phi_{fa} \cdot I_t$	$U = E + R_{at} \cdot I_t$ $\omega = \frac{U - R_{at} I_t}{C \Phi_{fa}}$ <u>lub</u> $n = \frac{U - R_{at} I_t}{C_E \Phi_{fa}}$

Moc mechaniczną na wale wirnika, wyrażoną w watach (W), określa wzór:

$$P_s = M_s \omega = \frac{M_s 2\pi \cdot n}{60} \quad [\text{W, Nm, obr/min}] \quad (13)$$

w którym: M_s - moment na wale, [N· m]; ω - prędkość kątowa, [rad/s];

n - prędkość obrotowa, [obr/min] , lub

$$P_s = 0,1047 M_s n \quad (14)$$

gdzie: M_s - moment na wale, [N· m], n - prędkość obrotowa, [obr/min] , lub

$$P_s = 1,027 M_s n \quad (15)$$

gdzie: M_s - moment na wale, [kG· m], n - prędkość obrotowa, [obr/min]

2.3. Straty energii i sprawność maszyn

Procesowi przemiany energii elektrycznej na mechaniczną lub odwrotnie towarzyszą straty energii, które można podzielić na dwie grupy:

- **straty jałowe** - niezależne od obciążenia:

ΔP_m – mechaniczne wywołane przez tarcie w łożyskach i tarcie szczotek o komutator na potrzeby wentylacji,

ΔP_{Fe} – od histerezy i od prądów wirowych w rdzeniu twornika oraz w nabiegownikach,

ΔP_f - w rezystancji bocznikowego uzwojenia wzbudzenia.

- **straty obciążeniowe** – występujące tylko przy obciążeniu maszyny:

$$\Delta P_{at} = R_{at} I_t^2 \text{ – straty w rezystancji obwodu twornika}$$

$$\text{całkowite straty wynoszą: } \Delta P = \Delta P_m + \Delta P_{Fe} + \Delta P_f + \Delta P_{at}$$

Sprawność maszyny określamy wzorami

$$\eta = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} \quad \text{lub} \quad \eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} \quad (17)$$

gdzie: P_1 – moc pobierania przez maszynę P_2 – moc oddawana przez maszynę

2.4. Oddziaływanie twornika

Prąd I_t płynący przez uzwojenie twornika wytwarza strumień magnetyczny Φ_a , który można podzielić na dwie składowe:

Φ_{dq} – występujący w strefie obojętnej (w pobliżu osi obojętnej)

Φ_{ad} – występujący pod biegunami głównymi

Następstwem działania strumienia Φ_{aq} jest nieznaczne przesunięcie osi obojętnej. Strumień Φ_{ad} powoduje zmniejszenie strumienia głównego, a tym samym zmniejszenie sem E i momentu M_e . Rozmagnesowujące działanie prądu I_t nazywamy oddziaływaniem (reakcją) twornika.

Uzwojenie kompensacyjne pokazane na rysunku 2 ma za zadanie wytworzenie strumienia magnetycznego o przeciwnym zwrocie do Φ_{ad} i o analogicznym rozkładzie. Jest ono połączone szeregowo z uzwojeniem twornika i płynie przez nie ten sam prąd I_t

2.5. Komutacja

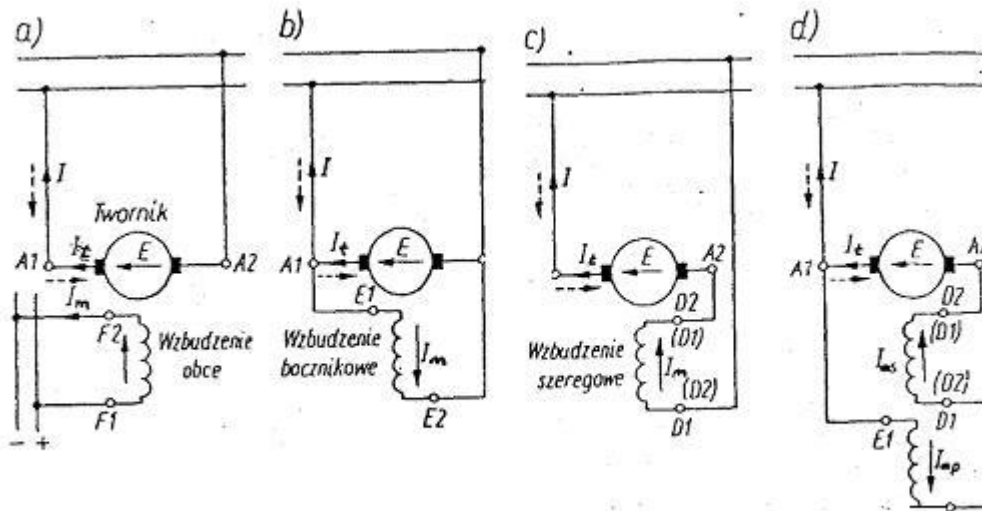
Uzwojenie wirnika o 2Na bokach stanowi zamknięty obwód elektryczny, w którym wypadkowa sem jest równa zero. Szczotki dzielą to uzwojenie na a par gałęzi równoległych w taki sposób, że każda gałąź ma N/a boków. Podczas wirowania poszczególne boki zmieniają się w gałęziach, lecz suma ich jest zawsze stała. W boku przechodzącym z jednej gałęzi do drugiej następuje zmiana zwrotu prądu.

