

TADEUSZ GLINKA

Instytut Metrologii
i Maszyn Elektrycznych

WŁASNOŚCI KOMUTACYJNE SILNIKA SZEREGOWEGO PRĄDU STAŁEGO Z BIFILARNYM UZWOJENIEM WZBUDZENIA

Streszczenie. W artykule omówiono charakterystyki częstotliwości sem indukowanych w zwoju komutującym szeregowego silnika prądu stałego. Na bazie wymienionych charakterystyk częstotliwości i stref komutacji beziskrowej dla prądu pulsującego przeprowadzono porównanie właściwości komutacyjnych silnika z bifilarnym uzwojeniem wzbudzenia z silnikiem w wykonaniu klasycznym.

1. Wstęp

Silniki szeregowo prądu stałego znajdują powszechne zastosowanie w trakcji elektrycznej i spalinowo-elektrycznej. W nowoczesnych układach trakcji elektrycznej prądu stałego układu tyrystorowe wypierają klasyczne rezystancyjne rozruszniki i regulatory prędkości obrotowej, umożliwiając regulację średniej wartości napięcia i prądu twornika silnika bez towarzyszących temu nadmiernych strat energii elektrycznej. W nowoczesnej trakcji prądu przemiennego silnik szeregowy jest zasilany z sieci poprzez przetwornicę tyrystorową. W nowoczesnej trakcji spalinowo-elektrycznej znajduje zastosowanie układ napędowy złożony z wysokoprężnego silnika spalinowego, prądnicy synchronicznej przetwornicy tyrystorowej i silnika szeregowo. We wszystkich wymienionych wyżej nowoczesnych rozwiązaniach szeregowo silnik prądu stałego jest zasilany prądem pulsującym. Pulsujący prąd obciążenia zawiera oprócz składowej stałej cały szereg harmonicznych, które są źródłem dodatkowych strat w maszynie i powodem utrudnienia komutacji prądu twornika. Zjawisko komutacji prądu pulsującego w silnikach szeregowych jest bardziej złożone niż w silnikach bocznikowych z uwagi na duże pulsacje strumienia wzbudzenia powodujące sem transformacji indukowaną w zwoju komutującym twornika.

2. Charakterystyki częstotliwości przemiennych sił elektromotorycznych indukowanych w zwoju komutującym

Przy konstrukcji nowoczesnych silników szeregowych prądu stałego przeznaczonych do pracy przy zasilaniu z przekształtników tyrystorowych można wyodrębnić dwa kierunki rozwiązań prowadzące do opanowania trudności komutacyjnych prądu twornika:

1. Przy wykorzystaniu sem transformacji indukowanej w zewzoju komutującym przez pulsujący strumień wzbudzenia do częściowej kompensacji składowej przemiennej sem rotacji i samoindukcji w zewzoju [1],
2. Przy zmniejszeniu do minimum pulsacji strumienia wzbudzenia maszyny [2], [3], [4].

Pierwsze rozwiązanie jest stosowane w maszynach z litym obwodem magnetycznym stojana, a drugie w maszynach z pakietowanym jarzmem stojana.

W maszynach trakcyjnych o litym obwodzie magnetycznym stojana, prądy wirów indukowane w litych partiach obwodu magnetycznego powodują rozstroje nie działania biegunów komutacyjnych. Składowe przemienne sem samoindukcji E_{sv} i sem rotacji E_{rv} w zewzoju komutującym nie kompensują się wzajemnie jak przy obciążeniu statycznym. W maszynach tych istnieje możliwość dopasowania wartości i fazy sem transformacji E_{tv} indukowanej w zewzoju komutującym, przez odpowiednie zbocznikowanie uzwojenia wzbudzenia bocznikiem rezystancyjno indukcyjnym, tak aby był spełniony warunek kompensacji [1]

$$E_{sv} + E_{rv} + E_{tv} = 0. \quad (1)$$

Niestety warunek (1) jest możliwy do uzyskania, lecz tylko dla jednej prędkości obrotowej i jednej częstotliwości składowej przemiennej prądu, co można łatwo wykazać w oparciu o przebieg charakterystyk częstotliwości.

