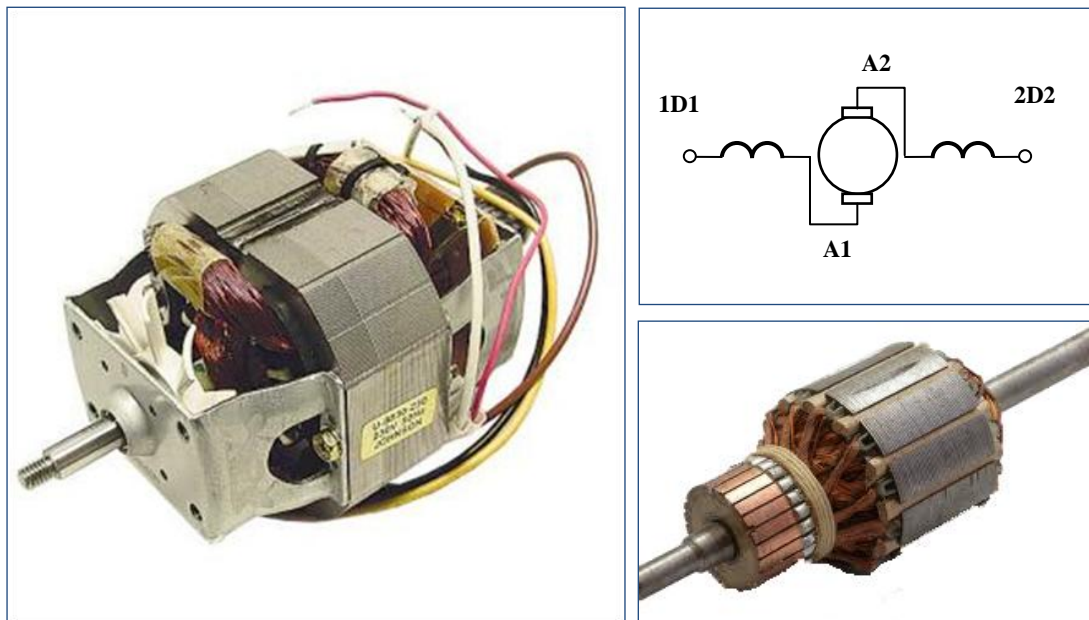


## WYKŁAD 18

### SILNIK UNIWERSALNY

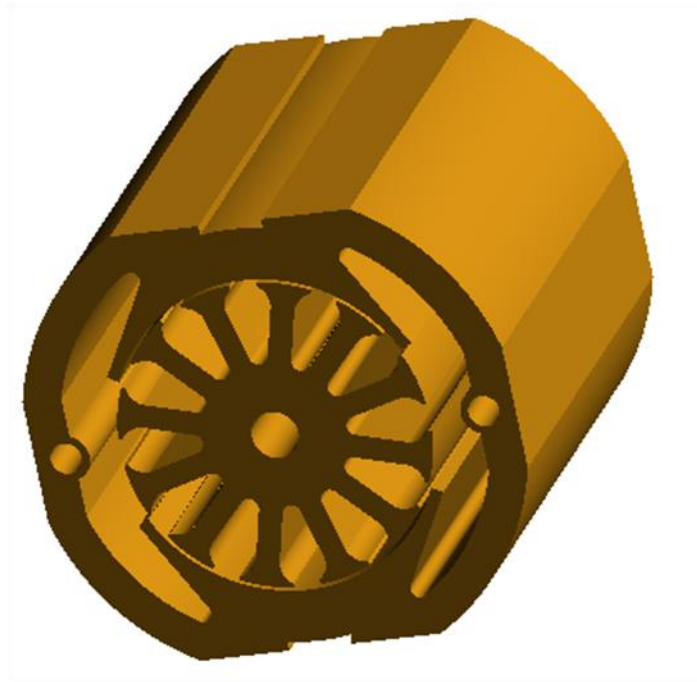
#### 18.1. Budowa i przeznaczenie silnika uniwersalnego

Jednofazowy silnik nazywany jest uniwersalnym, ponieważ może być zasilany zarówno napięciem stałym jak i przemiennym. Stojan jest wykonany z pakietu blach, którego uzwojenie składa się zwykle z dwóch cewek połączonych szeregowo. Wirnik, również zblachowany, posiada uzwojenie cewkowe, dwu lub czterowarstwowe, połączone w okrąg za pośrednictwem komutatora – tzw. uzwojenie pętlicowe. Uzwojenie wirnika jest połączone za pośrednictwem szczotek w szereg z uzwojeniem stojana – pomiędzy jego cewkami w celu ograniczenia emisji elektromagnetycznej. Silniki te charakteryzują się znacznym momentem rozruchowym oraz możliwością łatwej regulacji prędkości obrotowej w szerokim zakresie – nawet do kilkunastu tysięcy obrotów na minutę. Wadą tego rodzaju silników jest występowanie zestyku szczotkowego będącego główną przyczyną jego uszkodzeń.



Rys.18.1. Widok kompletnego silnika uniwersalnego(Johnson Electric), jego wirnika oraz schematu połączeń.

Silniki uniwersalne znajdują zastosowanie jako napęd do szybkoobrotowych urządzeń w gospodarstwie domowym, takich jak odkurzacze, młynki, suszarki czy miksery oraz w elektronarzędziach – wiertarki, pilarki i szlifierki.



Rys.18.2. Kształt obwodu magnetycznego silnika uniwersalnego.

## 18.2. Zasada działania przy zasilaniu napięciem stałym

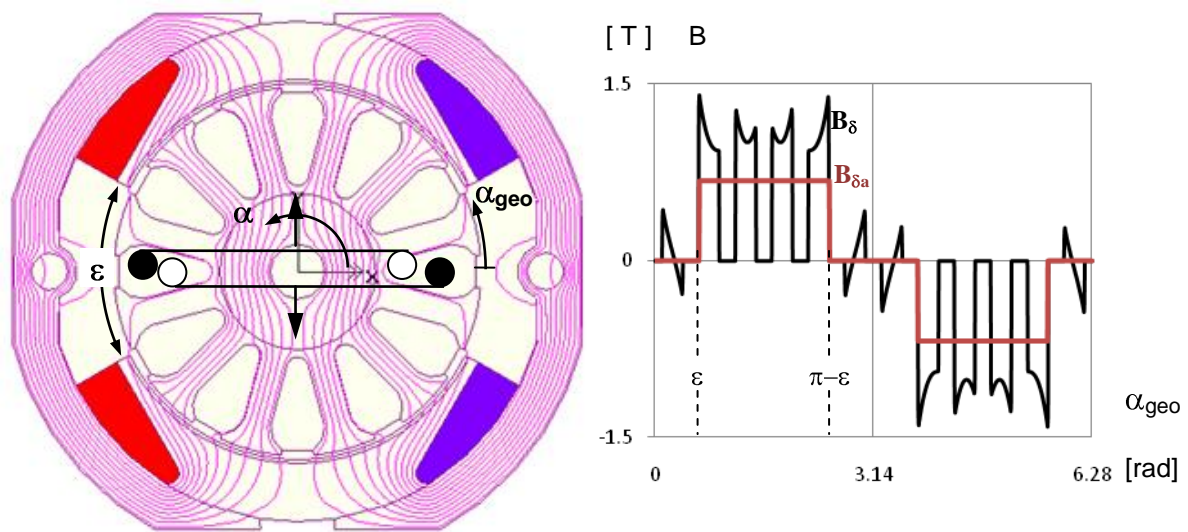
Cewki uzwojenia wzbudzenia wytwarzają stały w przestrzeni i w czasie strumień magnetyczny (przy pominięciu fluktuacji wywołanych zębokowaniem) którego izolnie pokazano na rys.18.3.a wraz z położeniem dwu przykładowych cewek uzwojenia wirnika o rozpiętości średnicowej, w których zaznaczono położenie ich początków i końców wytyczających w konsekwencji kierunku nawinięcia cewki i położenie jej osi magnetycznej. Widzimy, że strumienie skojarzone  $\Psi_k$  z tymi cewkami o zwojności  $N_k$  i polu powierzchni  $S_k$  mają dokładnie wartość przeciwną, co wynika z ich definicji