Przełączanie zwojów uzwojenia z jednej gałęzi do drugiej przy użyciu wycinków komutatora i szczotek oraz związane z tym zmiany zwrotu prądu w kolejnych zwojach nazywamy **komutacją**.

Ujemnym zjawiskiem towarzyszącym komutacji może być iskrzenie szczotek na skutek przyczyny natury mechanicznej lub elektrycznej.

2.6. Rodzaje maszyn

Sposób połączenia uzwojenia **twornika** i uzwojenia wzbudającego określa nazwę maszyny: **obcowzbudna** lub **samowzbudna** (bocznikowa, szeregowa i **szeregowo bocznikowa**). Na rys. 3. podano te połączenia.



Rys.3

Rys.3. Maszyny prądu stałego:

a) obcowzbudna; b) bocznikowa; c) szeregowa; d) bocznikowo – szeregowa (strzałki kreskowe i litery w nawiasach dotyczą pracy silnikowej)

3.Prądnica bocznikowa prądu stałego

3.1. Właściwości prądnicy

Pracę prądnicy prądu stałego określają cztery wielkości: prędkość obrotowa n lub kątowna ω , prąd wzbudzenia I_m , napięcie na zaciskach prądnicy U oraz prąd obciążenia I .

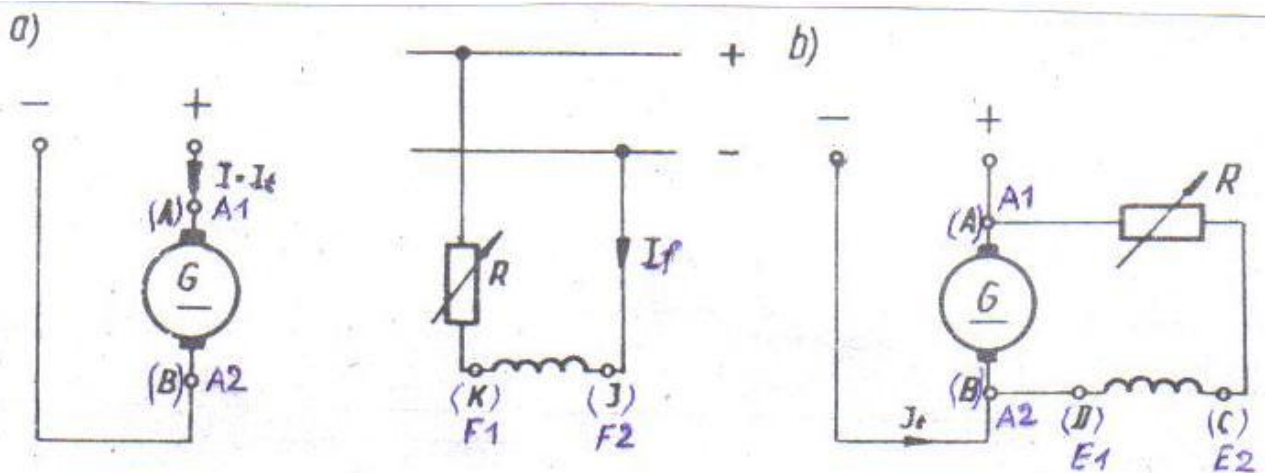
W praktyce, prędkość obrotowa n ma zwykle stałą wartość i wobec tego sporządza się charakterystyki wiążące pozostałe trzy wielkości, przy czym rozróżnia się trzy grupy charakterystyk:

- **charakterystyki biegu jałowego** $E_o = f(I_f)$ przy $I_t = 0$, i $n = \text{const}$
- **charakterystyki obciążenia** $U = f(I_f)$ przy $I_t = \text{const}$ i $n = \text{const}$;
- **charakterystyki zewnętrzne** $U = f(I_t)$ przy $I_f = \text{const}$ i $n = \text{const}$;
- **charakterystyki regulacyjne** $I_f = f(I_t)$ przy $U = \text{const}$ i $n = \text{const}$.

3.2. Rodzaje prądnic bocznikowych prądu stałego

Ze względu na szersze zastosowanie prądnicy bocznikowej oraz jej badanie laboratoryjne w ćwiczeniu - jej właśnie zostanie poświęcone dalsze omówienie dotyczące charakterystyk, jak i ich wyznaczania.

Prądnice te w zależności od zasilania uzwojenia wzbudzenia mogą być samowzbudne i obcowzbudne. Prądnicę obcowzbudną (rys. 4a) otrzymujemy poprzez zasilanie uzwojenia wzbudzenia z obcego, niezależnego źródła prądu stałego. W przypadku zaś, gdy uzwojenie wzbudzenia przyłączone jest do zacisków twornika, prądnica jest prądnicą samowzbudną (rys. 4b).



Rys. 4. Schematy połączeń prądnicy bocznikowej a) obcowzbudnej, b) samowzbudnej

Na rysunku 4 (w nawiasach podano nieaktualne oznaczenia: AB -uzwojenie twornika, CD - uzwojenie bocznikowe prądnicy samowzbudnej, KJ - uzwojenie wzbudzenia prądnicy obcowzbudnej) - spotykane w maszynach starszej generacji.

