

## УЧЕТ ВЛИЯНИЯ НАСЫЩЕНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ СИНХРОННЫХ РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Е. В. КОНОНЕНКО, А. Н. АЙФЕРТ, Б. П. ГАРГАНЕЕВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин  
и общей электротехники)

При расчете магнитных полей в воздушном зазоре синхронных явнополюсных машин, в том числе и синхронных реактивных двигателей [1], используется теория двух реакций, что обуславливает применение принципа наложения магнитных полей. Последнее строго справедливо только для ненасыщенных магнитных цепей. Синхронные реактивные двигатели в целях лучшего использования активных материалов выполняются с насыщенной магнитной цепью, поэтому при расчете это обстоятельство необходимо учитывать.

В [2, 3] влияние насыщения учитывается, исходя из приближенно определенной картины магнитного поля в воздушном зазоре при различных углах нагрузки синхронного реактивного двигателя. При более точном построении картины поля и для усовершенствованных синхронных реактивных двигателей этим методом воспользоваться практически не представляется возможным. При учете влияния насыщения магнитной цепи на параметры синхронных реактивных двигателей целесообразно использовать метод «приближенной суперпозиции», получившей широкое применение при исследовании электрических машин [4, 5]. Этот метод предполагает, что насыщение влияет только на величину магнитного потока, а форма кривых распределения индукции в воздушном зазоре не зависит от степени насыщения. Уменьшение величины магнитного потока в этом случае можно учесть так же, как и зубчатость поверхностей статора и ротора — увеличением воздушного зазора посредством коэффициента насыщения.

Руководствуясь этим методом можно с достаточной точностью рассчитать синхронные индуктивные сопротивления синхронного реактивного двигателя в предельных положениях ротора: когда продольная ось ротора совпадает с осью намагничивающей силы (н. с.) обмотки статора ( $x_d$ ) и в случае когда с осью н. с. обмотки статора совпадает поперечная ось ротора ( $x_q$ ). При исследовании режимов работы и расчете рабочих характеристик реактивных двигателей обычно считают, что сопротивления  $x_d$  и  $x_q$  не зависят от величины нагрузки. Этим и можно объяснить то обстоятельство, что при расчете по существующим методикам рабочие характеристики значительно отличаются от полученных экспериментально. При учете влияния насыщения на параметры синхронных реактивных двигателей при изменении нагрузки необходимо учитывать следующее. При идеальном холостом ходе основной магнитный поток замыкается по продольной оси ротора. С увеличением нагрузки магнитный поток по продольной оси ротора уменьшается, так

как часть основного магнитного потока проходит по поперечной оси ротора, а магнитный поток по поперечной оси возрастает. Это приводит к тому, что с увеличением нагрузки насыщение по продольной оси уменьшается, а насыщение по поперечной оси увеличивается. Изменение насыщения магнитной цепи по осям  $d$  и  $q$  обуславливает соответствующее изменение сопротивлений  $x_d$  и  $x_q$ . При увеличении нагрузки синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси  $x_d$  увеличивается, синхронное индуктивное сопротивление по поперечной оси  $x_q$  уменьшается.

Применяя метод приближенной суперпозиции, естественно предположить, что изменение насыщения по осям  $d$  и  $q$  не оказывает взаимного влияния. Это позволяет рассчитать или определить экспериментально зависимости синхронных реактивных сопротивлений  $x_d$  и  $x_q$  в функции от напряжения  $U$ , подведенного к обмотке статора. На рис. 1 представлены зависимости  $x_d = f(u)$  и  $x_q = f(u)$ , определенные эксперимен-

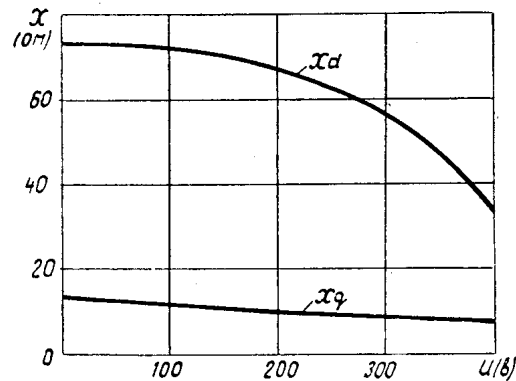


Рис. 1. Зависимости параметров  $x_d$ ,  $x_q$  от напряжения, подводимого к обмотке статора.

тально для усовершенствованного синхронного реактивного двигателя.

