

# Бесконтактный двигатель постоянного тока с делителем питающего напряжения

ГРИДИН В.М.

Рассматривается бесконтактный двигатель постоянного тока (БДПТ) с двухсекционной якорной обмоткой (ЯО), снабжённый конденсаторным делителем питающего напряжения (ДПН). Благодаря применению ДПН число силовых транзисторов коммутатора уменьшается вдвое по сравнению с БДПТ без ДПН, у которого силовых транзисторов восемь. Установлена функциональная зависимость тока, потребляемого ЯО при четырёх- и восьмитактной коммутации секций ЯО, от отношения длительности межкоммутационного интервала к произведению активного сопротивления секций ЯО и емкости конденсаторов ДПН. Получены выражения для требуемого значения ёмкости конденсаторов ДПН; рассмотрены особенности пуска двигателя.

Ключевые слова: бесконтактный двигатель постоянного тока, двухсекционная якорная обмотка, конденсаторный делитель питающего напряжения, четырёх- и восьмитактная коммутация, потребляемый ток

Делители питающего напряжения (ДПН) можно применять для бесконтактных двигателей постоянного тока (БДПТ) с якорной обмоткой (ЯО), секции которой соединены в звезду. Общий вывод секций соединяется со средней точкой ДПН. Для питания БДПТ идеальным, но редко применяемым, является источник напряжения со средней точкой, которая делит его напряжение на две равные части. Делитель должен быть конденсаторным, так как практически не потребляет энергию от источника питания, его целесообразнее применять для БДПТ с двухсекционной ЯО с целью уменьшения в два раза числа транзисторов, коммутирующих секции ЯО, и схем управления ими.

На рис. 1 изображена схема силовой части БДПТ с двухсекционной ЯО и ДПН, состоящим из двух одинаковых конденсаторов.

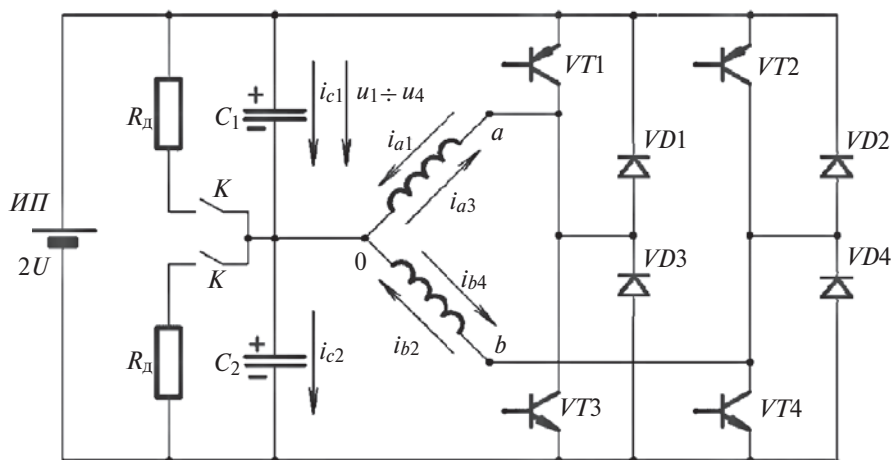


Рис. 1. Схема силовой части бесконтактного двигателя постоянного тока с конденсаторным делителем питающего напряжения:  $a0$  и  $b0$  – секции якорной обмотки;  $VT1, VT4$  – силовые транзисторы;  $VD1, VD4$  – диоды;  $K$  – нормально разомкнутые контакты одной кнопки;  $ИП$  – источник питания с напряжением  $2U$

Резисторы с сопротивлением  $R_d$  и контакты  $K$  необходимы для пуска БДПТ, который на рис. 1 содержит четыре силовых транзистора, что меньше, чем у БДПТ с трёхсекционной ЯО и двухполупериодной коммутацией (шесть).

Транзисторы коммутируют секции ЯО по сигналам датчика положения ротора. Двигатель может работать с четырёх- и восьмитактной двухполупериодной коммутацией.