$$\Psi_k = N_k \iint_{S_k} \mathbf{B} \, d\mathbf{S}_k \quad (18.1)$$

Na rys.18.3.b zamieszczono rozkład przestrzennym składowej radialnej indukcji magnetycznej w szczelinie silnika  $B_\delta$  oraz przybliżoną funkcję  $B_{\delta a}$  aproksymującą rzeczywisty rozkład. Funkcja  $B_{\delta a}$  została wyznaczona z zależności zachowującej niezmienną wartość strumienia magnetycznego  $\Phi_\delta$  przechodzącego ze stojana do wirnika maszyny

$$\Phi_{\delta} = L \int_0^{\pi} B_{\delta} r_{\delta} d\alpha_{geo} = L r_{\delta} (\pi - 2\varepsilon) B_{\delta a} \quad (18.2)$$

gdzie  $r_{\delta}$  jest promieniem wodzącym środka szczeliny,  $L$  długością osiową pakietu rdzenia,  $2\varepsilon$  kątem środkowym pomiędzy nabiegownikami, a  $\alpha_{geo}$  oznacza współrzędną kątową w układzie cylindrycznym nieruchomym względem stojana. Silniki uniwersalne mają najczęściej jedną parę biegunów, przy czym w maszynach większej mocy spotyka się rozwiązania o  $p=2$ .



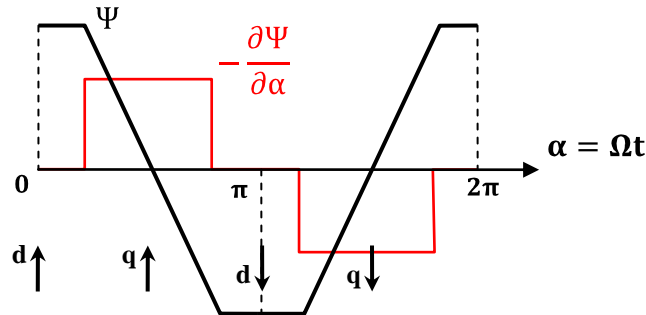
a. b.  
Rys.18.3. Skojarzenie pola magnetycznego wytworzonego przez uzwojenie wzbudzenia w silniku uniwersalnym o jednej parze biegunów z wybranymi cewkami uzwojenia wirnika w chwili  $t=0$ . Symbole  $\bullet$   $\circ$  na rys.a oznaczają początek i koniec cewki.

Załóżmy, że początek współrzędnej  $\alpha$  określającej przemieszczenie kątowe wirnika leży na osi  $Ox$  prostokątnego układu współrzędnych pokazanego na rys,18.3.a oraz kierunek wirowania jest przeciwny do ruchu wskazówek zegara. Zmiana strumienia skojarzonego z jedną z zaznaczonych cewek wirnika w miarę jej obracania się została pokazana na rys.18.4 Kąt obrotu  $\alpha$  przy stałej prędkości obrotowej  $n$  jest liniowo zależny od czasu

$$\alpha = \Omega t \quad (18.3)$$

gdzie  $\Omega=2\pi n$  jest częstością kątową. Siła elektromotoryczna (SEM) rotacji  $e_{rk}(t)$  indukowana w  $k$ -tej cewce w odbiornikowej konwencji oznaczeń działa przeciwnie do dodatniego kierunku nawinięcia cewki (dodatniego kierunku prądu) i wynosi po uwzględnieniu (18.2)

$$e_{rk}(t) = \frac{\partial \Psi_k(t)}{\partial \alpha} \frac{d\alpha}{dt} = \frac{\partial \Psi_k(t)}{\partial \alpha} \Omega = 2\pi n N_k L r_\delta \int_0^\pi \frac{\partial}{\partial \alpha} B_\delta(\alpha) d\alpha \quad (18.4)$$



Rys.18.4. Zmienność strumienia skojarzonego ( $p=1$ ) z wybraną cewką uzwojenia wirnika w funkcji kąta obrotu – w chwili  $t=0$  oś magnetyczna cewki jest skierowana wzdłuż osi  $\mathbf{d}$  biegunów stojana.

Dla uzwojenia o cewkach średnicowych (o rozpiętości  $\pi$ ) uzyskuje się

$$e_{rk}(t) = 4\pi n N_k L r_\delta (\pi - \varepsilon) B_{\delta a}(\Omega t) \quad (18.5)$$

Zauważamy, że przebieg SEM rotacji w czasie jest przeskalowanym przebiegiem indukcji magnetycznej w szczelinie wzdłuż obwodu maszyny. Odzworowanie to jest dokładne dla cewek średnicowych, w przypadku cewek skróconych obserwuje się pewne wygładzenie przebiegu czasowego w stosunku do przestrzennego. Kolejne cewki wirnika są przesunięte w przestrzeni o kąt  $\Delta\alpha$  wynikający z liczby żłobków  $Z$  i połączone w szereg – rys.18.5.

