

## 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  $\tau_1$ . 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 concentрично оси ротора в кольцеобразных



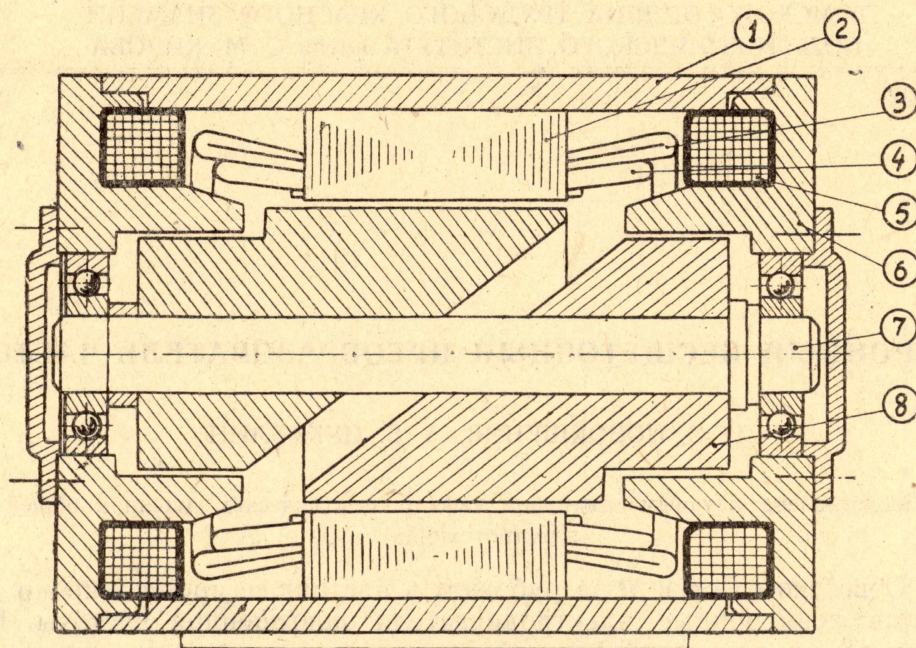


Рис. 1.

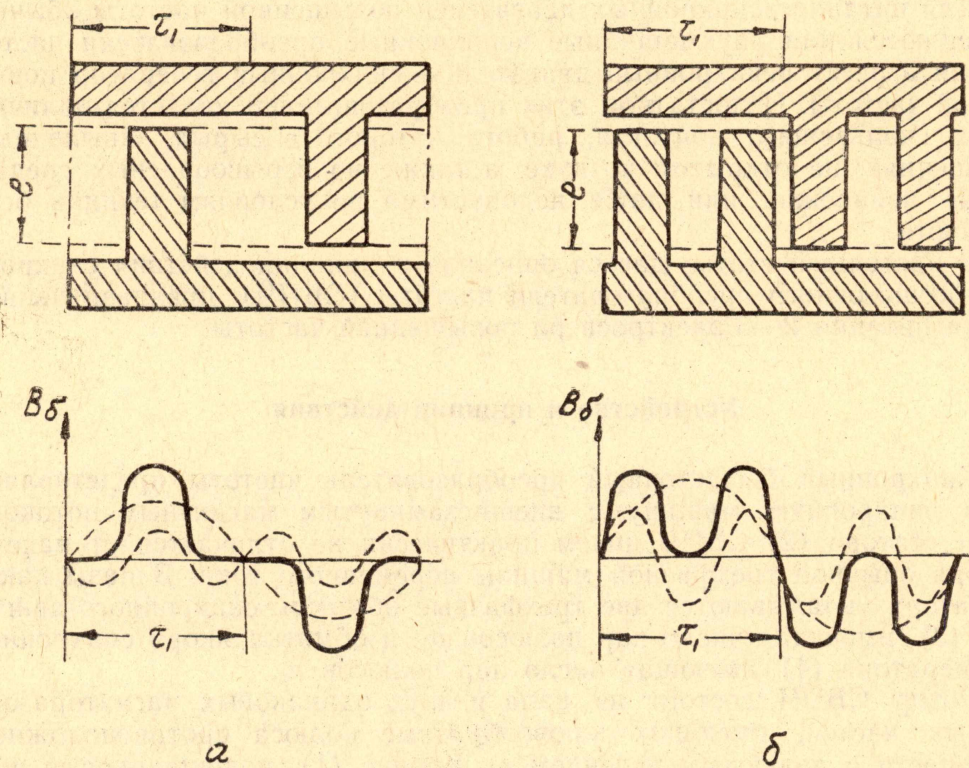


Рис. 2.