При расчете рабочих характеристик (при  $U = \text{const}$ ) влияние насыщения на параметры синхронного реактивного двигателя можно определить следующим образом. Для любой заданной величины нагрузки, определяемой углом  $\theta$ , находятся составляющие напряжения по продольной  $U_d$  и поперечной ( $U_q$ ) осям ротора

$$\begin{aligned} U_d &= U \sin \theta, \\ U_q &= U \cos \theta \end{aligned} \quad (1)$$

Продольная составляющая напряжения создает магнитный поток по поперечной оси, поперечная составляющая напряжения — магнитный поток по продольной оси. Следовательно, по известной зависимости  $x_d = f(u)$  и составляющей напряжения  $U_q$  для любого заданного угла нагрузки ( $\theta$ ) можно определить величину  $x_d$  с учетом насыщения. Аналогично определяется сопротивление  $x_q$  при известных  $x_q = f(U)$  и  $U_d$ .

На рис. 2 приведены кривые изменения параметров  $x_d$  и  $x_q$  и отношения  $\frac{x_d}{x_q}$  в зависимости от угла нагрузки ( $\theta$ ), построенные описан-

ным выше методом с учетом данных рис. 1. Как следует из этих кривых, с увеличением нагрузки  $x_d$  возрастает, а  $x_q$  уменьшается. Причем изменение  $x_d$  происходит в значительно больших пределах, чем  $x_q$ . Последнее объясняется тем, что в усовершенствованных синхронных реактивных двигателях насыщение магнитной цепи по поперечной оси оказывает меньшее влияние на работу двигателя, так как магнитный поток

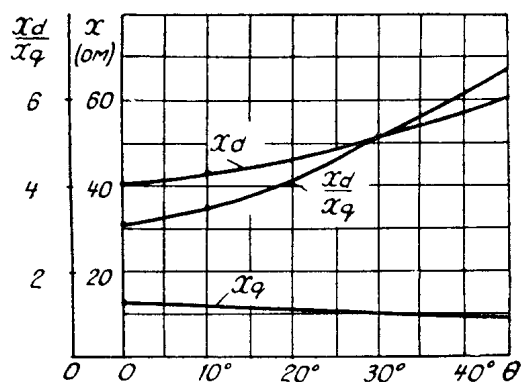


Рис. 2. Зависимости параметров  $X_d$ ,  $X_q$  и отношения  $\frac{X_d}{X_q}$  от угла нагрузки.

по поперечной оси встречает на своем пути значительные немагнитные промежутки (воздушный зазор, дополнительные внутренние пазы, междуполюсное пространство). Изменение параметров  $x_d$  и  $x_q$  приводит к тому, что отношение  $\frac{X_d}{X_q}$  с увеличением нагрузки возрастает от величины

равной 3,1 (при  $\Theta=0^\circ$ ) до 6,7 (при  $\Theta=45^\circ$ ). Известно, что отношение

$\frac{X_d}{X_q}$ , в основном, и определяет величину максимальных значений

$\cos(\varphi_{\min})$  и мощности  $P_{2\max}$  двигателя. Следовательно, при учете насыщения с увеличением нагрузки  $\cos(\varphi_{\min})$  и  $P_{2\max}$  возрастают.

Зная, как изменяются параметры  $x_d$  и  $x_q$  в зависимости от угла нагрузки, можно рассчитать рабочие характеристики с учетом насыщения. Наиболее просто расчет рабочих характеристик выполняется при помощи круговых диаграмм. Для заданной величины нагрузки определяются значения  $x_d$ ,  $x_q$  с учетом насыщения и строится круговая диаграмма, из которой определяются все величины, характеризующие данный режим работы двигателя. Построив таким образом необходимое количество точек для различных углов нагрузки, определяем рабочие характеристики.

На рис. 3 приведены рабочие характеристики усовершенствованного синхронного реактивного двигателя, рассчитанные с учетом влияния насыщения изложенным выше методом и определенные экспериментально. Кривые зависимости сопротивлений  $x_d$ ,  $x_q$  от напряжения и нагрузки для данного двигателя представлены на рис. 1 и 2.

Как следует из рис. 3, рассчитанные данные рабочих характеристик практически совпадают с экспериментальными. Это позволяет сделать вывод, что предлагаемая методика расчета рабочих характеристик с учетом влияния насыщения магнитной цепи достаточно точно отражает процессы, происходящие в синхронных реактивных двигателях, и может быть рекомендована для практики.

При расчете рассмотренных выше рабочих характеристик зависимости  $x_d=f(U)$  и  $x_q=f(U)$  определялись экспериментально. Для того чтобы рассчитать эти зависимости, необходимо построить характеристики намагничивания по продольной и поперечной осям синхронного реактивного двигателя. Для этого необходимо рассчитать магнитную цепь по осям  $d$  и  $q$  при различных значениях напряжений. Для расчета магнитной цепи и сопротивлений  $x_d$  и  $x_q$  необходимо знать коэффициенты, характеризующие магнитное поле в воздушном зазоре [1].