$$\Delta\alpha = \frac{2\pi}{Z} \quad (18.6)$$

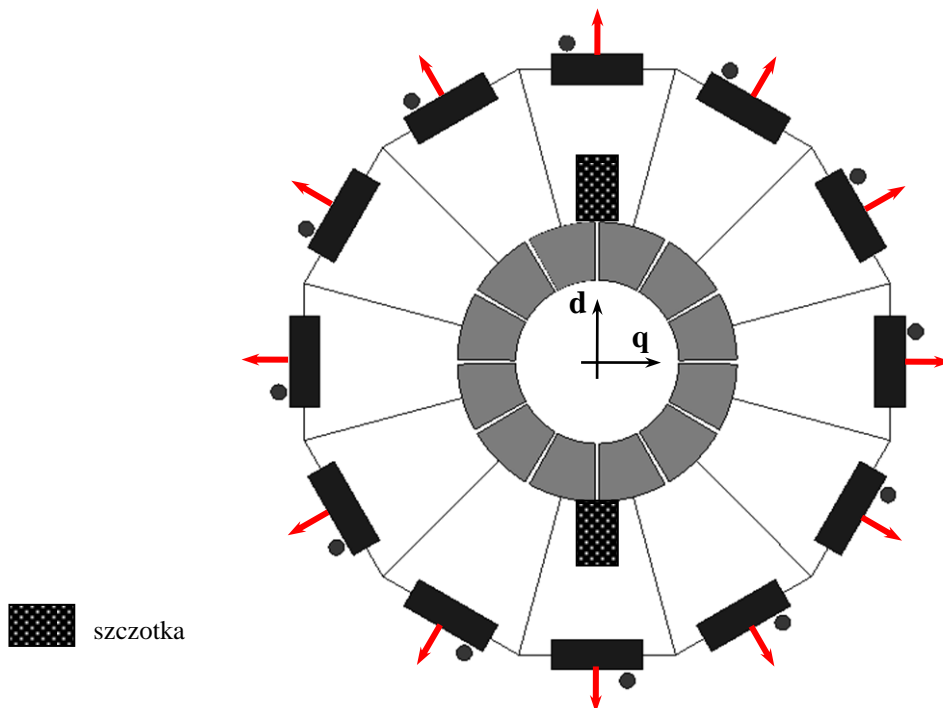
Oznaczając kierunek leżący w osi biegunów przez  $\mathbf{d}$  a obrońcy o  $\pi/2$  przez  $\mathbf{q}$ , możemy powiązać wzajemne położenie cewek wirnika, dołączonych do nich wycinków komutatora oraz pola stojana, co pokazano na rys.18.5. Liczba wycinków komutatora  $u_K$  jest równa liczbie cewek w uzwojeniu wirnika, te zaś wynikają z liczby warstw  $u_W$  uzwojenia w żłobku.

$$u_K = Z \frac{u_W}{2} \quad (18.7)$$

Liczba wycinków komutatora decyduje o gładkości przebiegu SEM w czasie a więc także o przebiegu momentu elektromagnetycznego. W małych silnikach  $u_W=2$ , w większych  $u_W=4$ .

Szczotki muszą być ustawione w taki sposób, aby napięcie pomiędzy nimi było maksymalne, czyli uzyskanie wymaganej mocy wewnętrznej zachodziło przy możliwie

małym natężeniu prądu. Uzyska się to jeżeli wypadkowa oś magnetyczna układu szeregowo połączonych cewek w gałęzi uzwojenia twornika będzie pokrywać się z osią  $q$  silnika - zob. rys.18.4. – wtedy wszystkie SEM cewek w gałęzi będą tego samego znaku. Podkreślmy wyraźnie że wartość chwilowa SEM indukowanej w dowolnej cewce wirnika przy ustalonym jej położeniu względem stojana jest zawsze taka sama. Wynika ona z iloczynu strumienia skojarzonego czyli indukcji w szczelinie i cosinusa kąta pomiędzy lokalną osią  $d_k$  cewki i osią  $d$  stojana oraz faktu czy strumień ten, przy ustalonym kierunku wirowania, maleje – od wartości dodatnich do ujemnych. czy przeciwnie - rośnie. W wyniku tego siły elektromotoryczne w cewkach o osiach magnetycznych różniących się kierunkiem składowej poprzecznej  $q$ , mierzona w ustalony sposób np. od początku do końca cewki, będą różnych znaków.



Rys.18.5. Chwilowe położenie względem stojana cewek uzwojenia wirnika (kropka oznacza początek cewki, strzałka jej oś magnetyczną) połączonych z wycinkami komutatora.

Wartość wypadkowej siły elektromotorycznej jest sumą wartości chwilowych w szeregowo połączonych cewkach, z pominięciem cewek zwartych przez szczotki. Te ostatnie nie biorą zresztą udziału w wytwarzaniu SEM ponieważ ich boki znajdują się w strefie o pomijalnej wartości indukcji magnetycznej w szczelinie – co oznacza, że przez pewien czas strumień z nimi skojarzony jest stały – maksymalny bądź minimalny, rys.18.3-4. Przyjmując,

że przerwa na obwodzie maszyny pomiędzy nabiegownikami równa  $\varepsilon$  w mierze łukowej jest proporcjonalna do liczby zwojów uzwojenia wirnika o zerowej SEM, to wypadkową SEM twornika  $E_{ar}$  (niezmienną w czasie) możemy obliczyć jako

$$E_{ar} = 4\pi n \frac{u_K}{2} N_K L r_\delta \pi^2 \left(1 - \frac{\varepsilon}{\pi}\right)^2 B_{\delta a} (\Omega t) \quad (18.8)$$

Iloczyn  $\pi r_\delta$  jest nazywany podziałką biegunową  $\tau$  a liczba  $u_K/2$  oznacza ile cewek jest połączonych szeregowo w gałęzi uzwojenia twornika. W rzeczywistej maszynie ze względu na skończone rozmiary wycinków komutatora i szczotek oraz oscylacje pola magnetycznego w podziałce żłobkowej występuje w wypadkowej sile elektromotorycznej oprócz składowej stałej  $E_{ar}$  również pewna składowa przemienna.

Wartość prądu płynącego przez silnik wynika z różnicy pomiędzy napięciem na jego zaciskach i indukowaną w uzwojeniu twornika siłą elektromotoryczną, której stała w czasie wartość występuje pomiędzy szczotkami na komutatorze. Wyrażenie (18.8) zwykle się redukuje do

$$E_{ar} = c_E \Phi n \quad (18.9)$$

Drugie prawo Kirchoffa może być zapisane jako

$$U = E_{ar} + I_a (R_{D1D2} + R_{A1A2}) + 2\Delta U_p \quad (18.10)$$

gdzie  $2\Delta U_p \cong 2V$  jest spadkiem napięcia na szczotkach praktycznie niezależnym od wartości prądu  $I_a$  płynącego przez silnik. Mnożąc obustronnie (18.10) przez  $I_a$  otrzymujemy bilans mocy w maszynie

$$UI_a = E_{ar}I_a + I_a^2 (R_{D1D2} + R_{A1A2}) + 2I_a \Delta U_p = E_{ar}I_a + \Delta P_a \quad (18.11)$$

Iloczyn  $E_{ar}I_a$  nazywamy mocą elektromagnetyczną  $P_e$  (wewnętrzną) maszyny, która może być zastąpiona definicyjną zależnością wiążącą moc i moment w ruchu obrotowym

$$E_{ar}I_a = P_e = 2\pi n M_e \quad (18.12)$$

Podstawiając (18.9) otrzymujemy wyrażenie na moment elektromagnetyczny w maszynie