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  $\tau_1$ , 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

$$k_{w12} = k_{y12} \cdot k_{\beta12} \cdot k_{\epsilon12} = 0;$$

$$k_{w21} = k_{y21} \cdot k_{\beta21} \cdot k_{\epsilon21} = 0,$$

где  $k_{w12}$ ,  $k_{y12}$ ,  $k_{\beta12}$ ,  $k_{\epsilon12}$  — соответственно обмоточный коэффициент, коэффициенты укорочения, распределения секций и распределения катушек обмотки 1 для поля обмотки 2, а  $k_{w21}$ ,  $k_{y21}$ ,  $k_{\beta21}$ ,  $k_{\epsilon21}$  — обмоточный коэффициент, коэффициенты укорочения, распределения секций и распределения катушек обмотки 2 для поля обмотки 1. Если обмоточный коэффициент обмотки 2 для поля  $\Phi_1$  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-

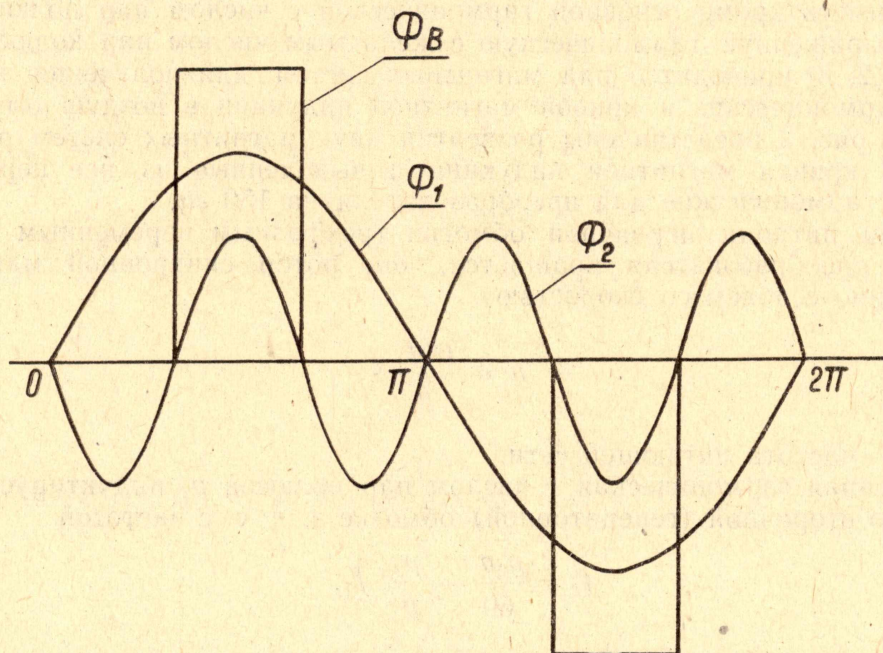


Рис. 3.

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

$$\frac{E_{01}}{E_{02}} = \frac{k_{w1} \cdot w_1 \cdot f_1}{k_{w2} \cdot w_2 \cdot f_2} \cdot k_{\Phi},$$

где  $k_{w1}$ ,  $w_1$  — обмоточный коэффициент и число витков обмотки двигателя,

$k_{w2}$ ,  $w_2$  — 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.