W przypadku prądnicy samowzbudnej (rys. 4b) uzwojenie wzbudzenia E1 - E2 połączone jest równoległe z uzwojeniem twornika A1 - A2 i prąd obciążenia pobierany przez prądnicę z sieci jest równy sumie prądu twornika I_t i prądu magnesującego I_f .

W obwodzie wzbudzenia prądnicy samowzbudnej znajdują się bieguny magnesów posiadające magnetyzm szczątkowy, warunkujący istnienie strumienia remanencji, koniecznego do samowzbudzenia się prądnicy i tym samym zdolności do pracy prądnicy.

Proces samowzbudzenia

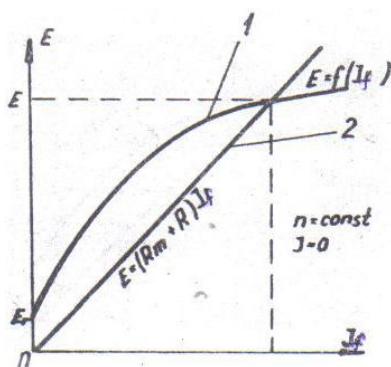
Jeżeli istnieje magnetyzm szczątkowy, to pod wpływem niewielkiego strumienia remanencji Φ_r w obracającym się ze stałą prędkością obrotową uzwojeniu twornika indukuje się niewielka sem E_r , zwana napięciem remanencji $E_r = c \Phi_r n$.

W stanie biegu jałowego w obwodzie: uzwojenie wzbudzenia - uzwojenie twornika, popłynie niewielki prąd, wytwarzając znów niewielki strumień magnetyczny.

Jeśli strumień ten ma ten sam zwrot, co strumień remanencji, to wypadkowy strumień wzrośnie i w uzwojeniu twornika powstanie większa sem E . Wzrost ten spowoduje wzrost prądu magnesującego, a zatem i strumienia i zjawisko to będzie się powtarzać, aż do

ustalenia się w tworniku sem E , której wartość można określić z przecięcia się dwu charakterystyk (rys. 5): charakterystyki $E = f(I_f)$ i charakterystyki napięciowo-prądowej obwodu wzbudzenia $E = f(R_f + R)$, gdzie R_f oznacza rezystancję uzwojenia

wzbudzenia, a R - rezystancję rezystora regulacyjnego w obwodzie wzbudzenia (rys. 5).



Rys. 5. Graficzne wyznaczenie wartości sem E

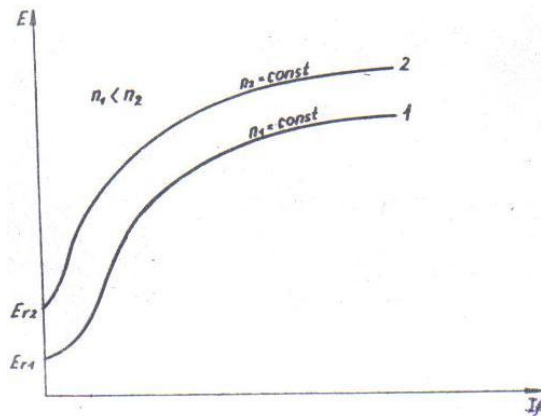
Aby samowzbudna prądnica mogła się wzbudzić do pełnego napięcia muszą być spełnione następujące warunki:

- istnienie magnetyzmu szczątkowego,
- zwrot prądu wzbudzenia winien być taki, by strumień wywołany przez ten prąd wzmacniał strumień remanencji,
- napięcie remanencji powinno stanowić około 2-3% sem biegu jałowego,
- rezystancja obwodu: uzwojenie wzbudzenia - uzwojenie twornika powinna być niewielka.

3.3. Charakterystyki prądnicy bocznikowej prądu stałego

3.3.1. Charakterystyka biegu jałowego

Charakterystyka biegu jałowego jest zależnością sem E na zaciskach prądnicy od prądu . wzbudzenia I_f przy stałych obrotach - $n = \text{const}$, oraz prądzie twornika $I_t = 0$ (rys.6) Strumień magnetyczny Φ zależy od wartości prądu wzbudzenia I_f , a więc zmieniając wartość rezystancji R (Rysunki 4a i b) zmieniamy Φ , a tym samym zgodnie ze wzorem 7 wartość sem E , która wzrasta wraz ze wzrostem I_f . Od chwili, gdy obwód magnetyczny prądnicy zaczyna wykazywać nasycenie, sem E wzrasta wolniej. Powoduje to zagięcie się charakterystyki biegu jałowego. Przy pewnej wartości prądu I_f obwód magnetyczny prądnicy ulega nasyceniu (charakterystyka biegu jałowego przebiega równoległe do osi odciętych) i dalszy wzrost prądu wzbudzenia nie powoduje wzrostu sem E .