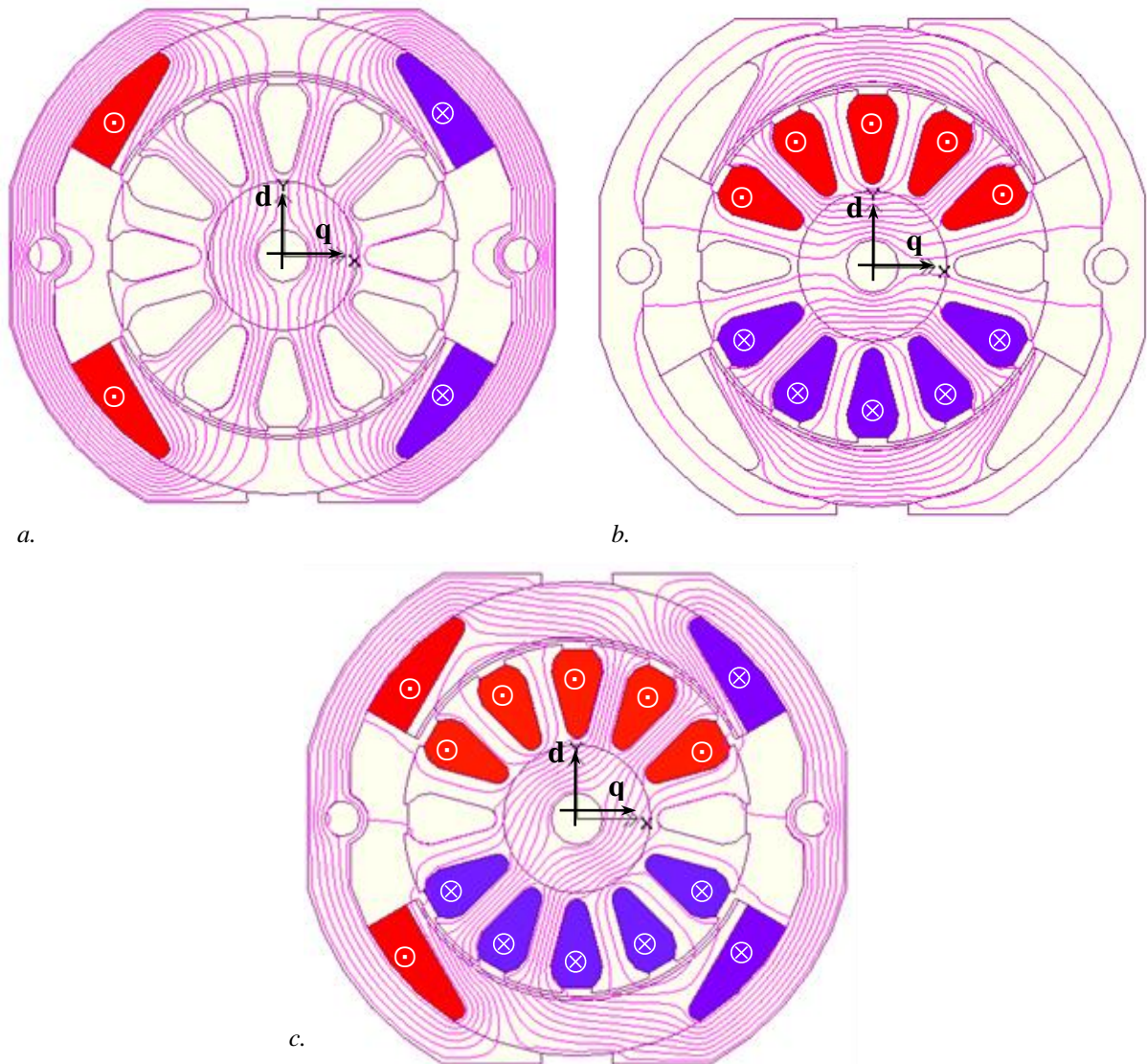
$$E_{ar}I_a = P_e = 2\pi n M_e = \frac{c_E}{2\pi} \Phi I_a \quad (18.13)$$

Moment elektromagnetyczny w stanie ustalonym jest z kolei równy sumie momentu obciążenia na wale silnika  $M_{me}$  i niewielkiego momentu mechanicznego wewnętrznego  $\Delta M_{me}$  wynikającego z oporów aerodynamicznych wywołanych przez wentylator i tarcia

w łożyskach. Zasada zachowania energii może być więc zapisana jako relacja pomiędzy mocą elektryczną  $P_{el}$  i mechaniczną  $P_{me}$

$$P_{el} = P_e + \Delta P_a = P_{me} + \Delta P_a + \Delta P_{me} \quad (18.14)$$

Na rys.18.6 pokazano przestrzenny rozkład linii strumienia magnetycznego w przekroju silnika, zarówno jego składowych jak i strumienia wypadkowego, wraz układem prądów w uzwojeniach maszyny. Dla cewek wirnika, których płaszczyzna zawiera oś  $q$ , natężenie prądu jest w przybliżeniu równe zero – w tych cewkach (zwarłych przez odpowiednie szczotki, rys.18.5) kierunek prądu zmienia swój kierunek – z  $+I_a$  na  $-I_a$  bądź odwrotnie. Proces ten nazywamy komutacją.



Rys.18.6. Rozkład strumienia magnetycznego i kierunków gęstości prądu w silniku uniwersalnym  
a. strumień uzwojenia wzbudzenia,  
b. strumień reakcji twornika,  
c. strumień wypadkowy.

Składowa rotacji siły elektromotorycznej w komutującej cewce jest, jak już wyjaśniono, równa zero, występuje natomiast SEM transformacji  $e_{kom}$  związana z indukcyjnością własną  $L$  cewki i wynikającą z wymuszonej przez komutator zmiany kierunku prądu o  $\Delta I_a = 2I_a$  w pewnym czasie  $\Delta t$

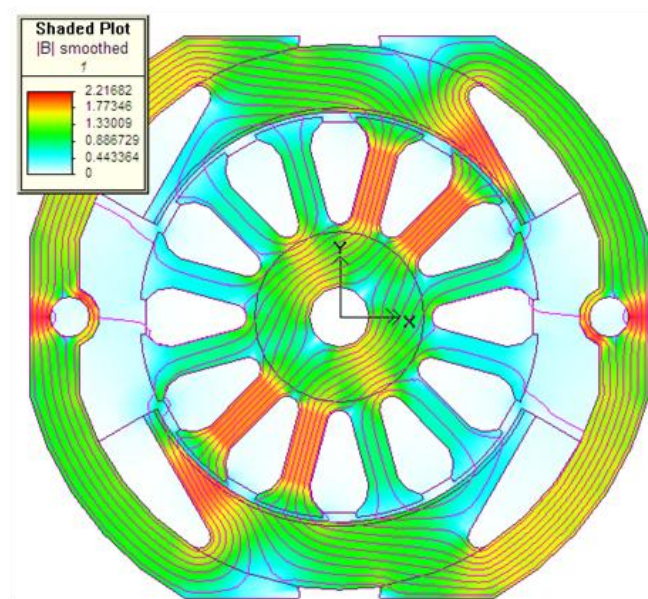
$$e_{kom} = L \frac{\Delta I_a}{\Delta t} \quad (18.15)$$

Dla znacznych prądów ta SEM może być przyczyną stosunkowo dużych prądów płynących w obwodzie zawierającym jedynie komutującą cewkę i zestyk szczotkowy, które objawiają się widocznym iskrzeniem.