2.1. Charakterystyka częstotliwości sem samoindukcji

Średnia za okres komutacji T_k sem samoindukcji w zewzoju zwartym przez szczotkę jest proporcjonalna do iloczynu komutowanego prądu twornika i prędkości wirowania ω_m

$$E_s = C I \omega_m, \quad (2)$$

gdzie C - współczynnik proporcjonalności zależny od indukcyjności zewzoju komutującego.

Przyjmując, że prąd twornika ma zmienność sinusoidalną

$$I(t) = I_m \sin \omega t \quad (3)$$

przy małej częstotliwości kątowej zmienności prądu twornika

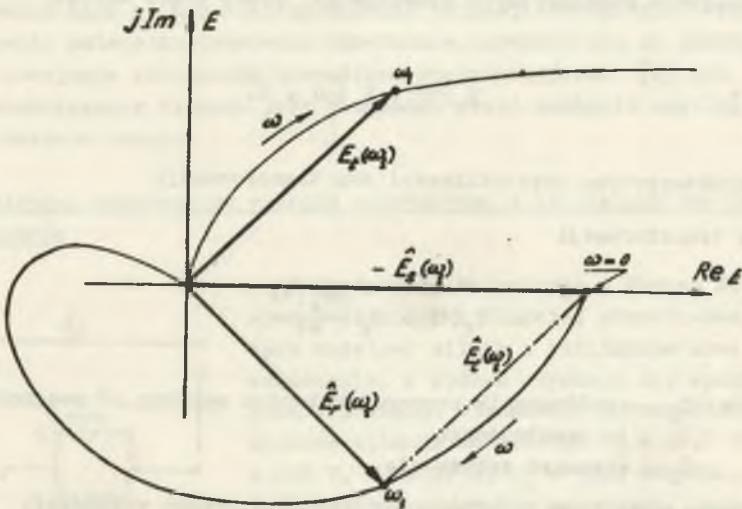
$$T_k \ll \frac{2\pi}{\omega}, \quad (4)$$

również wartość średnia sem samoindukcji ma wartość sinusoidalną.

Stąd jej charakterystyka częstotliwości

$$\hat{E}_s = \frac{\hat{E}_s(\omega)}{\hat{I}_o(\omega)} = C \omega_m \quad (5)$$

jest przy $0 < \omega < \infty$ proporcjonalna do prędkości wirowania, a nie zależy od pulsacji prądu twornika ω . Jej wykres odpowiada stałemu wektorowi $\underline{E}_s(\omega)$ na płaszczyźnie liczb zespolonych (rys. 1). W zakresie dużych częstotliwości $\omega \rightarrow \infty$ relacje tracą sens z uwagi na nie spełnienie nierówności (4).



Rys. 1. Charakterystyki częstotliwości sem indukowanych w zezwoju komutującym szeregowego silnika prądu stałego

2.2. Charakterystyka częstotliwości sem rotacji

Siła elektromotoryczna rotacji jest proporcjonalna do iloczynu strumienia biegunów komutacyjnych $\hat{\Phi}_k$ i prędkości wirowania ω_m . Wynikają stąd relacje arytmetyczne

$$\hat{E}_r(\omega) = C_1 \omega_m \hat{\Phi}_k, \quad (6)$$

gdzie C_1 - współczynnik proporcjonalności zależny od zwojności zezwoju komutującego.

Uwzględniając transmitancję obwodu poprzecznego maszyny [5]

$$\frac{\hat{\Phi}_k(\omega)}{\hat{I}_q(\omega)} = \hat{K}_q(\omega) \quad (7)$$

otrzymuje się krzywoliniową charakterystykę częstotliwości

$$\hat{E}_R = \frac{\hat{E}_R(\omega)}{\hat{I}(\omega)} = C_1 \omega_m \hat{K}_q(\omega), \quad (8)$$

którą przedstawiono na rys. 1. Względna sem rotacji $\hat{E}_R(\omega)$ jest funkcją zarówno prędkości kątowej wirnika, jak i częstotliwości pulsacji prądu. Siły elektromotoryczne $\hat{E}_R(\omega)$ i $\hat{E}_S(\omega)$ nie kompensują się na skutek inercji strumienia biegunów komutacyjnych spowodowanej przez prądy wirowe.

