

СИНХРОННЫЙ БЕСЩЕТОЧНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ

В. С. НОВОКШЕНОВ, А. Б. ЦУКУБЛИН

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

В Советском Союзе и за рубежом в настоящее время широко применяются асинхронные электродвигатели повышенной частоты. Применение таких электродвигателей позволяет значительно снизить вес ручного электроинструмента (электропил, электросверл и т. д.), упростить конструкцию и эксплуатацию высокоскоростных станков в деревообрабатывающей и металлообрабатывающей промышленности, а также повышать производительность труда [3, 4].

Для питания асинхронных двигателей повышенной частоты обычно применяются или двухмашинные асинхронные преобразователи частоты, или агрегат асинхронный двигатель — синхронный генератор повышенной частоты. Недостатком этих преобразователей является наличие у них скользящего контакта, работа которого в сырых, запыленных помещениях, на открытом воздухе, а также во взрывоопасных средах крайне ненадежна или даже недопустима по условиям техники безопасности.

В настоящей статье дается описание и принцип действия синхронного бесщеточного преобразователя частоты (СБПЧ), предназначенного для питания 2—3 электросверл повышенной частоты.

Устройство и принцип действия

Синхронный бесщеточный преобразователь частоты представляет собой синхронную машину с внешнезамкнутым магнитным потоком. Пакет статора (2) СБПЧ ничем практически не отличается от пакета статора обычной трехфазной машины переменного тока. В пазы пакета статора укладываются две трехфазные обмотки: синхронного двигателя (3), имеющая число пар полюсов p_1 , и обмотка якоря синхронного генератора (4), имеющая число пар полюсов p_2 .

Ротор СБПЧ состоит из вала и двух одинаковых магниторазобренных частей, имеющих клювообразные полюса противоположной полярности с полюсным делением τ_1 . Корпус (1), подшипниковые щиты и магниторазобренные части ротора выполняются из стали с большой магнитной проницаемостью, например, Ст 10. Вал СБПЧ выполняется из немагнитной стали. Обмотка возбуждения состоит из двух катушек, расположенных концентрично оси ротора в кольцеобразных

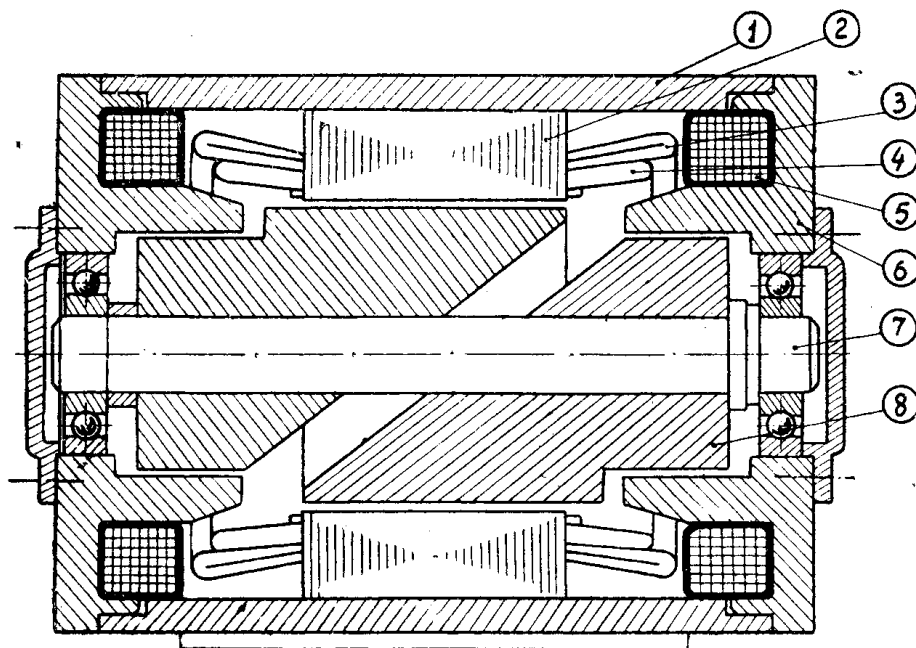


Рис. 1.