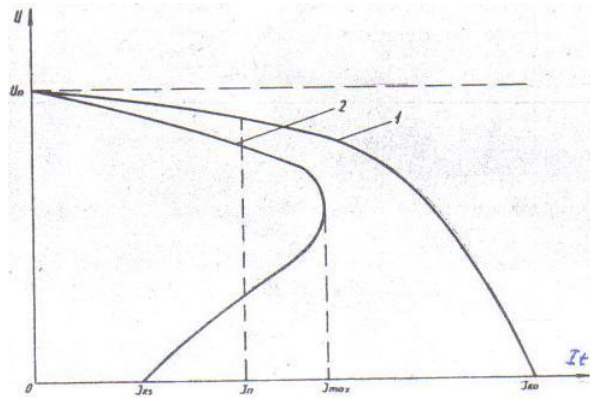


Rys. 6. Charakterystyki biegu jałowego: a) przy zwiększaniu i zmniejszaniu prądu wzbudzenia.(linia kreskowa wypośrodkowana),
b) Charakterystyki dla dwu różnych prędkości obrotowych.

Charakterystyka biegu jałowego jest, więc krzywą magnesowania dla prądnicy przy $n = \text{const}$. Gdyby prędkość obrotowa wirnika (twornika) była większa, czyli $n_2 > n_1$, to krzywa biegu jałowego miałaby ten sam charakter, tylko wartości jej przesunęłyby się do góry (krzywa z rys.6b).

3.3.2. Charakterystyki zewnętrzne prądnicy samowzbudnej i obcowzbudnej

Charakterystyki zewnętrzne (rys.7.) przedstawiają napięcie na zaciskach prądnicy w funkcji obciążenia, czyli $U = f(I_t)$ przy stałej prędkości obrotowej wirnika $n = \text{const}$.



Rys. 7. Charakterystyki zewnętrzne prądnic $U=f(I_t)$: 1 - obcowzbudnej, 2 - samowzbudnej bocznikowej; I_{KS} – prąd zwarcia prądnicy samowzbudnej, I_{KO} - prąd zwarcia prądnicy obcowzbudnej

Obniżanie się wartości napięcia na zaciskach samowzbudnej prądnicy bocznikowej wraz ze wzrostem prądu obciążenia jest związane nie tylko z oddziaływaniem twornika oraz ze spadkiem napięcia na rezystancji twornika, ale także ze zmniejszeniem się prądu magnesującego. Dla prądnicy samowzbudnej przy stałej rezystancji R_f obwodu wzbudzenia przyłączonego do szczotek, prąd magnesujący:

$$I_f = \frac{U}{R_f + R} \quad (19)$$

będzie się zmniejszał wraz ze zmniejszaniem napięcia U na zaciskach prądnicy.

Spowoduje to zmniejszenie się strumienia indukcji magnetycznej Φ a zatem i sem E , co prowadzi do ponownego zmniejszenia napięcia U .

Przy znacznych przeciążeniach prądnicy. spadek napięcia może być tak duży, że przy dalszym zmniejszaniu rezystancji odbiornika R_{zew} w obwodzie zewnętrznym prądnicy prąd

$$I = \frac{U}{R_{zew}} \quad (20)$$

nie wzrasta lecz opada, gdyż wartość U maleje szybciej niż wartość R_{zew} .

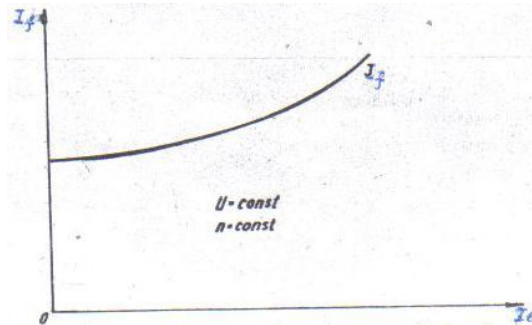
Na rys. 7. linią przerywaną oznaczony jest obszar przeciążeń prądnicy. Po osiągnięciu prądu maksymalnego I_{max} dla danej maszyny, prąd twornika maleje do wartości I_k , co

Odpowiada stanowi zwarcia prądnicy. Wówczas $R_{zew}=0$ oraz napięcie prądnicy $U = 0$. Dla stanu zwarcia prąd magnesujący $I_f = 0$, a wartość sem $E = E_r$ zależy tylko od pozostałości magnetycznej.

Obcowzbudne prądnice bocznikowe ze względu na stałe niezależne od prądu obciążenie napięcia zasilania uzwojenia wzbudzenia mają bardziej sztywne charakterystyki zewnętrzne. Ilustruje to rys. 7.

3.3.3. Charakterystyka regulacyjna

Charakterystyką regulacyjną prądnicy bocznikowej jest zależność prądu wzbudzenia I_f od prądu obciążenia I_t przy stałej prędkości obrotowej wirnika n i przy stałym napięciu U na zaciskach prądnicy (rys. 8).



Rys. 8. Charakterystyka regulacyjna prądnicy bocznikowej

Wraz ze wzrostem prądu obciążenia I rośnie wartość prądu twornika I_t , a więc zgodnie ze wzorem 1 wzrasta spadek napięcia na uzwojeniu twornika, co powoduje obniżenie się napięcia U na zaciskach prądnicy (charakterystyka zewnętrzna – rys. 7). Zmniejszaniu się wartości U , przy stałej prędkości obrotowej wirnika prądnicy n , można przeciwdziałać tylko przez zwiększenie prądu wzbudzenia (wzór 19). Wygięcie charakterystyki regulacyjnej jest spowodowane koniecznością znacznego zwiększenia prądu wzbudzenia ze względu na rosnące wraz z prądem twornika rozmagnesowujące oddziaływanie pola twornika.