Stąd

$$\hat{E}_R(\omega) + \hat{E}_S(\omega) \neq 0.$$

2.3. Charakterystyka częstotliwości sem transformacji

Napięcie transformacji

$$E_t(t) = C_2 \frac{d\Phi_w(t)}{dt}, \quad (9)$$

przy czym C_2 - współczynnik proporcjonalności zależny od zwojności zezwoju komutującego,

Φ_2 - strumień wzbudzenia.

Wprowadzając zespoloną transmitancję względną obwodu wzbudzenia

$$\hat{K}_d(\omega) = \frac{\hat{\Phi}_w(\omega)}{\hat{I}(\omega)} \quad (10)$$

otrzymuje się charakterystykę częstotliwości sem transformacji

$$\hat{E}_t(\omega) = C_2 j\omega \hat{K}_d(\omega). \quad (11)$$

Można wykazać, że charakterystyka częstotliwości $\hat{K}_d(\omega)$ ma postać

$$\hat{K}_d(\omega) = \frac{1}{1 + \sqrt{j\omega T_d}},$$

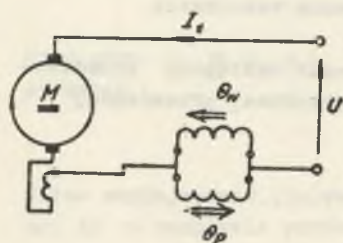
gdzie T_d - jest zastępczą, stałą czasową obwodów prądów wirowych sprzężonych ze strumieniem wzbudzenia.

Grot wektora $\hat{E}_t(\omega)$ zakreśla krzywą, która leży w pierwszej ćwiartce układu współrzędnych (rys. 1).

Z przedstawionej na rys. 1 pogładowej konfiguracji charakterystyk częstotliwości transmitancji składowych wynika, że przez wzajemne dopasowanie transmitancji można co najwyżej skompensować siły elektromotoryczne, E_s , E_r , E_t , przy jednej częstotliwości pulsacji (rys. 1, pulsacji odpowiadającej podstawowej harmonicznej tętniącego prądu twornika pobieranego z układów przekształtnikowych) i przy jednej wybranej wartości prędkości wiorowania silnika szeregowego.

W silnikach z pakietowanym poprzecznym obwodem magnetycznym stojana można skompensować $\hat{E}_s(\omega)$ i $\hat{E}_r(\omega)$ w szerokim paśmie częstotliwości. Przy takiej kompensacji można uzyskać poprawną komutację maszyny przy wyeliminowaniu bądź co najmniej ograniczeniu pulsacji strumienia wzbudzenia. Zmniejszenie pulsacji strumienia wzbudzenia uzyskuje się za pomocą bocznikowania uzwojenia wzbudzenia bocznikami rezystancyjnymi [2] lub diodami [3]. Bocznikowanie diodami jest przydatne jeśli napięcie zasilające silnik nie zmienia znaku.

3. Właściwości komutacyjne silnika szeregowego z bifilarnym uzwojeniem wzbudzenia



Rys. 2. Schemat szeregowego silnika prądu stałego z bifilarnym uzwojeniem wzbudzenia

W Instytucie Metrologii i Maszyn Elektrycznych Politechniki Śląskiej skonstruowano i zbadano modelowy silnik z bifilarnym uzwojeniem wzbudzenia, w którym uzyskuje się wydatne zmniejszenie pulsacji strumienia wzbudzenia. Dana znamionowe silnika modelowego $P_n = 14,7$ kW, $U_n = 220$ V, $I_n = 77$ A, $n_n = 1500$ obr/min.

Bifilarne uzwojenie wzbudzenia jest wykonane w ten sposób, że na każdym biegunie głównym maszyny szeregowej obok uzwojenia wzbudzenia umieszcza się uzwojenie pomocnicze o liczbie zwojów równej liczbie zwojów uzwojenia podstawowego. Szeregowo połączone cewki uzwojenia po-

mocniczego łączy się równolegle przeciwsobnie z podstawowym uzwojeniem, wzbudzenia (rys. 2). Rezystancja uzwojenia pomocniczego jest około 50-100 razy większa od rezystancji uzwojenia podstawowego, co daje niewielkie zmniejszenie przepływu wzbudzenia od składowej stałej prądu twornika.