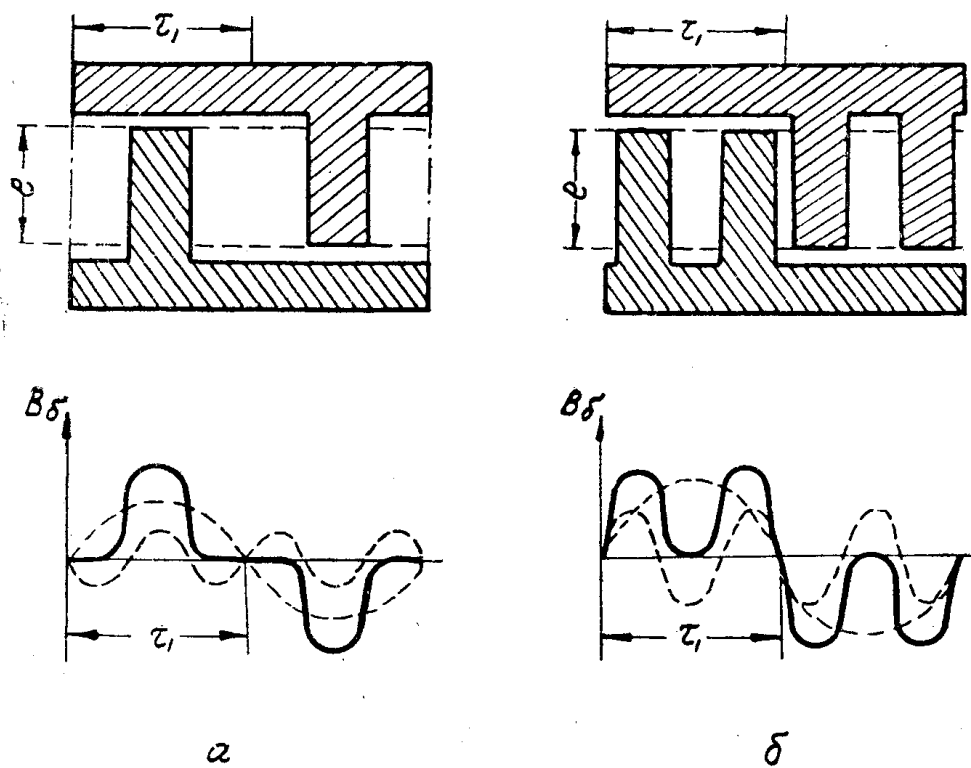


Рис. 2.

выступах подшипниковых щитов, и питается постоянным током от полупроводниковых выпрямителей.

М. д. с. обмотки возбуждения создает основной магнитный поток, который замыкается не внутри машины, а по внешнему магнитопроводу, образованному щитами, корпусом и ротором преобразователя.

Каждый полюс ротора по длине полюсного деления τ_1 , имеет явно выраженные провалы. При соответствующем числе и расположении этих провалов кривая распределения индукции в воздушном зазоре будет иметь кроме основной гармонической с числом пар полюсов p_1 ярко выраженную гармоническую с желаемым числом пар полюсов p_2 .

В [2, 3] приводится ряд магнитных систем для получения желаемых гармонических в кривой магнитной индукции в воздушном зазоре. На рис. 2 представлены развертки двух магнитных систем ротора СБПЧ, кривая магнитной индукции и выделенные из нее первая и третья гармонические для преобразователя на 150 гц.

При питании первичной обмотки трехфазным переменным током ротор преобразователя вращается, как ротор синхронной машины, синхронно с полем со скоростью

$$n = \frac{60f_1}{p_1},$$

где f_1 — частота питающей сети.

Выделенная гармоническая с числом пар полюсов p_2 индуцирует при этом во вторичной (генераторной) обмотке э. д. с. с частотой

$$f_2 = \frac{p_2 n}{60} = \frac{p_2}{p_1} \cdot f_1.$$

Таким образом, СБПЧ представляет собой электрическую машину, которая состоит из синхронного двигателя и синхронного генератора с общим магнитопроводом и общим магнитным полем, содержащим в воздушном зазоре две ярко выраженные гармонические с числом пар полюсов p_1 и p_2 . Пуск преобразователя асинхронный, подобный пуску асинхронного двигателя с массивным ротором.