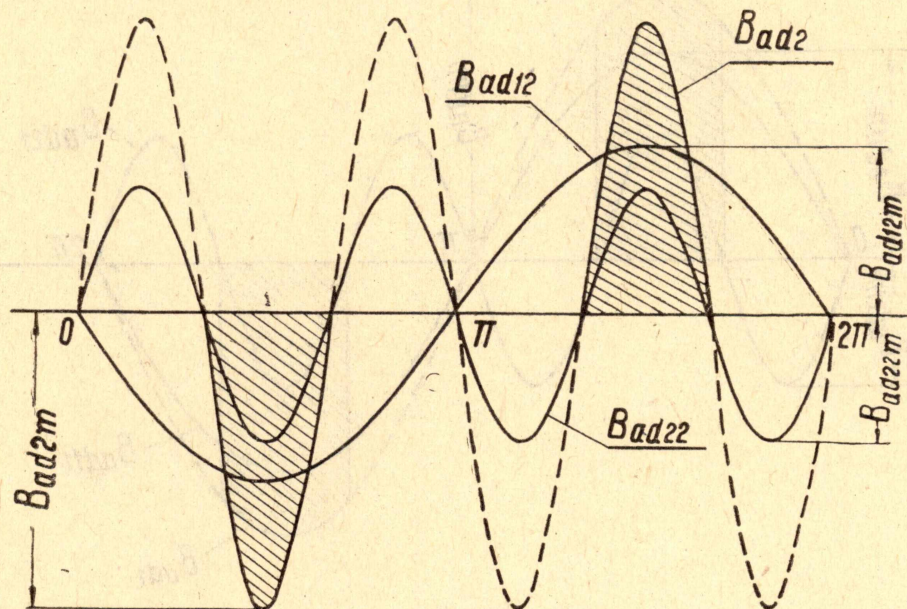


Рис. 4.

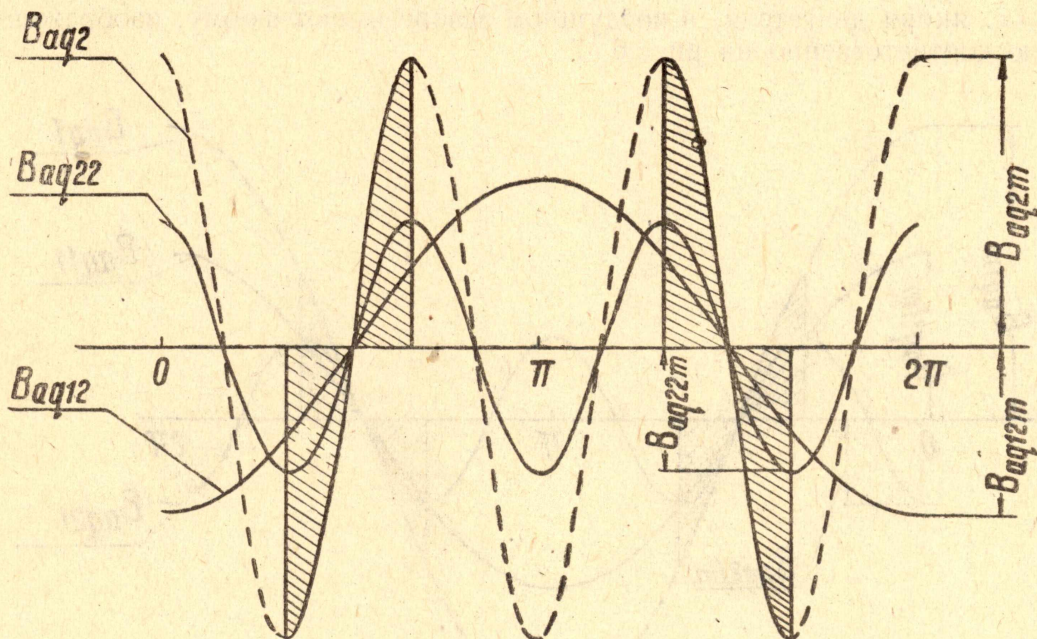


Рис. 5.