Рассмотрим работу БДПТ с четырёхтактной коммутацией. На рис. 2 изображена соответствующая диаграмма состояния силовых транзисторов  $VT1, VT4$ , на которой  $T$  – длительность каждого межкоммутационного интервала (МКИ). Период коммутации равен  $4T$ , ему соответствует поворот вала двигателя на  $360^\circ$  или  $2\pi$ .

На рис.1 обозначены напряжения на верхнем конденсаторе  $C_1$   $u_1, u_4$  и токи секций ЯО  $i_{a1}, i_{b2}, i_{a3}, i_{b4}$  и конденсаторов  $i_{c1}, i_{c2}$  на первом–четвертом МКИ. Токи в секциях ЯО протекают соответственно через открытые транзисторы  $VT1, VT4$ . Индексы 1,4 для напряжений и токов означают номер МКИ.

Найдём выражение для среднего значения тока, потребляемого ЯО, и сравним его с таковым при питании БДПТ от источника напряжения со средней точкой. Пренебрежем индуктивностью секций ЯО, что допустимо для БДПТ небольшой мощности (до 10–20 Вт). Согласно [3] влияние



Рис. 2. Диаграмма состояния транзисторов  $VT1, VT4$  при четырёхтактной коммутации: — — транзистор открыт (проводит ток)

индуктивности секций ЯО на электромагнитные процессы тем слабее, чем меньше мощность, частота вращения вала и габариты БДПТ. Будем также пренебрегать падением напряжения на транзисторах, которое значительно меньше напряжения питания. Считаем, что осциллограммы ЭДС вращения в секциях ЯО имеют трапецеидальную форму, угловой размер меньшего основания трапеций — не менее  $90^\circ$  или  $\rho/2$ , а уровень этого основания (т.е. максимальная ЭДС) равен  $E$ ; ЯО — диаметральной, сосредоточенная. Поэтому на каждом МКИ ЭДС секции, подключенной к источнику питания, неизменна и равна  $E$ . Обозначим:  $r$  — активное сопротивление каждой секции ЯО;  $C$  — емкость каждого конденсатора;  $t = rC$ ,  $b = T/t$ . При  $C = 0$ , т.е. при отсутствии ДПН,  $t = 0$ ,  $b = \infty$ . Случаю  $C = \infty$  соответствует источник напряжения со средней точкой,  $t = \infty$ ,  $b = 0$ .

Для четырехтактной коммутации угловой размер МКИ равен  $90^\circ$  или  $\rho/2$ , поэтому длительность МКИ

$$T = \frac{\rho}{2} \frac{60}{p2pn} = \frac{15}{pn},$$

где  $n$  — число оборотов в минуту вала двигателя;  $p$  — число пар полюсов двигателя;

$$b = T/t = \frac{15}{pnrC}.$$

Запишем выражения для напряжений  $u_1, u_4$  на каждом МКИ, а затем — для токов  $i_{a1}, i_{b2}$  на полупериоде коммутации; с целью упрощения выражений будем считать, что каждый МКИ начинается с нуля времени. Для первого МКИ согласно законам Кирхгофа справедливы следующие уравнения равновесия напряжений и токов:

$$u_1 - i_{a1}r - E; i_{a1} = i_{c2} - i_{c1}.$$

Так как

$$i_{c1} = C \frac{du_1}{dt}, i_{c2} = C \frac{d}{dt}(2U - u_1) = -C \frac{du_1}{dt} = -i_{c1},$$

то ДПН не потребляет энергию от источника питания. С учётом выражений для токов  $i_{c1}, i_{c2}$  получим дифференциальное уравнение

$$2t \frac{du_1}{dt} + u_1 = E,$$

которое имеет решение [4]:

$$u_1 = E + U_{01} e^{-0,5t/t}.$$

Для второго, третьего и четвертого МКИ можно получить аналогичные выражения:

$$u_2 = E + U_{02} e^{-0,5t/t};$$

$$u_3 = 2U - E + U_{03} e^{-0,5t/t};$$

$$u_4 = 2U - E + U_{04} e^{-0,5t/t}.$$

Так как по закону коммутации, относящемуся к напряжению на конденсаторе,

$$u_1(T) = u_2(0); u_2(T) = u_3(0); u_3(T) = u_4(0),$$

$$\text{то } U_{02} = U_{01} e^{-0,5b}; U_{03} = U_{01} e^{-b - 2(U - E)}; U_{04} = U_{01} e^{-1,5b - 2(U - E)} e^{-0,5b}.$$