Обмотки генератора и двигателя должны быть подобраны таким образом, чтобы между ними не было непосредственной трансформаторной связи. Математическое условие отсутствия трансформаторной связи между двумя обмотками может быть записано в виде

$$k_{w12} = k_{y12} \cdot k_{\beta12} \cdot k_{\gamma12} = 0;$$

$$k_{w21} = k_{y21} \cdot k_{\beta21} \cdot k_{\gamma21} = 0,$$

где k_{w12} , k_{y12} , $k_{\beta12}$, $k_{\gamma12}$ — соответственно обмоточный коэффициент, коэффициенты укорочения, распределения секций и распределения катушек обмотки 1 для поля обмотки 2, а k_{w21} , k_{y21} , $k_{\beta21}$, $k_{\gamma21}$ — обмоточный коэффициент, коэффициенты укорочения, распределения секций и распределения катушек обмотки 2 для поля обмотки 1. Если обмоточный коэффициент обмотки 2 для поля Φ_1 с числом пар полюсов p_1 равен нулю, то равны нулю и обмоточные коэффициенты обмотки 2 для всех полей высших пространственных гармонических с $p \neq p_2$, которые получаются при разложении кривой основного поля СБПЧ в гармонический ряд. Следовательно, э. д. с., индуцируемые этими высшими гармоническими в обмотке 2, равны нулю; поэтому при анализе физических процессов в СБПЧ мы их не рассматриваем.

Основные уравнения СБПЧ

Рассмотрим физику происходящих в преобразователе процессов. В режиме холостого хода м. д. с. обмоток возбуждения создает основной магнитный поток машины. Распределение магнитных индукций этого потока в воздушном зазоре при малом насыщении магнитной цепи и малом воздушном зазоре можно считать прямоугольным (рис. 3). Такое несинусоидальное поле может быть разложено на пер-

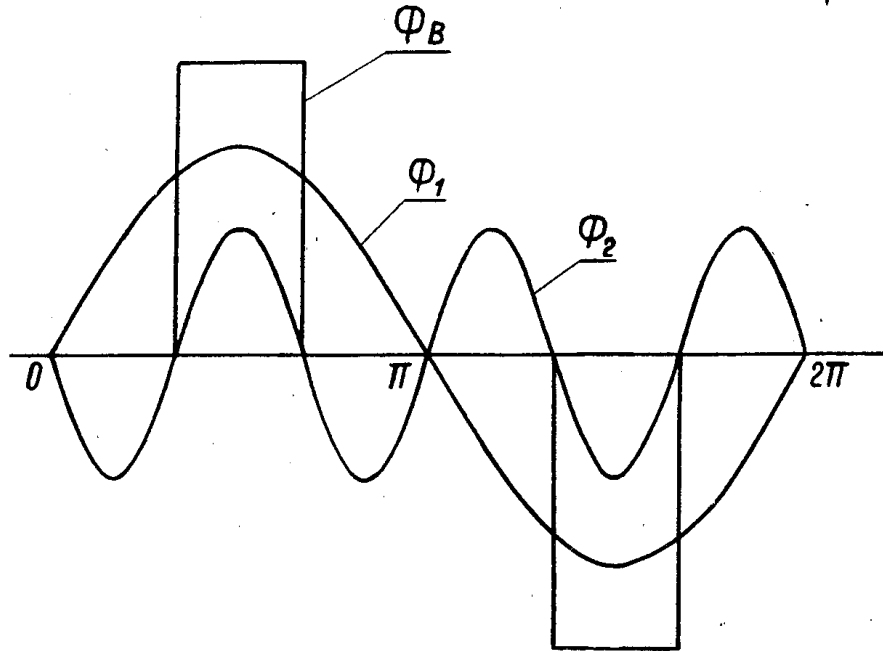


Рис. 3.