3.3.4. Zastosowanie maszyn prądu stałego

Prądnice bocznikowe prądu stałego znalazły zastosowanie w realizacji takich procesów, technologicznych jak galwanizacja, galwanostegia czy galwanoplastyka. Sprzężone z wirnikami trójfazowych maszyn synchronicznych zasilają ich uzwojenia wzbudzenia. Służą jako prądnice spawalnicze. Stosowane są także w specjalnych układach napędowych zwanych układami Leonarda. W automatyce małe prądnice bocznikowe są używane do pomiarów prędkości obrotowej. Jako źródła energii elektrycznej, samowzbudne prądnice bocznikowe stosują się w pojazdach samochodowych starszych modeli.

4. Silniki prądu stałego

4.1. Właściwości silników

Pracę silników prądu stałego określają następujące wielkości: napięcie zasilające U , moment obrotowy M , prąd obciążenia I , prąd wzbudzenia I_f , prędkość obrotowa n .

Właściwości silników, podobnie jak prądnic, określamy za pomocą charakterystyk takich jak:

- *charakterystyka prędkości obrotowej* zwana charakterystyką mechaniczną $n = f(M)$ lub obciążeniową przy $U = \text{const}$ i prądzie wzbudzenia $I_f = \text{const}$
- *charakterystyki regulacji prędkości obrotowej* $n = f(I_f)$ lub $n = f(U)$, przy $M = \text{const}$

Uwagi ogólne

Ze względu na sposób zasilania obwodu wzbudzenia rozróżnia się następujące typy silników prądu stałego:

- silniki obcowzbudne,
- silniki samowzbudne: bocznikowe, szeregowy i bocznikowo-szeregowy.

Schematy połączeń tych maszyn i przyjęte sposoby oznaczenia zacisków wszystkich obwodów podano na: rys.3 i 9. Własności ruchowe poszczególnych typów maszyn są różne.

Przyczyna tych różnic jest m.in. to, że przy pracy silnika obcowzbudnego lub bocznikowego zmiana prądu twornika nie wpływa na zmianę prądu wzbudzenia, podczas gdy w silniku szeregowym prąd wzbudzenia zmienia się przy zmianach prądu twornika. Natomiast własności silnika bocznikowego są identyczne z właściwościami silnika obcowzbudnego, ale jedynie przy stałej wartości napięcia sieci.

Różnorodne własności wszystkich typów maszyn pozwalają zaspokoić rozmaite wymagania praktyki. Pracę silnika prądu stałego charakteryzuje następujące wielkości znamionowe: napięcie zasilania twornika U_n , moment obrotowy M_n i zależny od niego prąd

twornika (obciążenie) I_m , prąd wzbudzenia I_{fn}

i prędkość obrotowa n_n i moc silnika P_n . Wielkości te powinny się znajdować na tabliczce znamionowej silnika. Własności ruchowe silników prądu stałego wszystkich typów można określić na podstawie równań:

$$M = c \cdot \phi \cdot I_t \quad (21)$$

$$U = E + R_t \cdot I_t \quad (22)$$

$$n = \frac{E}{c \cdot \phi} = \frac{U - R_t \cdot I_t}{c \cdot \phi} \quad (23)$$

w których M - moment obrotowy, Φ - strumień magnetyczny, U - napięcie: zasilania, R_t - rezystancja twornika.

W ustalonym stanie pracy, przy pewnym momencie obrotowym obciążenia działa równy mu co do wartości, lecz przeciwnie skierowany moment elektromagnetyczny (1). Odpowiadają mu określone wartości prądu twornika I_t i strumienia Φ , przy czym wartość strumienia zależy bądź od napięcia zasilania, jak to ma miejsce w silniku bocznikowym lub obcowzbudnym, bądź od prądu obciążenia w silniku szeregowym.

Na podstawie prądu twornika przy zadanej wartości napięcia zasilania U można określić wartość siły elektromotorycznej E , a na podstawie wartości E przy zadanej wartości strumienia szukaną prędkość obrotową n .

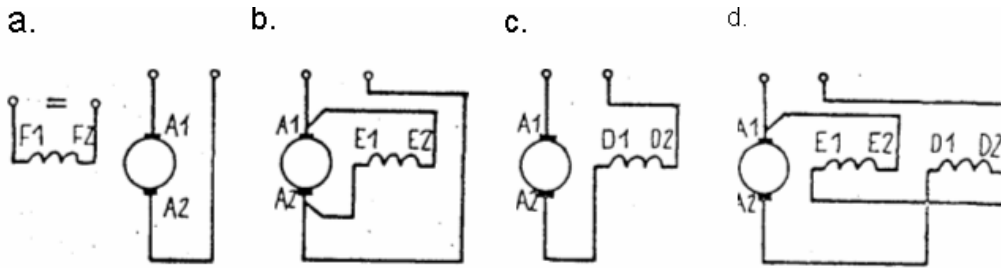
Najbardziej interesujące własności ruchowe silnika przedstawia się za pomocą charakterystyk otrzymanych z pomiarów w czasie badania silnika.