Так как  $u_1(0) = u_4(T)$ , т.е.

$$E + U_{01} = 2U - E + U_{01} e^{-2b - 2(U - E)} e^{-b},$$

$$\text{то } U_{01} = \frac{2(U - E)}{1 + e^{-b}}.$$

Точно такую же формулу для  $U_{01}$  можно получить, используя только два выражения для напряжений  $u_1$  и  $u_2$ , действующих на полупериоде коммутации, и решив уравнение:

$$\frac{u_1(0) + u_2(T)}{2} = \frac{E + U_{01} + E + U_{01} e^{-b}}{2} = U.$$

Можно установить, что

$$u_1(0) - U = U - u_2(T) = DU/2 = (1 - K_e) \frac{1 - e^{-b}}{1 + e^{-b}} U,$$

где  $K_e = E/U$ .

Согласно формуле значение  $DU/2$  тем меньше, чем больше  $K_e$  и меньше  $b$ , т.е. чем больше ЭДС вращения  $E$  и емкость  $C$  конденсаторов ДПН.

На рис. 3 изображены две примерные осциллограммы напряжения  $u$  на конденсаторах для меньшего (кривая 1) и большего (2) значений момента нагрузки на валу.

Осциллограммы напряжения имеют период изменения  $4T$ , среднее значение, равное  $U$ , и амплитуду пульсации напряжений, равную  $DU/2$ . Большому моменту нагрузки на валу соответствует больший якорный ток  $I$ , меньшие значения частоты вращения вала двигателя  $n$ , ЭДС  $E$  и отношение  $K_e$ , большая амплитуда пульсации напряжения  $DU/2$ .

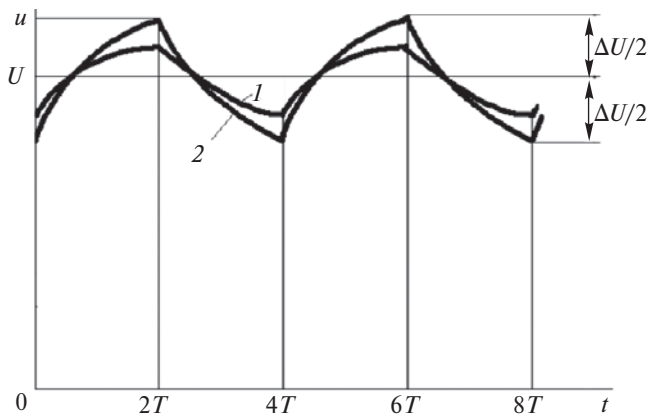


Рис. 3. Примерные осциллограммы напряжения на конденсаторах

Для примера определим значение амплитуды  $\Delta U / 2$  при следующих условиях:  $U_H = 30 \text{ В}$ ,  $P_{2H} = 10 \text{ Вт}$ ,  $n_H = 3000 \text{ об/мин}$ ,  $C = 139 \text{ мкФ}$ ,  $b = 1,2$ ,  $K_e = 0,75$ :

$$\Delta U / 2 = (1 - K_e) \frac{1 - e^{-b}}{1 + e^{-b}} U = (1 - 0,75) \frac{1 - e^{-1,2}}{1 + e^{-1,2}} U = 0,134U = 4,03 \text{ В}.$$

Из выражений для напряжений  $u_1$  и  $u_2$  можно получить формулы для токов  $i_{a1}$  и  $i_{b2}$  на полупериоде коммутации:

$$i_{a1} = \frac{u_1 - E}{r} = \frac{U_{01}}{r} e^{-0,5t/t};$$

$$i_{b2} = \frac{u_2 - E}{r} = \frac{U_{01}}{r} e^{-0,5b} e^{-0,5t/t}.$$

Для среднего значения тока, потребляемого ЯО от источника напряжением  $U$ , справедливы выражения:

$$I = \frac{1}{2T} \int_0^T (i_{a1} + i_{b2}) dt = \frac{U_{01}}{r} (1 + e^{-0,5b}) \cdot \frac{1}{2T} \int_0^T e^{-0,5t/t} dt.$$

С учетом выражения для  $U_{01}$  после преобразований получим окончательно:

$$I = \frac{U - E}{r} \gamma,$$

где  $\gamma = \frac{2}{b} \frac{1 - e^{-b}}{1 + e^{-b}}$ .