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

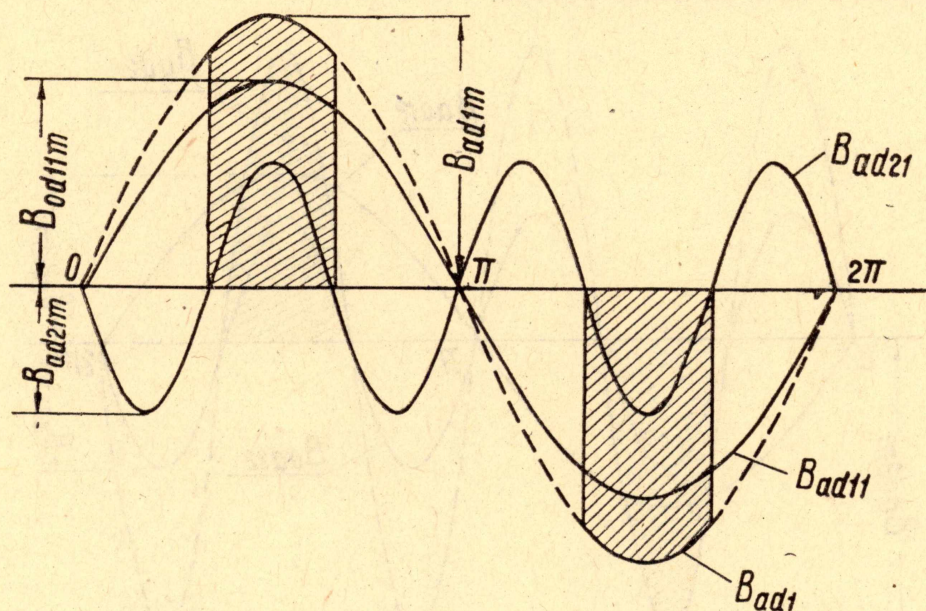


Рис. 6.

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

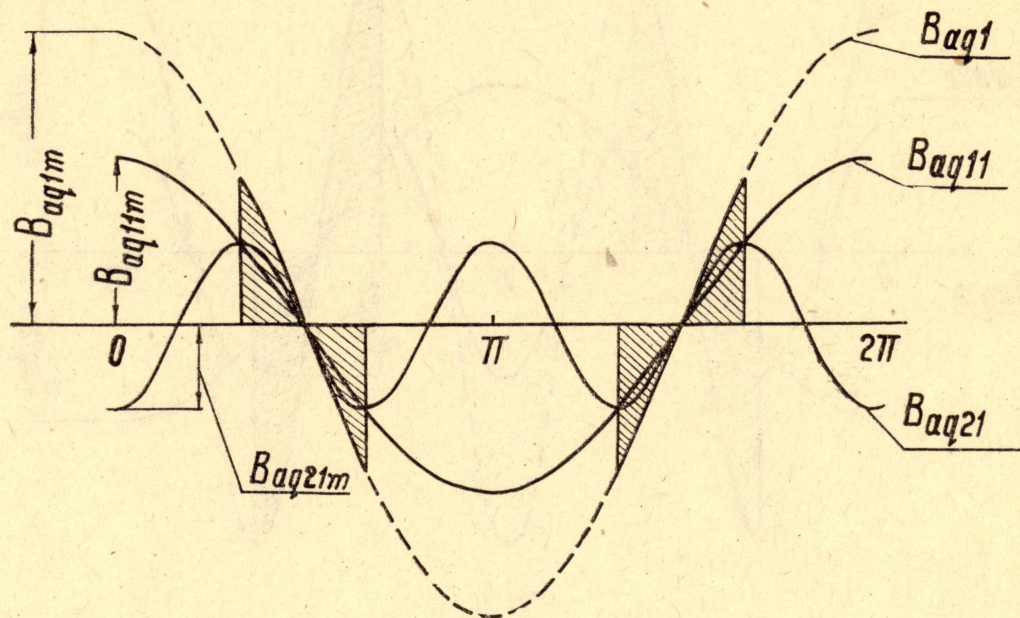


Рис. 7.