4.2 Rodzaje połączeń i oznaczenia uzwojeń silników prądu stałego

Jeżeli uzwojenie wzbudzenia nie jest połączone z uzwojeniem twornika, lecz zasilane jest z obcego źródła zasilania, to silnik taki nazywa się obcowzbudnym (rys. 9a). Końce uzwojenia twornika, oznacza się $A1$ i $A2$, a końce uzwojenia wzbudzenia, połączone z obcym źródłem zasilania $F1$ i $F2$.

Jeżeli uzwojenie wzbudzenia jest połączone z uzwojeniem twornika to silnik taki nazywa się silnikiem samowzbudnym. W zależności od sposobu połączenia uzwojenia, wzbudzenia z uzwojeniem twornika, silniki dzielą się na silniki bocznikowe, szeregowo i szeregowo - bocznikowe. Zasada połączenia silnika bocznikowego podana jest na rys. 9b. Końce bocznikowego uzwojenia wzbudzenia oznacza się $E1$ i $E2$ i są one połączone z zaciskami $A1$ i $A2$ twornika.

Rys. 9c przedstawia zasadę połączenia silnika szeregowego prądu stałego. Końce szeregowego uzwojenia wzbudzenia oznacza się przez $D1$ i $D2$. Jest ono połączone w szereg z uzwojeniem twornika i stąd nazwa tego typu silnika.

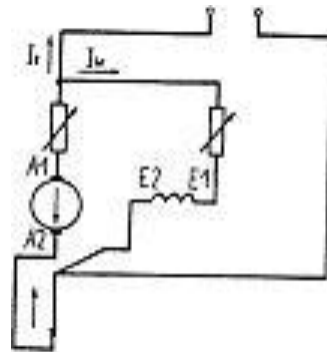


Rys. 9. Schematy połączeń silników prądu stałego; a- silnik obcowzbudny; b- silnik bocznikowy; c- silnik szeregowy, d- silnik bocznikowo-szeregowy.

Aby otrzymać silnik o właściwościach pośrednich pomiędzy właściwościami silnika bocznikowego i szeregowego stosuje się równocześnie uzwojenie szeregowe i bocznikowe wzbudzenia. Jest to silnik szeregowo-bocznikowy (rys. 9d).

4.3 Silnik bocznikowy prądu stałego

Właściwości silnika bocznikowego rozpatrzono przy założeniu stałej wartości napięcia zasilającego. Na rys. 10. podano schemat połączeń bocznikowego silnika prądu stałego. W obwodzie twornika znajduje się rezystor regulacyjny R_{tr} , a w obwodzie wzbudzenia rezystor regulacyjny R_{fr} . Rezystory te muszą być tak włączone, aby każdy z nich zapewnił regulację w swoim obwodzie niezależnie od drugiego.



Rys 10. Schemat połączeń silnika bocznikowego prądu stałego

4.4 Rozruch silnika bocznikowego

Najprostszym sposobem uruchomienia silnika bocznikowego jest przyłączenie go bezpośrednio do sieci bez jakichkolwiek rezystorów rozruchowych (rys.10., R_{tr} - zwarty). Przy nieruchomym tworniku indukowana w nim $E = 0$. Przez twornik płynie wtedy prąd:

$$I_{max} = U / R_t = (10 \div 20) I_m \quad (24)$$

Duża wartość początkowa prądu rozruchu może być dla maszyny elektrycznej bardzo niebezpieczna i dlatego rozruch bezpośredni dopuszczalny jest tylko w silnikach o bardzo małych mocach (mW, W). Aby nie dopuścić do nadmiernych wartości prądu rozruchu, należy stosować rozruch za pomocą rezystora rozruchowego. W miarę wzrostu prędkości obrotowej jego rezystancja jest zmniejszana stopniowo ręcznie lub automatycznie do 0 (rezystor zwarty).

4.5 Regulacja prędkości obrotowej silnika bocznikowego

Silniki prądu stałego mają bardzo dogodną możliwość regulacji prędkości obrotowej. Z zależności:

$$n = \frac{U - R_t \cdot I_t}{c \cdot \phi} = \frac{U - \frac{M}{c \cdot \phi} \cdot R_t}{c \cdot \phi} \quad (25)$$

wynikają trzy możliwości regulacji prędkości obrotowej silnika bocznikowego.

1. Regulacja prędkości obrotowej przez zmianę napięcia doprowadzonego do silnika.

Napięcie na zaciskach twornika można zmieniać od znamionowego teoretycznie do zera. Zmniejszanie napięcia U powoduje przesunięcie charakterystyki mechanicznej $n = f(M)$ w dół (rys.11a). Gdyby strumień silnika zachowywał stałą wartość, wówczas zgodnie z tą zależnością prędkość zmieniałaby się proporcjonalnie do napięcia i charakterystyki przebiegałyby równolegle względem siebie. Jednak w przypadku silnika bocznikowego prąd wzbudzenia maleje wraz ze zmniejszeniem doprowadzonego napięcia.