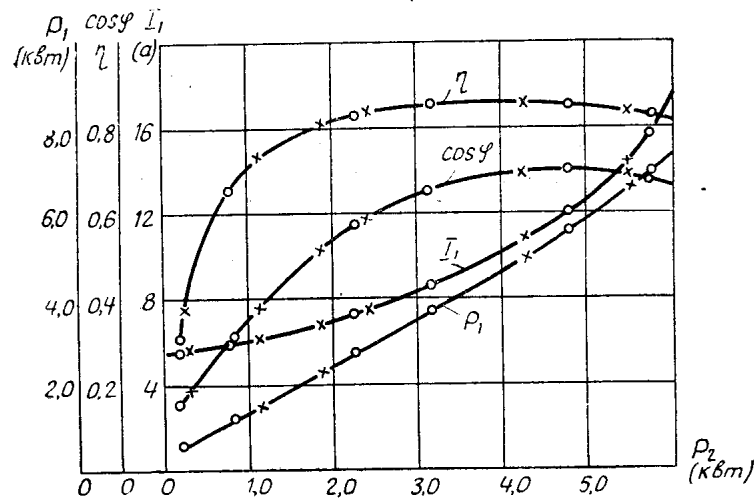


Рис. 3. Рабочие характеристики синхронного реактивного двигателя. о — расчетные точки, х — определенные экспериментально.

Расчет магнитной цепи по осям  $d$  проводится при предположении, что весь магнитный поток замыкается по продольной оси. Порядок расчета следующий.

По заданному напряжению определяется первая гармоническая э. д. с.

$$E_{ad1} = k_{ed} \cdot U, \quad (2)$$

где  $k_{ed}$  — коэффициент, учитывающий падение напряжения в активном сопротивлении и сопротивлении рассеяния обмотки статора от тока  $I_d$ .

Первая гармоническая магнитная потока  $\Phi_{d1}$  определяется по формуле

$$\Phi_{d1} = \frac{E_{ad1}}{4,44 W_1 k_{об1} f}. \quad (3)$$

При расчете магнитной цепи недостаточно знания величины  $\Phi_{d1}$ , так как кривая поля не является синусоидальной, а для расчета индукции и н. с. в каждом участке магнитной цепи необходимо знать реальное значение магнитного потока.

Полный магнитный поток по продольной оси определяется как

$$\Phi_d = k_{\Phi d} \cdot \Phi_{d1}. \quad (4)$$

Н. с. в зубцах и воздушном зазоре определяется по максимальной индукции в воздушном зазоре, равной

$$B_{md} = \frac{\Phi_d}{\alpha_d \tau \cdot l} \quad (5)$$

Расчет магнитной цепи для номинального напряжения позволяет определить намагничивающую составляющую тока холостого хода. Задаваясь различными значениями э. д. с., можно рассчитать характеристику намагничивания, используя которую можно для любого заданного значения напряжения определить коэффициент насыщения по продольной оси  $k_{\mu d}$ , равный отношению всей н. с. магнитной цепи к н. с. воздушного зазора, и учесть влияние насыщения на индуктивное сопротивление  $x_d$ .

Расчет магнитной цепи по оси  $q$  проводится при предположении, что весь магнитный поток замыкается по поперечной оси. При расчете

используются уравнения (2) — (5), в которых индексы d заменяются на q. Рассчитав магнитную цепь для различных э. д. с., строят характеристику намагничивания по поперечной оси, используя которую можно определить коэффициент насыщения по поперечной оси  $k_{\mu q}$  и учесть таким образом влияние насыщения на сопротивление  $x_q$ .

Синхронные индуктивные сопротивления по продольной и поперечной осям определяются из выражения:

$$x_d = x_s + x_{ad}; \quad (6)$$

$$x_q = x_s + x_{aq}; \quad (7)$$

$$x_{ad} = x_m \frac{k_d}{k_{\pm d}}; \quad (8)$$

где

$$x_{aq} = x_m \frac{k_q}{k_{\mu q}}; \quad (9)$$

$$x_m = \frac{4}{\pi} f_1 \mu_0 \frac{m w_1^2 k^2_{об1}}{p} \frac{\tau \cdot l}{k_\delta \cdot \delta}. \quad (10)$$

$x_m$  — индуктивное сопротивление в предположении, что ротор цилиндрический, выраженное через конструктивные данные двигателя.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Е. В. Кононенко, А. Н. Айферт. О расчете магнитных полей синхронных реактивных машин, Известия ТПИ, т. 145, 1966.
2. W. Schuisky, Beitrag zur Theorie und Berechnung des Reaktionsmotors, AFE в. 39, 1950.
3. А. М. Ланген. Особенности расчета синхронного режима реактивного двигателя, Электричество. № 9, 1964.
4. М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. Электрические машины, часть II, ГЭИ, 1958.
5. В. В. Аписит. Система допущений и упрощенных методов для исследования магнитного поля в воздушном зазоре электрических машин с когтеобразными полюсами, Сб. Бесконтактные электрические машины, III, Рига, 1963.