Strumień wzbudzenia od składowej stałej w maszynie przy wyłączonym uzwojeniu pomocniczym

$$\Phi_{wo} = \frac{I_o z_w}{R_{mo}}$$

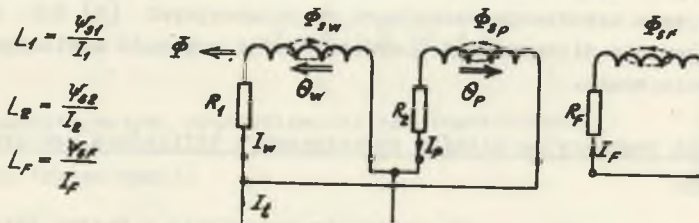
gdzie I_o - składowa stała prądu obciążenia,
 z_w - liczba zwojów uzwojenia wzbudzenia,
 R_{mo} - reluktancja obwodu magnetycznego dla składowej stałej strumienia.

Strumień wzbudzenia od składowej stałej w maszynie z uzwojeniem bifilarnym

$$\Phi'_{w0} = \frac{I_0 z_w}{R_{m0}} \left(1 - \frac{2 R_1}{R_1 + R_2}\right) = \Phi_{w0} \left(1 - \frac{2 R_1}{R_1 + R_2}\right).$$

Przyjmując $R_2 = (50 \div 100) R_1$

$$\Phi'_{w0} = (0,96 \div 0,98) \Phi_{w0}.$$



Rys.3. Schemat zastępczy bifilarnego uzwojenia wzbudzenia

Dla składowych przemiennych prądu obowiązuje schemat zastępczy przedstawiony na rys. 3. Wypadkowy przepływ magnesujący składowej przemiennej

$$\sum \Theta_v = \sum I_{\mu v} z_w,$$

Strumień składowej przemiennej

$$\Phi_v = \frac{\sum \Theta_v}{R_{mv}};$$

gdzie R_{mv} - reluktancja dla składowej przemiennej strumienia

$$R_{mv} > R_{m0}.$$

Dla maszyny przy wyłączonym uzwojeniu pomocniczym

$$\Phi_v = \frac{I_v z_w}{R_m},$$

a przy załączonym uzwojeniu pomocniczym

$$\hat{\Phi}'_v = \hat{\Phi}_v \left[1 - \frac{R_1 + A + j\omega(L_1 + B)}{R_2 + A + j\omega(L_2 + B)} \right], \quad (12)$$

gdzie

$$A = R_1 = \frac{(R_1 + R_2)\omega^2 L_F L_\mu - R_F \omega^2 L_\mu (L_1 + L_2)}{R_F^2 + (\omega L_F)^2}$$

$$B = L_1 + 2 L_\mu + \frac{(R_1 + R_2) \omega L_F L_\mu + \omega^2 L_F L_\mu (L_1 + L_2)}{R_F^2 + (\omega L_F)^2}.$$

W rozpatrywanym przypadku można założyć, że indukcyjności rozproszeń $L_1 \approx L_2$, gdyż liczby zwojów i przewodności magnetyczne drogi strumienia rozproszenia są prawie jednakowe.

Dla dużej wartości ω ($f \geq 100$ Hz) część urojona licznika i mianownika wyrażenia w nawiasie kwadratowym w równaniu (12) jest wielokrotnie większa od części rzeczywistej