Отметим, что при питании БДПТ от источника напряжения со средней точкой  $I = (U - E) / r$ . При  $C \rightarrow \infty$ ,  $b \rightarrow 0$  значение  $\gamma \rightarrow 1$  (по правилу Лопиталя  $\frac{1 - e^{-b}}{b} \rightarrow 1$ ), ток  $I \rightarrow (U - E) / r$ ; при  $C = 0$ ,  $b = \infty$  значение  $\gamma = 0$ , ток  $I = 0$ .

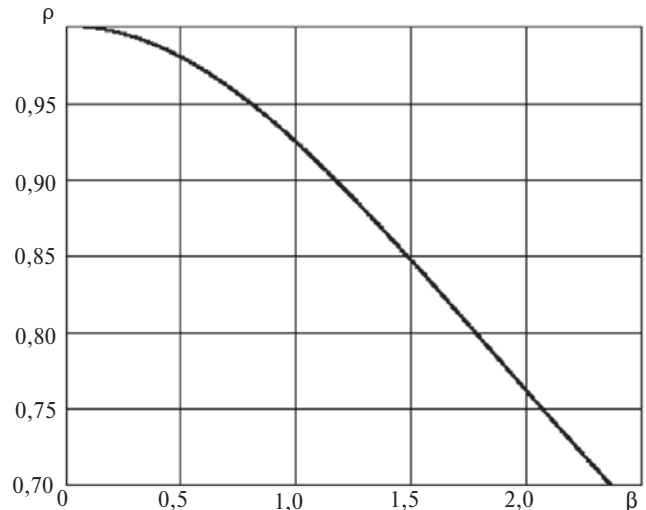


Рис. 4. Графическая зависимость коэффициента  $\gamma$  от отношения  $b = T / t$

На рис. 4 изображена графическая зависимость коэффициента  $\gamma$  от отношения  $b = T / t$ .

Можно считать допустимыми значения  $\gamma = 0,83, 0,90$ .

Рассмотрим работу БДПТ с восьмитактной коммутацией. На рис. 5 изображена соответствующая диаграмма состояния транзисторов  $VT1, VT4$ .

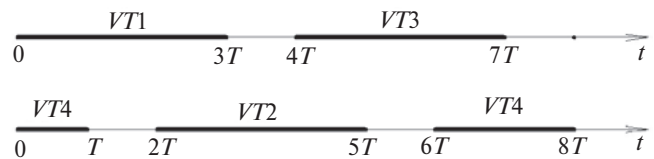


Рис. 5. Диаграмма состояния транзисторов при восьмитактной коммутации: — — транзистор открыт (проводит ток)

Период коммутации равен  $8T$ . Угловой размер МКИ равен  $45^\circ$  или  $\pi / 4$ , поэтому длительность МКИ  $T$  и отношение  $b = T / t$  вдвое меньше, чем при четырехтактной коммутации:

$$b = \frac{7,5}{\gamma n r C}.$$

Будем считать, что угловой размер  $\alpha$  меньшего основания трапеций ЭДС с уровнем  $E$  — не менее  $135^\circ$  или  $3\pi / 4$ , ЯО — диаметральной, сосредоточенная. Поэтому на каждом МКИ ЭДС секций, подключенных к источнику питания, неизменна и равна  $E$ .

Согласно рис. 2 и 5 длительность открытого состояния транзисторов при восьмитактной коммутации в полтора раза больше, чем при четырехтактной, поэтому значения тока ЯО и мощности также больше.