вую гармоническую с числом пар полюсов p_1 , гармоническую с числом пар полюсов p_2 и высшие гармонические, которые в дальнейшем не учитываем по причинам, указанным ранее. Эти выделенные потоки с числом пар полюсов p_1 и p_2 и создают основную э. д. с. двигателя E_1 и генератора E_2 , между которыми, как и в реактивных преобразователях [3], существует жесткая связь

$$\frac{E_{01}}{E_{02}} = \frac{k_{w1} \cdot \omega_1 \cdot f_1}{k_{w2} \cdot \omega_2 \cdot f_2} \cdot k_\Phi,$$

где k_{w1} , ω_1 — обмоточный коэффициент и число витков обмотки двигателя,

k_{w2} , ω_2 — обмоточный коэффициент и число витков обмотки генератора,

f_1 , f_2 — частоты двигателя и генератора.

$$k_\Phi = \frac{\Phi_{01}}{\Phi_{02}} = \frac{B_{m01} \cdot \tau_1 \cdot e}{B_{m02} \cdot \tau_2 \cdot e} = \frac{B_{m01} \cdot p_1}{B_{m02} \cdot p_2},$$

где B_{m01} — амплитуда первой гармонической с числом пар полюсов p_1 ,
 B_{m02} — амплитуда выделенной гармонической с числом пар полюсов p_2 .

При работе преобразователя на нагрузку создается реакция якоря как двигателя, так и генератора. Но так как в одном магнитопроводе совмещены две синхронные машины — двигатель и генератор, то

сложность рассмотрения процессов заключается в том, что реакция якоря двигателя влияет не только на сам двигатель, но и на генератор, а реакция якоря генератора влияет и на работу двигателя. При рассмотрении всех процессов, протекающих в преобразователе, воспользуемся, как и в случае обычных синхронных машин с явно выраженными полюсами, теорией двух реакций, считая, что продольная ось ($d-d$) совпадает с осью полюсов ротора.

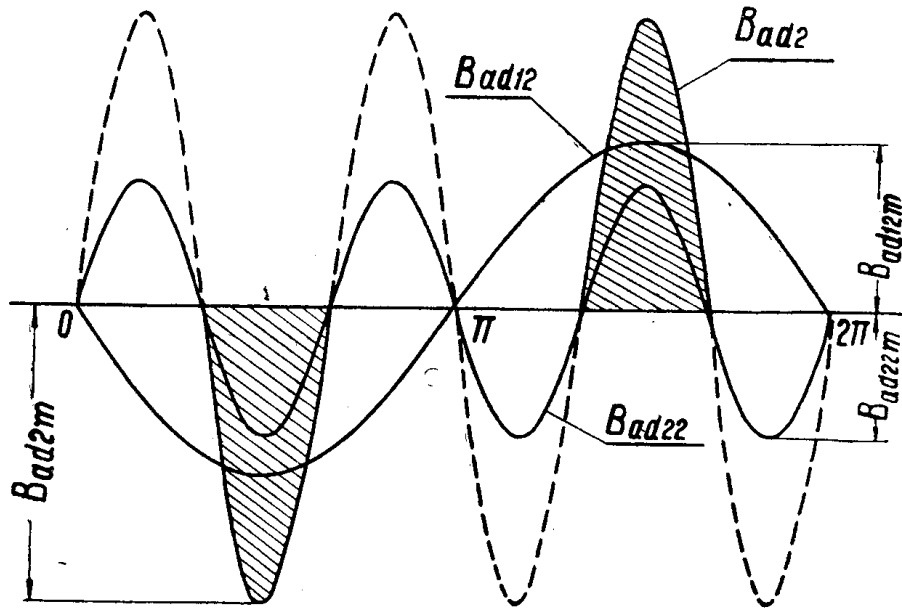


Рис. 4.