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



$\Phi_{ad11}$  и  $\Phi_{aq11}$  с числом пар полюсов  $p_1$  и поля реакции якоря двигателя на генератор  $\Phi_{ad21}$  и  $\Phi_{aq21}$  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:

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

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:

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

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:

$$\begin{aligned} P_{\text{эм2}} &= m_2 U_2 I_2 \cos \varphi_2 = m_2 U_2 I_2 \cos(\psi_2 - \Theta_2) = \\ &= m_2 U_2 I_2 \sin \psi_2 \cdot \sin \Theta_2 + m_2 U_2 I_2 \cos \psi_2 \cdot \cos \Theta_2 = \\ &= m_2 U_2 I_{d2} \cdot \sin \Theta_2 + m_2 U_2 I_{q2} \cos \Theta_2. \end{aligned}$$



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

$$P_{эм2} = m_2 U_2 \left( \frac{E_{02} x_{d11}}{x'_d} - \frac{E_{01} x_{d21}}{x'_d} \right) \cdot \sin \Theta_2 + m_2 \frac{U_2^2}{2} \left( \frac{x_{q11}}{x'_q} - \frac{x_{d11}}{x'_d} \right) \sin 2\Theta_2 + \\ + m_2 U_1 U_2 \left( \sin \Theta_1 \cos \Theta_2 \cdot \frac{x_{q21}}{x'_q} + \sin \Theta_2 \cos \Theta_1 \frac{x_{d21}}{x'_d} \right),$$

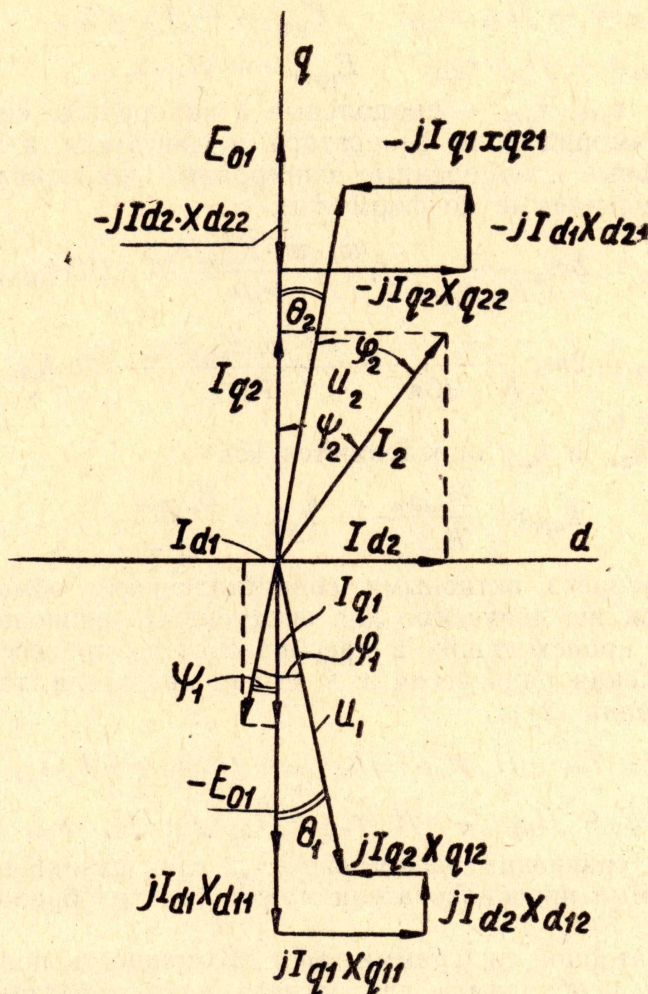


Рис. 8.

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

$$P_{эм1} = m_1 U_1 \left( \frac{E_{01} x_{d22}}{x'_d} - \frac{E_{02} x_{d12}}{x'_d} \right) \cdot \sin \Theta_1 + m_1 \frac{U_1^2}{2} \cdot \left( \frac{x_{q22}}{x'_d} - \frac{x_{d22}}{x'_d} \right) \sin 2\Theta_1 + m_1 U_1 \cdot U_2 \left( \sin \Theta_2 \cos \Theta_1 \frac{x_{q12}}{x'_q} + \sin \Theta_1 \cos \Theta_2 \frac{x_{d12}}{x'_d} \right).$$

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.