В то же время вращающий момент при изменении углового положения вала двигателя изменяется в два раза, поскольку происходит чередующееся подключение к источнику питания одной и двух

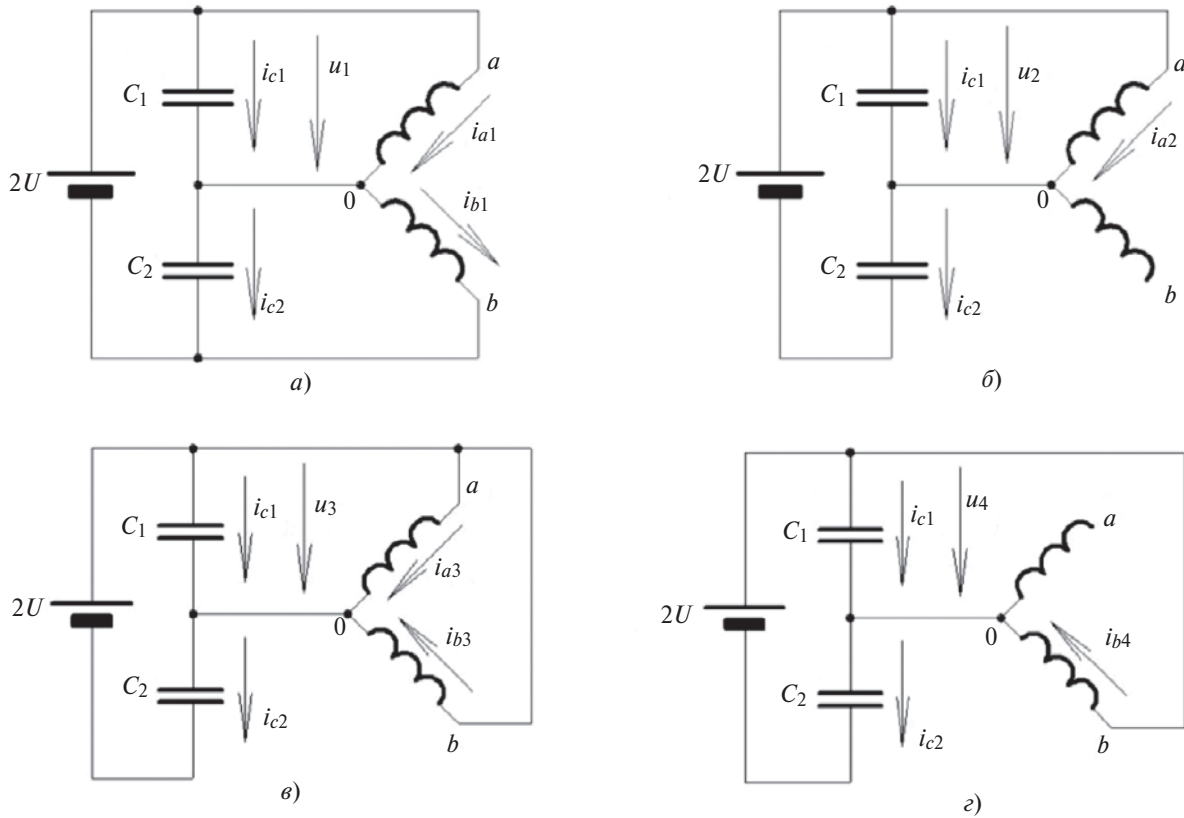


Рис. 6. Схемы соединения секций якорной обмотки с источником питания и делителем напряжения для первого, четвертого МКИ (а–г)

секций (рис. 1 и 5). К тому же затруднительно обеспечить угловой размер у равным 135°. Однако и при 135° > у 120° мощность при восьмитактной коммутации все же больше.

На рис. 6 изображены схемы соединения секций ЯО с источником питания и ДПН для первых четырех МКИ, т.е. на полупериоде коммутации.