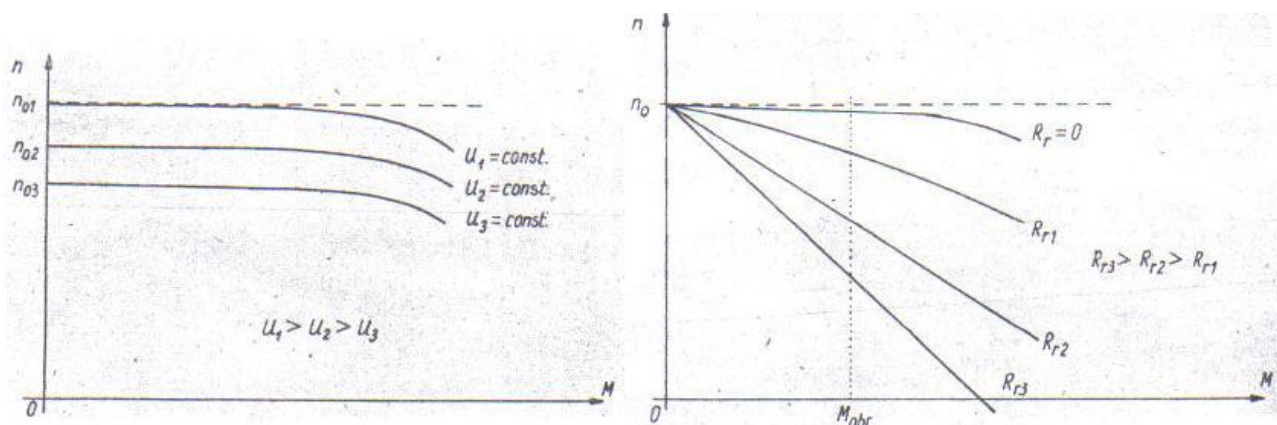
Ponieważ silniki zwykle pracują przy znacznym nasyceniu obwodu magnetycznego, więc w ostatecznym efekcie zależność między napięciem i prędkością nie jest liniowa. Zmianę napięcia doprowadzonego do silnika można uzyskać zasilając silnik z przekształtnika tyrystorowego. Jest to sposób ekonomiczny coraz szerzej stosowany.

1.Regulacja prędkości obrotowej przez zmianą spadku napięć w obwodzie twornika.

Zmianę napięcia doprowadzonego do zacisków twornika można uzyskać przez włączenie szeregowo w obwód twornika rezystora o zmiennej wartości np. R_{tr} (rys. 11b). Prąd twornika powoduje powstanie spadku napięcia na rezystorze, a więc na zaciskach twornika napięcie będzie mniejsze. Charakterystyki mechaniczne silnika bocznikowego przy tym sposobie regulacji prędkości obrotowej, przedstawiono na

Jak widać włączenie dodatkowej rezystancji powodują znaczne zmniejszenie sztywności charakterystyki, co jest zjawiskiem niekorzystnym. Opisany wyżej sposób regulacji jest nieekonomiczny, ponieważ polega na wytracaniu części energii elektrycznej ($R_{tr} \cdot I_t^2$) na rezystancji

R_{fr} regulatora. Z tej to przyczyny nie stosuje się przy większych silnikach regulacji rezystorom włączanym w obwód prądu głównego.

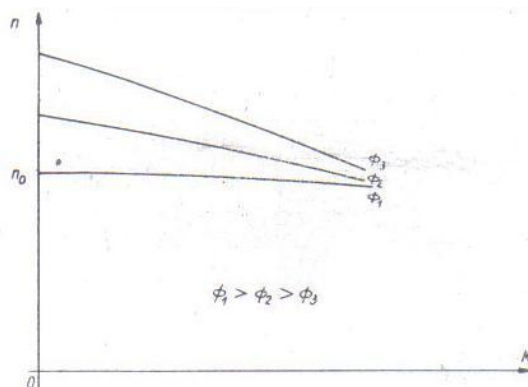


Rys. 11. Charakterystyki mechaniczne silnika bocznikowego prądu stałego przy regulacji prędkości obrotowej a) przez zmianę napięcia, b) przez zmianę spadku napięcia w obwodzie twornika; n_0 - prędkość obrotowa biegu jałowego

2. Regulacja prędkości obrotowej przez zmianę strumienia wzbudzenia.

Zmianę strumienia wzbudzenia można osiągnąć włączając w obwód wzbudzenia zmienny rezystor np. R_{fr} (rys. 10). Włączenie takiego regulatora spowoduje zmniejszenie się prądu magnesującego I_f , zmniejszy się więc strumień magnetyczny Φ , a prędkość obrotowa wzrośnie (rys. 12). W ten sposób osiąga się regulację prędkości obrotowej powyżej prędkości obrotowej n_0 . Powyższa regulacja prędkości obrotowej jest ekonomiczna, ale silnik elektryczny nie będzie w pełni wykorzystany. Będzie on pracował przy zmniejszonym strumieniu, a więc przy nie wykorzystanym w pełni obwodzie magnetycznym. Zakres regulacji prędkości obrotowej strumieniem jest ograniczony ze względów konstrukcyjnych. Każdy typ silnika ma pewną graniczną prędkość obrotową, której nie można przekroczyć ze względu na mechaniczną wytrzymałość twornika. Poza tym regulacja strumienia jest ograniczona ze względów elektrycznych, ponieważ przy osłabionym polu silniej jest odczuwalny wpływ pola magnetycznego twornika, co może spowodować niestabilną pracę silnika.