Wypadkowy strumień magnetyczny w silniku obciążonym momentem jest obrócony o pewien kąt w stosunku do osi  $\mathbf{d}$ . Strumień ten generuje pole indukcji magnetycznej o lokalnych wartościach uzależnionych od wielkości przekroju obwodu magnetycznego w danym miejscu. Widzimy, że w obszarze zajęтым przez uzwojenia indukcja magnetyczna ma bardzo małą wartość. Oznacza to również, że tzw. siła Lorentza o gęstości objętościowej  $\mathbf{f}_L$  będącej produktem wektorowym gęstości prądu  $\mathbf{J}$  i indukcji  $\mathbf{B}$

$$\mathbf{f}_L = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (18.16)$$

nie odgrywa istotnej roli w wytwarzaniu momentu elektromagnetycznego



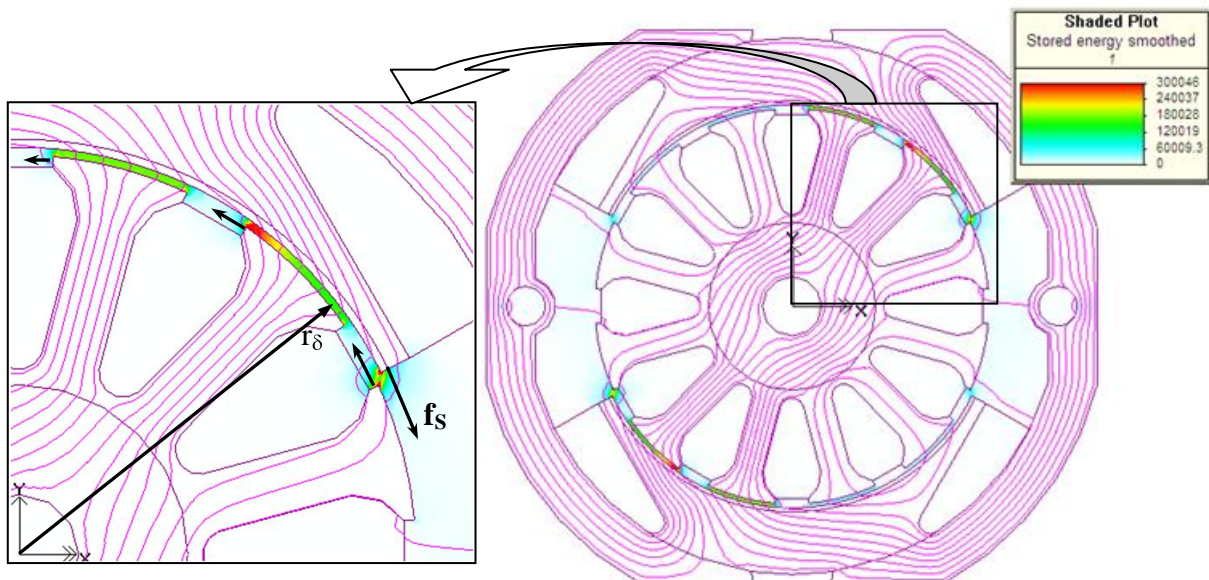
Rys.18.7. Rozkład strumienia magnetycznego w silniku uniwersalnym na tle mapy modulu indukcji.



Mechanizm wytwarzania momentu w maszynach posiadających ferromagnetyczne rdzenie wiodące strumień magnetyczny jest odmienny. Oprócz siły Lorentza o charakterze objętościowym istnieją siły powierzchniowe  $\mathbf{f}_s$  działające na powierzchnię graniczną ferromagnetyka i powietrza, przez którą przenika strumień magnetyczny. Są one skierowane praktycznie zawsze (pomijamy tu zjawisko tzw. lewitacji magnetycznej nie mające znaczenia w maszynach elektrycznych powszechnego użytku) w kierunku normalnym zewnętrznym  $\mathbf{n}$  w stosunku do ferromagnetyka

$$\mathbf{f}_s \cong \mathbf{n} \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (18.17)$$

Siły te występują jedynie w sąsiedztwie obszarów o znacznej wartości gęstości zmagazynowanej energii pola magnetycznego  $w_m$ , która to jest określona również zależnością (18.17), oczywiście z pominięciem wektora  $\mathbf{n}$ . Zbieżność ta nie jest przypadkowa, tym niemniej jej wyjaśnienie wymaga zastosowania zaawansowanego aparatu matematycznego wykraczającego daleko poza zakres wykładu. Na rys.18.8 pokazano obszary gdzie występuje duża gęstość tej energii i zaznaczono miejsca przyłożenia sił magnetycznych stycznych do wewnętrznego obwodu maszyny. Po wymnożeniu przez promień wodzący szczeliny mechanicznej  $r_\delta$  i zsumowaniu otrzymujemy wypadkowy moment elektromagnetyczny.



Rys.18.8. Przestrzenny rozkład gęstości energii magnetycznej  $[J/m^3]=[N/m^2]$  w przekroju obciążonego silnika uniwersalnego z zaznaczonymi miejscami występowania składowych stycznych powierzchniowych sił magnetycznych działających na stojan i wirnik.

Siły magnetyczne istnieją na wszystkich powierzchniach przez które przenika strumień, a więc również na tych które są prostopadłe do kierunku radialnego. Jednak w tym przypadku są one skierowane wzdłuż promienia a ich suma na całym obwodzie stojana bądź wirnika silnika jest równa zero. Siły te są odpowiedzialne za drgania konstrukcji maszyny i emitowany przez nią hałas.

### 18.3. Zasada działania przy zasilaniu napięciem przemiennym.

Układ połączeń silnika uniwersalnego przy zasilaniu napięciem przemiennym jest identyczny jak w przypadku napięcia stałego – w dowolnej chwili czasowej prąd w uzwojeniu wzbudzenia i uzwojeniu twornika ma taką samą wartość. Różnica polega na tym, że prąd przemienny zmienia swoją wartość sinusoidalnie w czasie

$$I_a(t) = I_{am}e^{j\omega t} \quad (18.18)$$

Strumień magnetyczny wytworzony przez ten prąd oblicza się na podstawie prawa Ampère'a identycznie jak przy prądzie stałym – dla danej chwili czasowej. Ze względu na zmienność w czasie przemienny strumień może indukować w ferromagnetycznym rdzeniu prądy wirowe, które z kolei wytworzą swój strumień przesunięty w fazie w stosunku do prądu wymuszającego o  $\pi/2$ . Wypadkowy strumień w obwodzie magnetycznym silnika będzie więc opóźniony względem prądu który go wywołał. Ponieważ obwód magnetyczny stojana i wirnika jest zblachowany, to przesunięcie to jest rzędu kilku stopni i ma nieznaczny wpływ na amplitudę strumienia wypadkowego. W dalszym ciągu wykładu efekt ten będzie pomijany, gdyż zasilanie prądem przemiennym wnosi do analizy szereg innych zjawisk o znacznie większym znaczeniu dla własności eksploatacyjnych silnika.