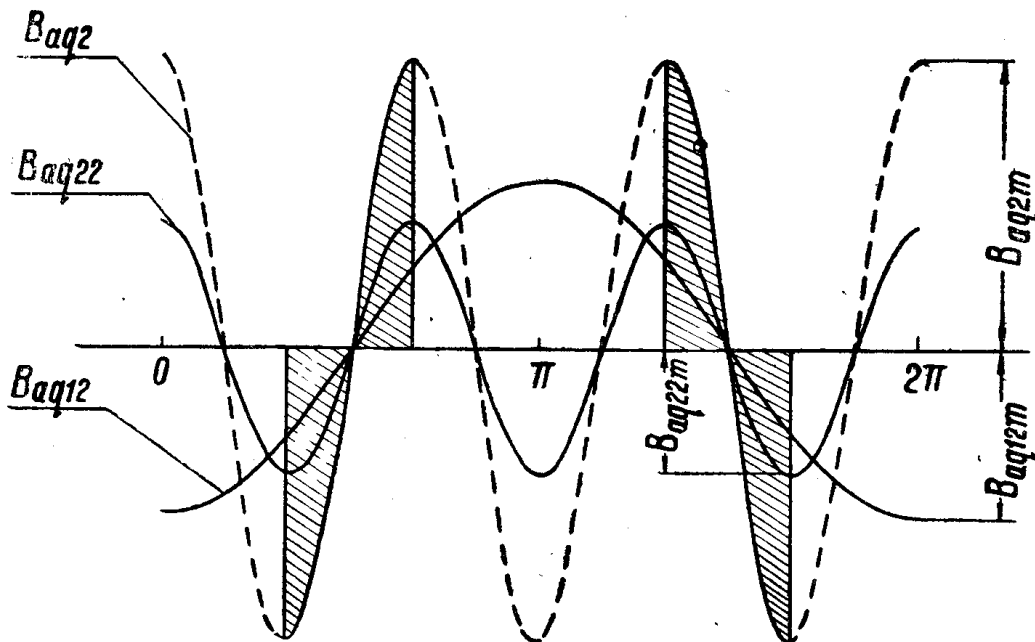


Рис. 5.

Поля Φ_{ad2} и Φ_{aq2} , созданные м. д. с. якоря генератора по продольной и поперечной осям, в воздушном зазоре имеют форму, изображенную соответственно на рис. 4, 5. Несинусоидальное поле реак-

ции якоря генератора по продольной оси Φ_{ad2} может быть разложено на поле реакции якоря генератора, на сам генератор Φ_{ad22} с числом пар полюсов p_2 и на поле реакции якоря генератора на двигатель Φ_{ad12} с числом пар полюсов p_1 . Поле реакции якоря генератора по поперечной оси Φ_{aq2} может быть разложено соответственно на Φ_{aq22} и Φ_{aq12} .

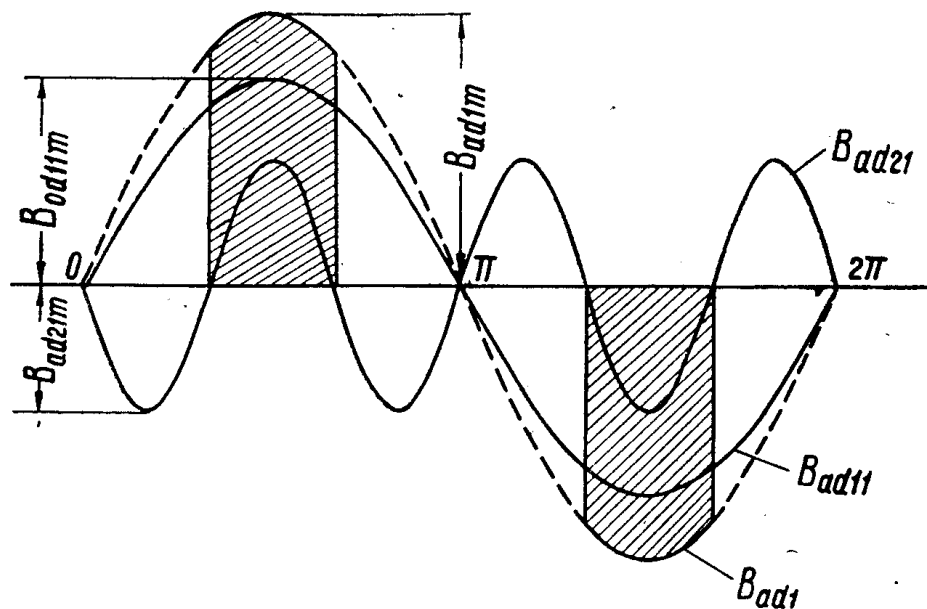


Рис. 6.