Для первого МКИ согласно законам Кирхгофа справедливы уравнения:

$$u_1 - i_{a1}r = E; \quad 2U - u_1 - i_{b1}r = E;$$

$$i_{a1} = i_{b1} + i_{c2} - i_{c1} = \frac{2U - E - u_1}{r} - 2C \frac{du_1}{dt},$$

откуда следуют дифференциальное уравнение и его решение:

$$t \frac{du_1}{dt} + u_1 = U; \quad u_1 = U + U_{01}e^{-t/t}.$$

Для второго, третьего, четвертого и восьмого МКИ можно записать выражения, аналогичные таковым для четырехтактной коммутации. Так как по закону коммутации

$$u_1(T) = u_2(0); \quad u_2(T) = u_3(0); \quad u_3(T) = u_4(0),$$

то  $U_{02} = U - E + U_{01}e^{-b}$ ;

$$U_{03} = (U - E + U_{01}e^{-b})e^{-0,5b};$$

$$U_{04} = (U - E + U_{01}e^{-b})e^{-1,5b}.$$

Согласно формулам напряжения  $u_1, u_4$  уменьшаются, стремясь сначала к значению  $U$ , меньшему чем  $2U - E$ , а затем – к  $E$ , меньшему, чем  $U$ , и проходя значение, равное  $U$ . На втором полупериоде коммутации напряжения  $u_5, u_8$ , наоборот, увеличиваются, также проходя значение, равное  $U$ , поэтому, чтобы получить выражение для  $U_{01}$ , запишем уравнение:

$$u_1(0) + u_4(T) = U + U_{01} + E + (U - E + U_{01}e^{-b})e^{-2b} = 2U,$$

отсюда  $U_{01} = (U - E) \frac{1 - e^{-2b}}{1 + e^{-3b}}$ .

Можно установить, что

$$u_1(0) - U = U - u_4(T) = DU/2 = (1 - K_e) \frac{1 - e^{-2b}}{1 + e^{-3b}} U.$$

Примерные осциллограммы напряжения на конденсаторах имеют такой же вид, как на рис. 3, но период изменения напряжения равен  $8T$ .

Для примера определим значение  $DU/2$  при следующих условиях:  $U_H = 30$  В,  $P_{2H} = 10$  Вт,  $n_H = 3000$  об/мин,  $C = 104$  мкФ,  $b = 0,8$ ,  $K_e = 0,75$ :

$$DU/2 = (1 - K_e) \frac{1 - e^{-2b}}{1 + e^{-3b}} U = (1 - 0,75) \frac{1 - e^{-2 \cdot 0,8}}{1 + e^{-3 \cdot 0,8}} U =$$

$$= 0,183U = 5,49 \text{ В.}$$

Из выражений для напряжений  $u_1, u_4, U_{02}, U_{03}, U_{04}$  и общего выражения  $i = (u - E) / r$  можно получить формулы для токов в секциях ЯО на полупериоде коммутации:

$$i_{a1} = \frac{U - E}{r} + \frac{U_{01}}{r} e^{-t/t};$$

$$i_{a2} = \frac{U - E}{r} + \frac{U_{01}}{r} e^{-b \frac{t}{T} - 0,5t/t};$$

$$i_{a3} = \frac{U - E}{r} + \frac{U_{01}}{r} e^{-b \frac{t}{T} - 0,5b e^{-t/t}};$$

$$i_{a4} = \frac{U - E}{r} + \frac{U_{01}}{r} e^{-b \frac{t}{T} - 1,5b e^{-0,5t/t}}.$$

Для среднего значения тока, потребляемого ЯО от источника напряжением  $U$ , в соответствии с рис. 6 запишем выражение:

$$I = \frac{1}{4T} \int_0^T (2i_{a1} + i_{a2} + 2i_{a3} + i_{a4}) dt.$$

Применив выражения для токов  $i_{a1}, i_{a4}$  и выполнив преобразования, получим:

$$I = \frac{U - E}{2r} + \frac{2}{r} [U_{01} + (U - E + U_{01} e^{-b}) e^{-0,5b}] \cdot \frac{1}{4T} \int_0^T e^{-t/t} dt + \frac{1}{r} (U - E + U_{01} e^{-b}) (1 + e^{-1,5b}) \cdot \frac{1}{4T} \int_0^T e^{-0,5t/t} dt.$$

Применив выражение для  $U_{01}$ , после преобразований получим окончательно:

$$I = g \frac{U - E}{r},$$

где  $g = \frac{1}{2} + \frac{1}{b} \times \frac{1 - e^{-2b}}{1 + e^{-3b}}$ .