Pominięcie przesunięcia fazowego pomiędzy prądem silnika a jego strumieniem powoduje, że przytoczone wcześniej wyprowadzenie siły elektromotorycznej rotacji przy zasilaniu stałym napięciem może być zastosowane również obecnie przy założeniu tej samej wartości chwilowej natężenia prądu. Zmienność prądu w czasie jest przyczyną powstania drugiego składnika siły elektromotorycznej - SEM transformacji  $e_{at}(t)$ , który po uwzględnieniu sinusoidalności prądu (18.18) jest w postaci

$$e_{at}(t) = \frac{\partial \Psi}{\partial I_a} \frac{dI_a}{dt} = L \frac{dI_a}{dt} = j\omega L I_a \quad (18.19)$$

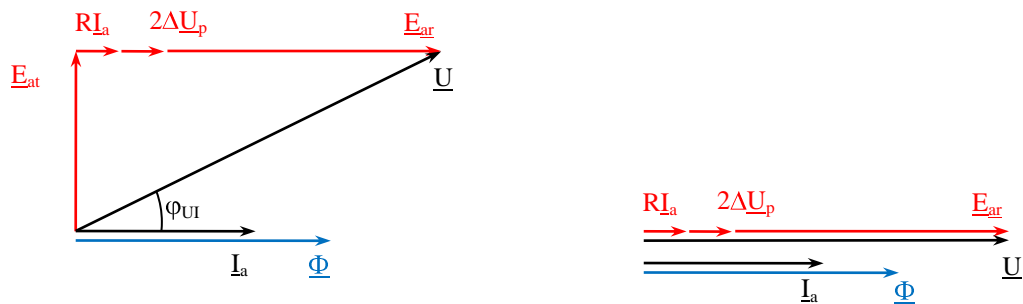
Uzwojenie silnika składa się z dwóch części: wzbudzenia D1D2 o osi magnetycznej  $\mathbf{d}$  oraz twornika A1A2 działające w osi  $\mathbf{q}$  – zob. rys.18.6.ab. Uzwojenia te nie są więc sprzężone magnetycznie (pomijamy tu efekty związane z nieliniowością obwodu magnetycznego) i wypadkowa indukcyjność  $L$  we wzorze (18.19) jest sumą wyłącznie indukcyjności własnych stojana i wirnika.

$$e_{at}(t) = (L_{D1D2} + L_{A1A2}) \frac{di_a}{dt} \quad (18.20)$$

Drugie prawo Kirchoffa wykorzystujące wartości chwilowe jest więc w postaci

$$u(t) = (R_{D1D2} + R_{A1A2})i_a(t) + e_{ar}(t) + e_{at}(t) + 2\Delta U_p \quad (18.21)$$

Porównując z (18.10) widzimy, że pojawił się tylko jeden nowy składnik, przy czym sumowanie ma teraz charakter wektorowy a nie arytmetyczny jak poprzednio. Wykresy wskazowe dla obydwu rodzajów zasilania zamieszczono na rys.18.9.



a.  
 Rys.18.9. Wykresy wskazowe silnika uniwersalnego  
 a. dla zasilania napięciem przemiennym,  
 b. dla zasilania napięciem stałym.

W wyniku otrzymaliśmy, że przy zasilaniu prądem przemiennym dla otrzymania tego samego natężenia prądu  $i$  w konsekwencji momentu potrzebne jest znacznie większe napięcie niż przy zasilaniu prądem stałym. Dodatkowym efektem jest pojawienie się przesunięcia fazowego  $\varphi_{UI}$  pomiędzy prądem silnika a przyłożonym do jego zacisków napięciem. W powyższej analizie pominięto wyodrębnienie ze strumieni skojarzonych z obydwojoma uzwojeniami strumieni rozproszenia zamykających się zarówno wokół połączeń czołowych jak i w strefie przyszczelinowej.

Obliczenia bilansu energetycznego wykonuje się analogicznie jak przy zasilaniu prądem stałym, przy czym przez moc elektromagnetyczną rozumie się uśrednioną za okres wielkość równą iloczynowi wartości skutecznych SEM rotacji i natężenia prądu (przy braku przesunięcia fazowego pomiędzy strumieniem i prądem)

$$P_e = \frac{1}{T} \int_0^T e_{ar}(t) i_a(t) dt = E_{ar} I_a \quad (18.22)$$

Warunek równości mocy będzie więc w postaci

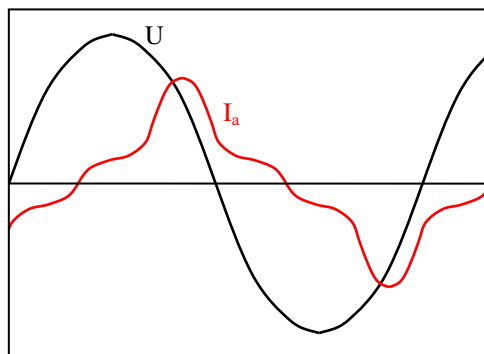
$$P_{el} = U I_a \cos \varphi_{UI} = P_e + \Delta P_a = P_{me} + \Delta P_a + \Delta P_{me} \quad (18.23)$$

Moment elektromagnetyczny jak poprzednio jest proporcjonalny do strumienia i prądu

$$M_e = \frac{c_E}{2\pi} \Phi I_a \quad (18.24)$$

przy czym obydwie wielkości są teraz wartościami skutecznymi odpowiednich przebiegów sinusoidalnych w czasie.

Rozważania do tej pory były prowadzone przy milczącym założeniu liniowości obwodu magnetycznego, to znaczy ściślejszej proporcjonalności prądu i strumienia magnetycznego. W rzeczywistych silnikach lokalne wartości indukcji są bliskie indukcji nasycenia ferromagnetyka – zwykle 1.8-1.9 T, por. rys.18.7, ze względu na dążenie konstruktorów do minimalizacji masy maszyny. Ze względu na zakrzywienie charakterystyki  $\Psi(I)$  przez zjawisko nasycenia magnetycznego przy wymuszeniu sinusoidalnym napięciem odpowiedź prądowa silnika będzie odkształcona od sinusoidy, co pokazano na rys.18.10. W wyniku otrzymuje się wzrost zarówno wartości skutecznej jak i stromości prądu oraz dodatkowe harmoniczne czasowe.



Rys.18.10. Wpływ nasycenia obwodu magnetycznego na kształt prądu w silniku uniwersalnym

W konsekwencji wzrosną straty w uzwojeniu i rdzeniu silnika oraz może pojawić się zagrożenie przepięciowe.

#### 18.4. Charakterystyki eksploatacyjne.

Każdy przetwornik elektromechaniczny posiada dwie pary parametrów, nazywanych zmiennymi stanu, które jednoznacznie opisują moc pobieraną i oddawaną. W silniku uniwersalnym po stronie elektrycznej wymuszamy napięcie  $U$  a po stronie mechanicznej moment na wale  $M_{me}$ . Silnik odpowiada prądem pobieranym z sieci zasilającej  $I_a$  i prędkością obrotową  $n$ . Do wyznaczenia charakterystyk odpowiedzi silnika posłużą równania bilansu mocy i napięć w silniku oraz definicyjne zależności momentu elektromagnetycznego i sił elektromotorycznych.

Rozpatrzmy w pierwszej kolejności silnik zasilany napięciem stałym o liniowym obwodzie magnetycznym. Siła elektromotoryczna (18.9) może być zapisana jako

$$E_{ar} = c_E \Phi n = c_E c_\Phi I_a n \quad (18.25)$$

Wprowadzając tę zależność do bilansu napięć i wyznaczając prędkość obrotową mamy przy pominięciu spadku napięć na szczotkach

$$n = \frac{U}{c_E c_\Phi I_a} - \frac{R_{D1D2} + R_{A1A2}}{c_E c_\Phi} \quad (18.26)$$

Z kolei z warunku równowagi momentów otrzymuje się

$$I_a^2 = \frac{2\pi}{c_E c_\Phi} (M_{me} + \Delta M_{me}) \quad (18.27)$$

co pozwala na wyrugowanie prądu  $I_a$  z (18.26)

$$n = \frac{U}{\sqrt{2\pi c_E c_\Phi (M_{me} + \Delta M_{me})}} - \frac{R_{D1D2} + R_{A1A2}}{c_E c_\Phi} \quad (18.28)$$

Uzyskaliśmy w ten sposób zależności określające odpowiedź silnika uniwersalnego na wymuszenia przy zasilaniu napięciem stałym. Wzór (18.28) jest przybliżony, ponieważ moment strat  $\Delta M_{me}$  zależy istotnie od prędkości obrotowej – w drugiej a nawet trzeciej potęgze prędkości, co przy malejącej wartości momentu na wale  $M_{me}$  może mieć decydujący wpływ na wynikową prędkość obrotową. Ścisłe zależności są w praktyce określane na drodze eksperymentalnej.