Поля по продольной и поперечной осям Φ_{ad1} и Φ_{aq1} , созданные м.д.с. якоря двигателя, в воздушном зазоре имеют форму, изображенную соответственно на рис. 6, 7.

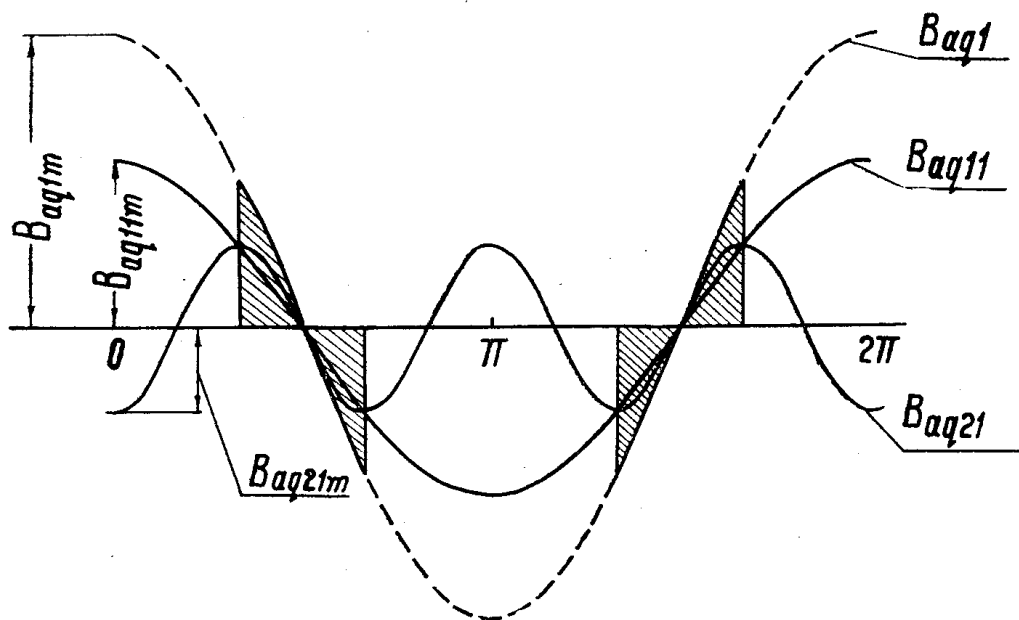


Рис. 7.

Эти поля так же, как и поля реакции якоря генератора, могут быть разложены на поля реакции якоря двигателя, на сам двигатель

Φ_{ad11} и Φ_{aq11} с числом пар полюсов p_1 и поля реакции якоря двигателя на генератор Φ_{ad21} и Φ_{aq21} с числом пар полюсов p_2 . Каждый из потоков реакции якоря двигателя и генератора будет индуцировать в соответствующих обмотках э. д. с., которые по общему правилу могут быть записаны в следующем виде:

$$\begin{aligned}\dot{E}_{ad11} &= -j\dot{I}_{d1} \cdot x_{d11}; & \dot{E}_{aq11} &= -j\dot{I}_{q1} x_{q11}; \\ \dot{E}_{ad12} &= -j\dot{I}_{d2} \cdot x_{d12}; & \dot{E}_{aq12} &= -j\dot{I}_{q2} \cdot x_{q12}; \\ \dot{E}_{ad22} &= -j\dot{I}_{d2} \cdot x_{d22}; & \dot{E}_{aq22} &= -j\dot{I}_{q2} \cdot x_{q22}; \\ E_{ad21} &= -jI_{d1} \cdot x_{d21}; & E_{aq21} &= -jI_{q1} \cdot x_{q21},\end{aligned}\quad (1)$$