Отметим, что при питании БДПТ от источника напряжения со средней точкой

$$I = \frac{3}{2} \times \frac{U - E}{r}.$$

При  $C \neq \infty, b \neq 0$  значения  $g \approx 3/2$  (по правилу Лопитала  $\lim_{b \rightarrow 0} \frac{1 - e^{-2b}}{b} \approx 2$ ), тока  $I \approx \frac{3}{2} \times \frac{U - E}{r}$ ; при  $C \rightarrow \infty, b \neq 0$  значения  $g = 1/2, I = \frac{1}{2} \times \frac{U - E}{r}$ .

На рис. 7 изображена графическая зависимость коэффициента  $b$  от отношения  $b = T/t$ .

Можно считать допустимыми значения  $g = 1,25, 1,35$ .

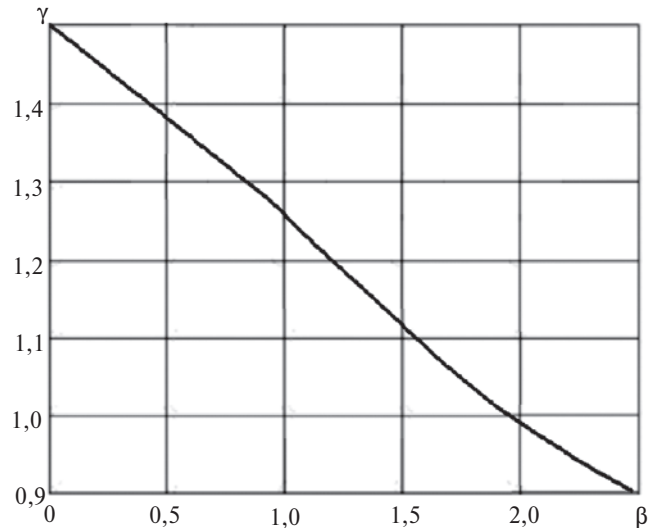


Рис. 7. Графическая зависимость коэффициента  $b$  от отношения  $b = T/t$

Из приведенных выше формул для отношения  $b = T/t$  получим выражения для необходимой ёмкости (мкФ) конденсаторов ДПН:

при четырехтактной коммутации  $C = \frac{15 \times 10^6}{b p n r}$ ;

при восьмитактной коммутации  $C = \frac{7,5 \times 10^6}{b p n r}$ .

Значения отношения  $b$  должны соответствовать допустимым значениям коэффициентов  $\gamma$  и  $g$ ; для определения таких значений  $b$  нужно использовать графические и аналитические зависимости  $\gamma(b)$  и  $g(b)$ .

Приведем примеры расчета ёмкости конденсаторов ДПН для случаев четырехтактной и восьмитактной коммутации при одинаковых условиях:  $U_H = 30 \text{ В}, P_{2H} = 10 \text{ Вт}, n_H = 3000 \text{ об/мин}, p = 3$ .

В первом случае допускаем  $r = 10 \text{ Ом}, \gamma = 0,9$ , тогда  $b = 1,2$ ; значение емкости

$$C = \frac{15 \times 10^6}{b p n r} = \frac{15 \times 10^6}{1,2 \times 3 \times 3000 \times 10} = 139 \text{ мкФ.}$$

Во втором случае допускаем  $r = 10 \text{ Ом}, g = 1,3$ , тогда  $b = 0,8$ ; значение емкости

$$C = \frac{7,5 \times 10^6}{b p n r} = \frac{7,5 \times 10^6}{0,8 \times 3 \times 3000 \times 10} = 104 \text{ мкФ.}$$

Напряжение на конденсаторах ДПН всегда однопольное, однополярное, что допускает применение малогабаритных электролитических конденсаторов. Из примеров расчета видно, что требуемые значения емкости электролитических конденсаторов ДПН вполне приемлемы.

Выполненный по схеме рис. 1 БДПТ, но без двух резисторов  $R_d$  с сопротивлением и контактов  $K$ , может не запуститься при подаче питающего напряжения из-за того, что при трогании двигателя



длительность МКИ  $T$  намного больше постоянной времени электрической цепи  $t$ . Для обеспечения пуска и разгона в схеме БДПТ (рис. 1) предусмотрены два резистора  $R_d$  и кнопка с двумя нормально разомкнутыми контактами  $K$ . При нажатии на кнопку параллельно конденсаторному ДПН подключится через контакты  $K$  резистивный ДПН, после отпускания кнопки резистивный ДПН отключится от конденсаторного ДПН и обесточится. Резистор и кнопка увеличивают пусковой момент БДПТ с восьмитактной коммутацией.