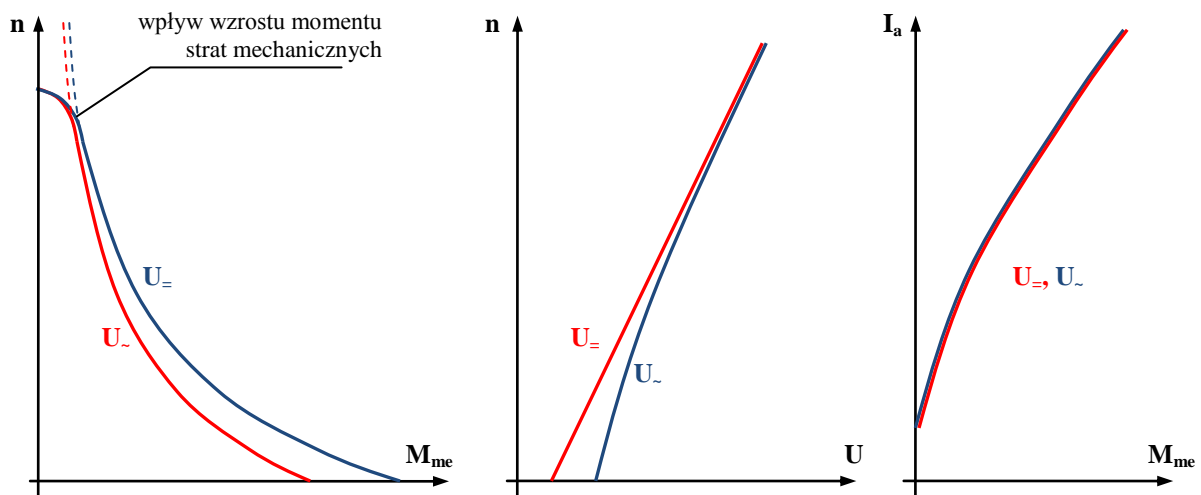
W przypadku kiedy silnik jest zasilany z sieci napięcia przemiennego wzór (18.28) zawiera zamiast  $U$  wyrażenie  $U \cos \varphi_{UI}$ , gdzie kąt  $\varphi_{UI}$  spełnia zależność – por. rys.18.9

$$\tan \varphi_{UI} = \frac{E_{at}}{E_{ar} + I_a(R_{D1D2} + R_{A1A2}) + 2\Delta U_p} = \frac{\omega L_{A1A2} I_a}{c_E c_\Phi I_a n + I_a(R_{D1D2} + R_{A1A2}) + 2\Delta U_p} \quad (18.29)$$

Pomijając jak poprzednio spadek napięcia na zestyku szczotkowym otrzymujemy

$$\tan \varphi_{UI} = \frac{\omega L_{A1A2}}{c_E c_\Phi n + (R_{D1D2} + R_{A1A2})} \quad (18.30)$$

gdzie  $\omega$  jest pulsacją napięcia w sieci zasilającej. Dla dostatecznie dużej prędkości obrotowej SEM rotacji jest istotnie większa od SEM transformacji i kąt pomiędzy prądem i napięciem zbliża się do zera. Oznacza to, że charakterystyki mechaniczne silnika (prędkości w funkcji momentu na wale) dla małych wartości tego momentu przy obydwu rodzajach zasilania będą zbliżone.

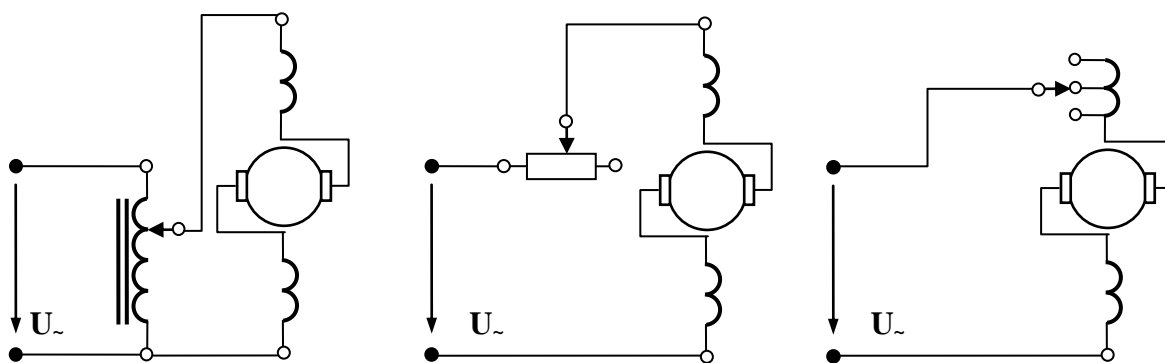


Rys.18.11. Charakterystyki eksploatacyjne silnika uniwersalnego przy zasilaniu napięciem stałym i przemiennym.

### 18.5. Regulacja prędkości w silniku uniwersalnym.

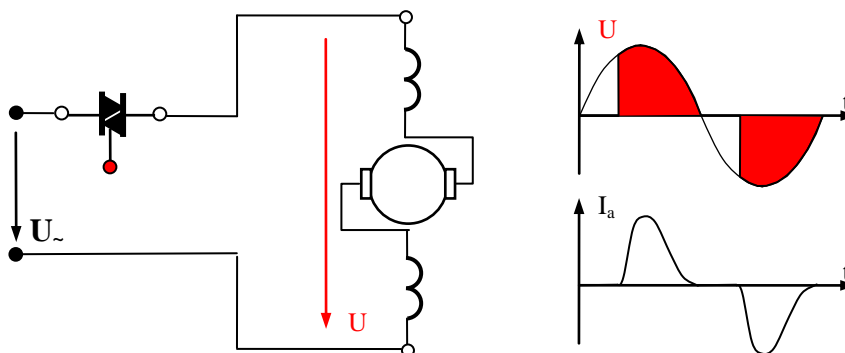
Na podstawie wzoru (18.28) stwierdzamy, że istnieją dwa zasadnicze sposoby zmiany prędkości – poprzez zmianę napięcia zasilającego silnik oraz przez zmianę strumienia wzbudzenia (stała  $c_\Phi$ ). Regulacja napięciem jest ograniczona od góry przez wartość dopuszczalnego napięcia (najczęściej znamionowego), czyli może służyć wyłącznie do zmniejszania wartości obrotów silnika w stosunku do tych, które występują przy napięciu znamionowym i zadanym momencie na wale. Odwrotna sytuacja ma miejsce w przypadku regulacji strumienia, którego zmniejszanie w stosunku do wynikającego ze znamionowej wartości prądu (poprzez zmianę liczby zwojów lub bocznikowanie rezystancją obwodu

wzbudzenia) powoduje wzrost prędkości obrotowej. Najprostsze i zarazem najtańsze sposoby regulacji napięcia polegają na zastosowaniu dzielnika rezystancyjnego lub indukcyjnego (autotransformator), zaś zmiana liczby zwojów odbywa się przełączając zasilanie pomiędzy kilkoma zaczeпами na uzwojeniu wzbudzenia. Wadą tego typu regulacji jest konieczność „manualnej” interwencji obsługi, bez możliwości jej automatyzacji. Tym niemniej sposób ten jest nadal szeroko stosowany w prostych urządzeniach gospodarstwa domowego np. odkurzacz, maszyna do szycia zasilanych z sieci prądu przemiennego.