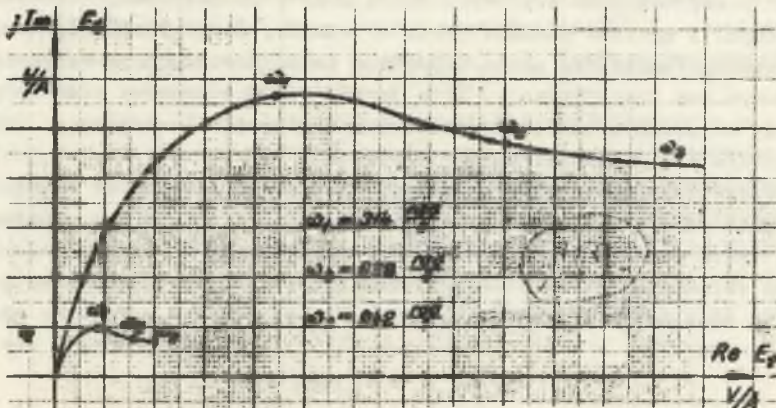
$$\omega(L_1 + B) \gg R_1 + A$$

$$\omega(L_2 + B) \gg R_2 + B.$$

Stąd przy $L_1 \approx L_2 = L$
strumień

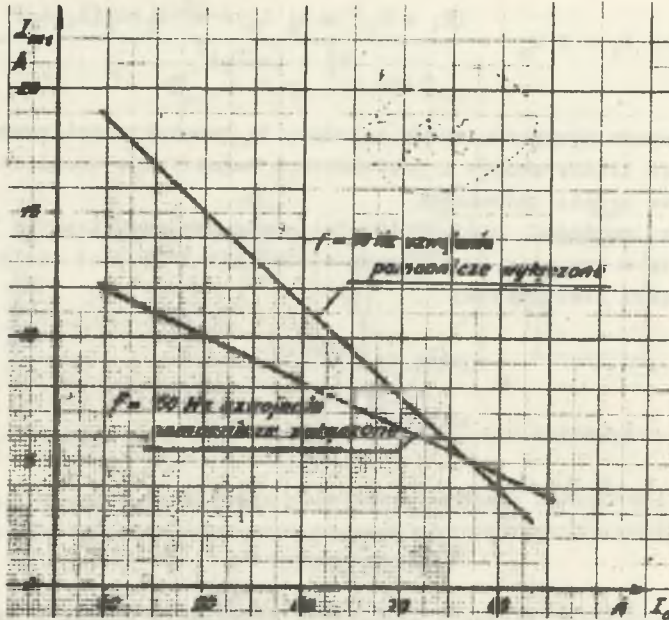
$$\Phi_V' \approx \frac{R_2 - R_1}{j\omega(L + B)} \Phi_V.$$

Silne zmniejszenie ,pulsacji strumienia wzbudzenia uzyskuje się dzięki temu, że o rozpięciu prądu składowych przemiennych na poszczególne uzwojenia decydują indukcyjności rozproszenia poszczególnych uzwojeń, które dla obydwu uzwojeń są prawie identyczne.



Rys. 4. Charakterystyka częstotliwości sem transformacji silnika szeregowego 14,7 kW, 220 V, 77 A, 1500 obr/min

Na rys. 4 przedstawiono charakterystyki częstotliwości sem transformacji $\hat{E}_t(\omega)$ zdjęte pomiarowo. Siłę elektromotoryczną transformacji E_t mierzono między dwoma działkami komutatora przyłączonymi do zezwoju komutującego przy nieruchomym wirniku i podniesionych szczotkach przy przemiennym prądzie wzbudzenia o zmienionej częstotliwości



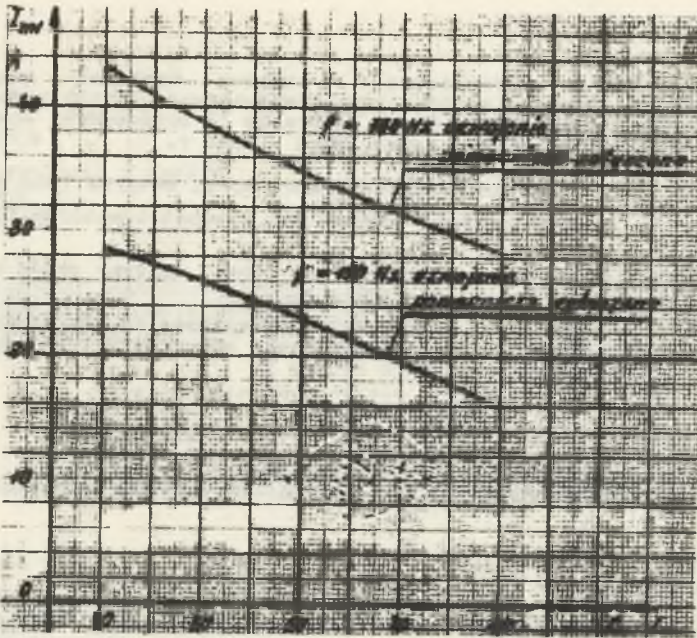
Rys. 5. Krzywa ciennej komutacji $I_m = f(I_0)$ dla prądu pulsującego o częstotliwości pulsacji 50 Hz silnika szeregowego 14,7 kW, 220 V, 77 A, 1500 obr/min

Pomiar przeprowadzono przy wyłączonym oraz przy załączonym uzwojeniu pomocniczym. Z wyników pomiaru (rys. 4) wynika, że przyłączenie uzwojenia pomocniczego zmniejsza około 6-krotnie pulsacje strumienia wzbudzenia, a tym samym sem transformacji. Lite jarzmo stojana maszyny badanej powodowało przy odłączonym uzwojeniu pomocniczym 3-krotne zmniejszenie pulsacji strumienia w stosunku do pulsacji prądu.