где x_{d11} , x_{d22} , x_{q11} , x_{q22} — продольные и поперечные синхронные сопротивления самоиндукции генератора и двигателя, а x_{d12} , x_{d21} , x_{q12} , x_{q21} — продольные и поперечные синхронные сопротивления взаимной индукции, определяемые по формулам:

$$\begin{aligned}x_{dik} &= 2m_k \frac{\mu_0}{K_{p_d} K_{\delta} \cdot \delta} \cdot f_i \frac{\omega_k \cdot \omega_l \cdot K_{\omega k} \cdot K_{\omega l}}{P_i P_k} \cdot D l \cdot k_{dik}, \\ x_{qik} &= 2m_k \frac{\mu_0}{K_{p_q} \cdot K_{\delta} \cdot \delta} \cdot f_i \frac{\omega_k \cdot \omega_l \cdot K_{\omega k} K_{\omega l}}{P_i P_k} \cdot D l \cdot k_{qik},\end{aligned}$$

где $i=1,2$, $k=1,2$.

Значения k_{dik} и k_{qik} определяются как

$$k_{dik} = \frac{B_{adikm}}{B_{adim}}; \quad k_{qik} = \frac{B_{aqikm}}{B_{aqim}}.$$

Если пренебречь активными сопротивлениями обмоток ввиду их малости, что вполне допустимо для синхронных явнополюсных машин, учесть физику происходящих в преобразователе процессов, то можно записать уравнения равновесия э. д. с. как двигателя, так и для генератора (уравнения (2)):

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= -\dot{E}_{01} + j\dot{I}_{d1} x_{d11} + j\dot{I}_{q1} x_{q11} + j\dot{I}_{d2} x_{d12} + j\dot{I}_{q2} x_{q12}, \\ \dot{U}_2 &= \dot{E}_{02} - j\dot{I}_{d2} x_{d22} - j\dot{I}_{q2} x_{q22} - j\dot{I}_{d1} x_{d21} - j\dot{I}_{q1} x_{q21}.\end{aligned}\quad (2)$$

Исходя из уравнения равновесия э. д. с. и физики процессов векторная диаграмма преобразователя может быть изображена в следующем виде (рис. 8).

Анализ векторной диаграммы дает возможность получить некоторые уравнения, необходимые для расчета преобразователя:

$$\begin{aligned}U_1 \cos \Theta_1 &= E_{01} + I_{d1} x_{d11} - I_{q2} x_{d12} \sin(\varphi_2 + \Theta_2), \\ U_1 \sin \Theta_1 &= I_{q1} x_{q11} - I_{d2} x_{q12} \cos(\varphi_2 + \Theta_2), \\ U_2 \cos \Theta_2 &= E_{02} + I_{d1} x_{d21} - I_{q2} x_{d22} \sin(\varphi_2 + \Theta_2), \\ U_2 \sin \Theta_2 &= I_{q2} x_{q22} \cos(\varphi_2 + \Theta_2) - I_{q1} x_{q21}.\end{aligned}\quad (3)$$

Электромагнитная мощность может быть найдена при принятых допущениях о пренебрежении активными сопротивлениями следующим образом:

$$\begin{aligned}P_{эм2} &= m_2 U_2 I_2 \cos \varphi_2 = m_2 U_2 I_2 \cos(\varphi_2 - \Theta_2) = \\ &= m_2 U_2 I_2 \sin \varphi_2 \cdot \sin \Theta_2 + m_2 U_2 I_2 \cos \varphi_2 \cdot \cos \Theta_2 = \\ &= m_2 U_2 I_{d2} \cdot \sin \Theta_2 + m_2 U_2 I_{q2} \cos \Theta_2.\end{aligned}$$

Подставляя в это уравнение значения I_{d2} и I_{q2} из уравнений (3), окончательно получаем электромагнитную мощность генератора

$$P_{эм2} = m_2 U_2 \left(\frac{E_{02} x_{d11}}{x'_d} - \frac{E_{01} x_{d21}}{x'_d} \right) \cdot \sin \theta_2 + m_2 \frac{U_2^2}{2} \left(\frac{x_{q11}}{x'_q} - \frac{x_{d11}}{x'_d} \right) \sin 2\theta_2 + \\ + m_2 U_1 U_2 \left(\sin \theta_1 \cos \theta_2 \cdot \frac{x_{q21}}{x'_q} + \sin \theta_2 \cos \theta_1 \frac{x_{d21}}{x'_d} \right),$$