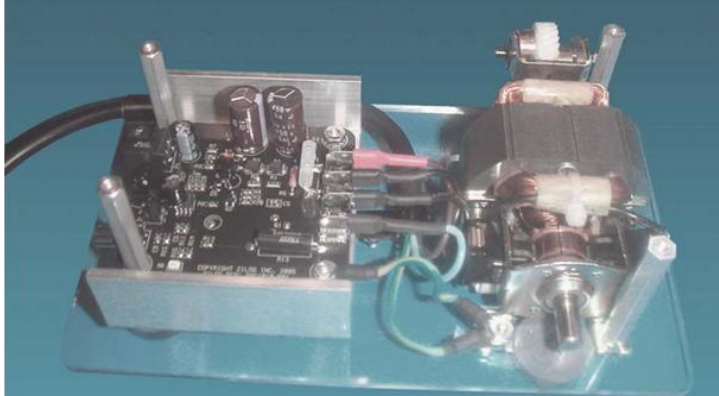


a. b. c.  
Rys.18.12. Podstawowe sposoby regulacji prędkości w silniku uniwersalnym  
a. dzielnik indukcyjny (autotransformator),  
b. dzielnik rezystancyjny,  
c. odczepy w uzwojeniu wzbudzenia

Miniaturyzacja i redukcja cen układów elektronicznych spowodowały coraz szersze ich zastosowanie w wielu urządzeniach powszechnego użytku. Najprostszym sposobem regulacji jest zastosowanie triaka, umożliwiającego płynną zmianę kąta wyzwolenia fazy przewodzenia, co skutkuje zmniejszeniem wartości skutecznej napięcia przyłożonego do silnika.

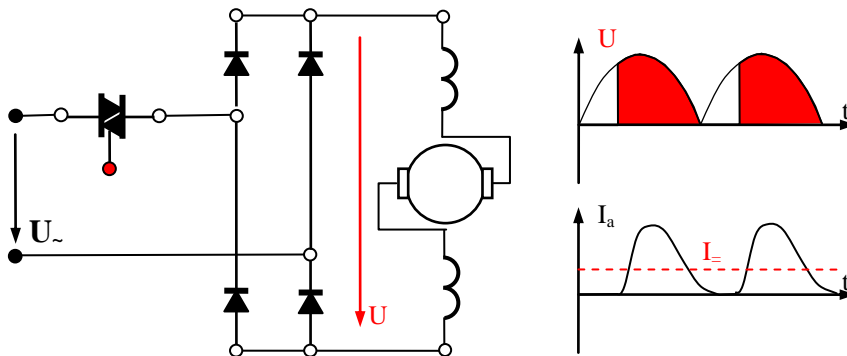


Rys.18.13. Regulacja napięcia zasilania w silniku uniwersalnym za pomocą triaka.



Rys.18.14. Silnik uniwersalny i jego kontroler (Zilog).

Zaletą tego typu układu jest jego prostota i niska cena, zaś wadą silnie odkształcony prąd silnika. Przyjmując bowiem, że regulacja prędkości odbywa się przy stałym momencie obciążenia to mamy do czynienia z niezmienną wartością skuteczną prądu silnika. Jednocześnie zmniejszamy przedział czasu, w którym mamy niezerową wartość prądu. W rezultacie znacznie rośnie amplituda czasowa prądu, która przyczynia się do wzmożonego iskrzenia na szczotkach wraz z towarzyszącymi efektami elektroerozyjnym na powierzchni szczotki i komutatora. Zjawiska te są bardzo niekorzystne z punktu widzenia trwałości i niezawodności silnika. Możemy je znacznie ograniczyć wprowadzając dodatkowo prostownik.

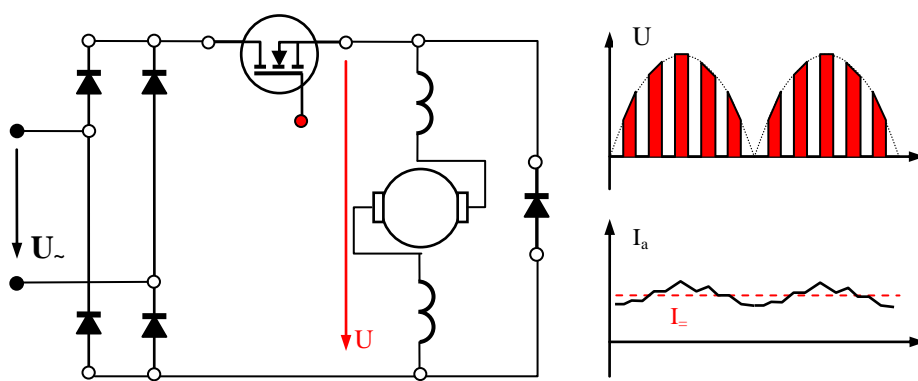


Rys.18.14. Regulacja napięcia zasilania w silniku uniwersalnym za pomocą triaka i prostownika.

Otrzymaliśmy przebieg o znacznie mniejszej składowej przemiennej w prądzie maszyny, która jest odpowiedzialna za wielkość prądu płynącego w zwartej cewce w trakcie jej komutacji. Należy również zwrócić uwagę, że obecność gałęzi mostka diodowego pozwala na przepływ prądu w silniku również w tych okresach, gdy triak nie przewodzi, co również prowadzi do zmniejszenia poziomu odkształceń harmonicznych.



Kolejnym sposobem na zmniejszenie odkształceń w prądzie silnika uniwersalnego jest zastosowanie modulacji o zmiennej szerokości impulsu. W tym celu po stronie stałoprądowej mostka umieszcza się sterowany klucz – najczęściej tranzystor MOSFET lub IGBT, przy pomocy którego z półokresów sinusoidy wycina się odcinki czasowe przebiegu o tak dobranej szerokości aby uzyskać napięcie o żądanej wartości średniej. Przy odpowiednio dobranej częstotliwości i szerokości impulsu bramkowego można otrzymać przebieg prądu o relatywnie niewielkiej zawartości wyższych harmonicznych. Dla zapewnienia ciągłości prądu w silniku jest niezbędna dioda zwrotna połączona równolegle z obwodem silnika.



Rys.18.15. Regulacja napięcia zasilania w silniku uniwersalnym za pomocą prostownika i przerywacza MOSFET.