Właściwości komutacyjne maszyny z bifilarnym uzwojeniem wzbudzenia można ocenić na podstawie strefy ciennej komutacji $I_m = f(I_0)$ zdjętej pomiarowo, którą przedstawiono na rys. 5 i rys. 6.

Krzywe określające strefy ciennej komutacji zostały zdjęte przy zasilaniu silnika modelowego prądem pulsującym

$$I(t) = I_0 + I_m \sin \omega t.$$



Rys. 6. Krzywa ciemnej komutacji $I_m = f(I_0)$ dla prądu pulsującego o częstotliwości pulsacji 150 Hz silnika szeregowego 14,7 kW, 220 V, 77 A, 1500 obr/min

Układ zasilania umożliwił niezależne nastawianie trzech parametrów: napięcia składowej stałej U_0 , prądu składowej przemiennej I_m oraz pulsacji ω .

Charakterystyki $I_m = f(I_0)$ przedstawione na rys. 5 i rys. 6 są zdjęte przy stałej prędkości obrotowej silnika i częstotliwości prądu składowej przemiennej 50 Hz i 150 Hz. Przy stałej wartości prądu I_0 stopniowo zwiększano amplitudę prądu składowej przemiennej I_m (zachowując $\omega = \text{const}$) aż do wystąpienia iskrzenia szczotek.

Z rys. 5 wynika, że dla prądu o pulsacji 314 rad/s uzyskuje się szerszą strefę ciemnej komutacji dla maszyny bez uzwojenia bifilarnego. Prawdopodobnie sem transformacji $E_t(\omega)$ częściowo kompensuje w tym przypadku niezrównoważone sem $E_s(\omega) + E_k(\omega)$. Zmniejszenie sem transformacji E_t pogarsza komutację prądu o pulsacji 314 rad/s. Z rys. 6 wynika, że dla prądu o pulsacji 942 rad/s szerszą strefę ciemnej komutacji uzyskuje się przy bifilarnym uzwojeniu wzbudzenia, to znaczy po wyeliminowaniu zbyt dużej wartości sem transformacji.

LITERATURA

1. Скобелев В.Е. - Определение с помощью круговой диаграммы рационального значения коэффициента шунтирования обмотки главных полюсов двигателей пульсирующего тока. Материалы IV Всесоюзной конференции по коммутации электрических машин. Омск - 1969 г.
2. Скобелев В.Е. - Двигатели пульсирующего тока. Энергия 1968 г.
3. Walther H. - Shuntierungsverfahren für Mischstrommotoren. Elektrie 1969 23, Nr 8.
4. Glinka T. - Uzwojenie wzbudzenia szeregowej maszyny prądu stałego. Zgłoszenie patentowe P 145 455 z dnia 2.I.71.
5. Paszek W., Glinka T. - Wyznaczenie dynamicznej strefy beziskrowej komutacji maszyn prądu stałego na podstawie charakterystyki częstotliwości Archiwum Elektrotechniki 1970 r., nr 1.

КОММУТАЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА
С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ С БИФИЛАРНОЙ ОБМОТКОЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Р е з ю м е

В статье рассматриваются частотные характеристики э.д.с. наводимой в коммутационных витках двигателя постоянного тока последовательного возбуждения. На базе выше означенных частотных характеристик и зоны безыскровой коммутации для пульсирующего тока проведено сравнение коммутационных особенностей двигателей с бифилярной и с обычной обмоткой возбуждения.

COMMUTATION PROPERTIES OF THE DIRECT-CURRENT SERIES MOTOR
WITH BIPOLAR EXCITING WINDING

S u m m a r y

The frequency characteristics of the electromotive force induced in commutating turn of the direct-current series motor are discussed. The commutating properties of the motor with bifilar exciting winding are compared with the commutating properties of the conventional motor on the basis of mentioned frequency characteristics and sparkless commutation zones at pulsating current.