Ponadto pogarsza się komutacja i pojawia iskrzenie pod szczotkami. Wskutek tego nie stosuje się większego zakresu regulacji prędkości obrotowej strumieniem niż 1:3.



Rys. 12. Charakterystyki mechaniczne silnika bocznikowego prądu stałego przy regulacji prędkości obrotowej przez zmianę strumienia wzbudzenia

4.6. Charakterystyki robocze (obciążeniowe) silnika

Charakterystykę mechaniczną $n = f(M)$ przedstawia rys. 13 = krzywa, zaś charakterystykę $I_f = f(M)$ przy $U = \text{const}$, $I_f = \text{const}$, rys. 13 krzywa b.

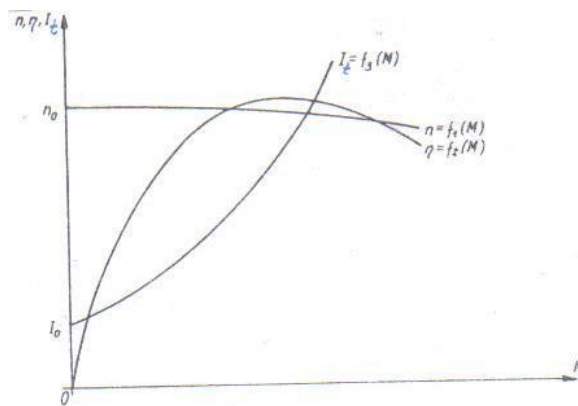
Zgodnie z wzorem (25), przy pominięciu oddziaływania twornika prąd I_f rośnie liniowo wraz ze wzrostem momentu. Na skutek oddziaływania twornika zmniejszającego strumień, wzrost prądu jest szybszy niż wynikałoby to z liniowej zależności. Całkowity prąd I niewiele różni się od prądu I_f . Przy momencie użytecznym równym zero, przez silnik płynie prąd biegu jałowego I_0 , przy prędkości obrotowej biegu jałowego n_0 .

Charakterystykę sprawności silnika od momentu obciążenia $\eta = f(M)$ przy $U = \text{const}$ i $I_f = \text{const}$ podano na rys.13 – krzywa c

Straty w silniku są równe sumie: strat stałych, niezależnych od obciążenia i strat zmieniających się ze zmianą obciążenia. W miarę wzrostu mocy pobranej przez silnik rosną straty obciążeniowe przy niezmiennych stratach stałych. Strat obciążenia są proporcjonalne do kwadratu prądu pobieranego przez silnik.

W związku z tym sprawność rośnie od wartości równej zero (bieg jałowy silnika) do pewnej wartości maksymalnej, występującej przy takim obciążeniu maszyny, przy którym stałe straty są równe stratom obciążenia.

Maksimum sprawności osiąga silnik przy obciążeniu równym około 80% obciążenia znamionowego. Następnie sprawność silnika maleje, bowiem straty obciążenia rosną szybciej niż moc oddana przez silnik.

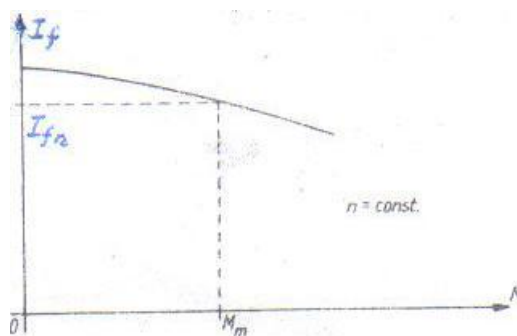


Rys.13. Charakterystyki robocze silnika bocznikowego prądu stałego,
 a - charakterystyka mechaniczna $n = f(M)$;
 b - charakterystyka $I_f = f(M)$ przy $U = \text{const.}$, $I_f = \text{const.}$;
 c - charakterystyka $\eta = f(M)$ przy $U = \text{const.}$, $I_f = \text{const.}$

4.7. Charakterystyka regulacyjna

Jest to zależność $I_f = f(M)$ przy $n = \text{const.}$ i przedstawiono ją na rys. 14.

Charakterystyka ta daje odpowiedź, jak należy zmieniać prąd wzbudzenia by utrzymać stabilne obroty silnika przy jego obciążeniu biorąc pod uwagę przebieg charakterystyki mechanicznej (rys. 14 krzywa a) oraz zależność [11] i [25].



Rys. 14. Charakterystyka regulacyjna silnika bocznikowego prądu stałego $I_f = f(M)$

5. Pomiary

W części wykonawczej ćwiczenia (protokole pomiarowym –plik M1 protokol) podano:

- schemat pomiarowy i opis czynności pomiarowych ,
- tabele do wpisywania wyników pomiarów oraz parametrów obliczeniowych,
- wzory i odpowiednie dane parametrów maszyn.

6 Literatura:

1. Praca zbiorowa, *Elektrotechnika i Elektronika dla nieelektryków*. WNT, 1995.
2. W.Wasiluk, *Maszyny i Urządzenia Elektryczne*. Skrypt PW, 1976r. Biblioteka Wydziałowa SiMR.
3. F. Przeździecki, *Elektrotechnika i Elektronika* PWN 1974.
4. G. Kamiński, J. Kosk, W. Przyborowski, *Laboratorium maszyn Elektrycznych*