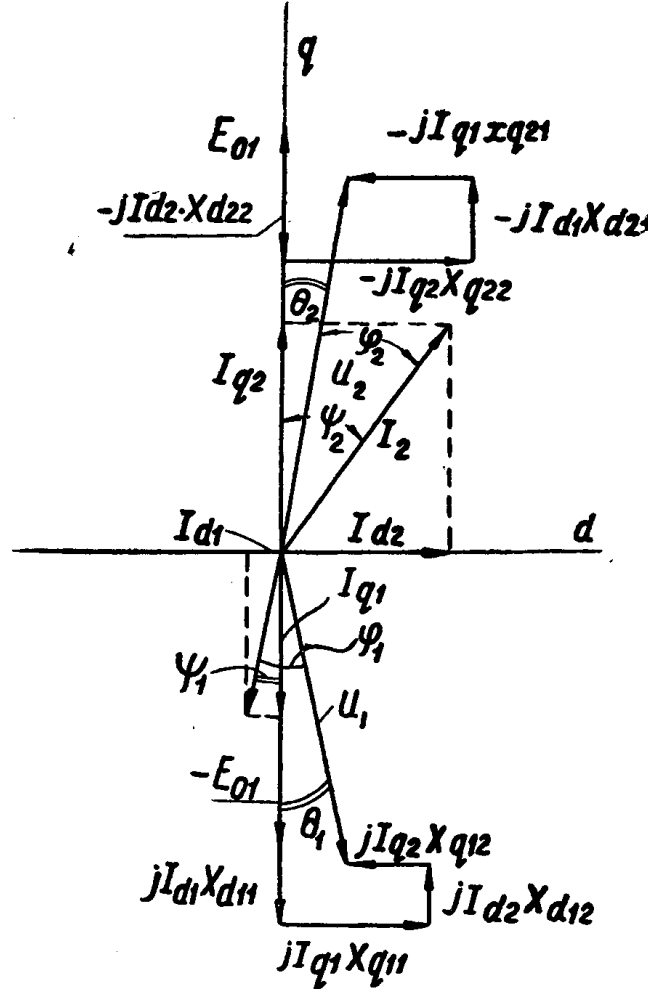


Рис. 8.

где:

$$x'_d = x_{d11} \cdot x_{d22} - x_{d21} \cdot x_{d12},$$

$$x'_q = x_{q11} \cdot x_{q22} - x_{q21} \cdot x_{q12}.$$

Электромагнитная мощность двигателя запишется аналогично

$$P_{эм1} = m_1 U_1 \left(\frac{E_{01} x_{d22}}{x'_d} - \frac{E_{02} x_{d12}}{x'_d} \right) \cdot \sin \theta_1 + m_1 \frac{U_1^2}{2} \left(\frac{x_{q22}}{x'_d} - \frac{x_{d22}}{x'_d} \right) \sin 2\theta_1 + m_1 U_1 \cdot U_2 \left(\sin \theta_2 \cos \theta_1 \frac{x_{q12}}{x'_q} + \sin \theta_1 \cos \theta_2 \frac{x_{d12}}{x'_d} \right).$$

На основе приведенных уравнений СБПЧ разрабатывается в настоящее время методика расчета преобразователя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авторское свидетельство, № 130966. 1960.
 2. В. С. Новокшенов. Исследование асинхронного бесщеточного преобразователя частоты. Диссертация, Томск, 1961.
 3. М. М. Тарашанский. Синхронно-реактивные преобразователи частоты. Укртехиздат, 1962.
 4. П. П. Барзилович, Г. М. Янчук и др. Преобразователи частоты для питания рудничных электросверл. Информационный справочник внедрения новой техники, ЭМЗ «Красный металлист», Конотоп, 1957.
-