При разгоне двигателя рассеиваемая в резисторах  $R_d$  с сопротивлением энергия ничтожна по сравнению с энергией, рассеиваемой в ЯО при работе двигателя, из-за малого времени разгона. Поэтому указанные резисторы должны быть мало мощными.

Конденсаторный ДПН можно применять и при мощности БДПТ  $P_{2н}$ , большей 20 Вт. В этом случае индуктивность секций ЯО сильнее влияет на электромагнитные процессы, следовательно, полученные формулы для коэффициентов  $\gamma$ ,  $\varrho$  и значений отношения  $b = T/t$ , соответствующих допустимым значениям коэффициентов  $\gamma$  и  $\varrho$ , менее точны. Такие значения  $b$  нужно считать приближёнными, прикидочными применительно к формулам для определения требуемой ёмкости

конденсаторов ДПН, а ее значение уточнять экспериментально.

Рассмотренный БДПТ с конденсаторным ДПН как более простой и надежный вполне может конкурировать с БДПТ с трехсекционной ЯО и двухполупериодной коммутацией.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Овчинников И.Е., Лебедев Н.И. Бесконтактные двигатели постоянного тока. — Л.: Наука, 1979, 270 с.
2. Косулин В.Д., Михайлов Г.Б., Омельченко В.В., Путников В.В. Вентильные двигатели для промышленных роботов. — Л.: Энергоатомиздат, 1989, 184 с.
3. Балагуров В.А., Гридин В.М., Лозенко В.К. Бесконтактные двигатели постоянного тока с постоянными магнитами. — М.: Энергия, 1975, 128 с.
4. Попов В.П. Основы теории цепей: Учебник для вузов. — М.: Высшая школа, 2000, 575 с.
5. Вольдек А.И. Электрические машины: Учебник для вузов. — Л.: Энергия, 1974, 840 с.

[16.05.13]

*Автор: Гридин Владимир Михайлович окончил в 1963 г. электромеханический факультет Московского энергетического института (МЭИ). В 1979 г. защитил в МЭИ кандидатскую диссертацию «Исследование и расчет трехфазных бесконтактных двигателей постоянного тока с однополупериодной коммутацией». Доцент кафедры «Электротехника и промышленная электроника» Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.*

## A Contactless DC Motor with a Divider of Power Supply Voltage

V.M. GRIDIN

*A contactless DC motor with a two-section armature winding (AW) and fitted with a capacitive power supply voltage divider (SVD) is considered. Owing to the use of an SVD, the number of power transistors in the switching device is halved as compared with the contactless DC motor without a SVD, which contains eight power transistors. The functional dependence of the current consumed by the AW in case of using four- and eight-cycle switching of the AW sections is established as a function of the ratio of the interval between the switching moments to the product of the resistance of AW sections and the capacitance of SVD capacitors. Expressions for determining the required capacitance of SVD capacitors are obtained that take into account the contactless DC motor nominal characteristics, and the specific features of the motor starting mode are considered. The considered contactless DC motor with a capacitive SVD can be used under the same conditions as other types of contactless DC motors (i.e., under the conditions of vibration, acceleration, shocks, vacuum, chemically corrosive medium, etc.) and can compete with contactless DC motors having a three-section AW and operating with two half-cycle switching as a more simple and reliable device.*

*Key words: contactless DC motor, two-section armature winding, capacitive power supply voltage divider, four- and eight-cycle switching, consumed current*

*Author: Vladimir Mikhailovich Gridin graduated from the Electromechanical Department of the Moscow Power Engineering Institute (MPEI) in 1963. In 1979 he received the degree of Cand. Techn. Sci. from the MPEI. His thesis dealt with investigation and calculation of three-phase contactless DC motors with half-cycle switching. He is a lecturer in the Chair for Electrical Engineering and Industrial Electronics at the Bauman Moscow State Technical University.*