

ОБРАЩЕННАЯ КРУГОВАЯ ДИАГРАММА СИНХРОННО-РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Б. П. ГАРГАНЕЕВ

(Рекомендована научным семинаром кафедр электрических машин и аппаратов и общей электротехники.)

Синхронно-реактивные двигатели (СРД), имея определенные технико-экономические преимущества и высокую эксплуатационную надежность, находят широкое применение в промышленности [1 и др.]. Их распространение до последнего времени в основном ограничивалось маломощными приводами. В последние годы проведена большая работа по улучшению эксплуатационных характеристик СРД и приближению их к асинхронным. Усовершенствованные СРД за рубежом успешно конкурируют с другими типами синхронных двигателей при мощности до $30 \div 35$ кВт [2 и др.].

Однако в вопросах теории и проектирования СРД много нерешенных вопросов. Построению круговых диаграмм синхронного режима СРД (далее в данной статье просто круговых диаграмм), как наиболее наглядной и всеобъемлющей форме расчета, посвящен ряд работ [1 \div 5 и др.]. Возможность построения круговой диаграммы тока СРД известна давно. Так как момент СРД жестко связан с углом рассогласования продольной оси явнополюсного ротора с магнитным потоком, то все исследования, особенно в начальный период развития теории СРД, проводились в зависимости от угла рассогласования продольной оси ротора и вектора тока. В этом случае, как показано автором [3], круговая диаграмма вектора тока СРД получается обращенной. В [3] отражено только принципиальное решение вопроса, исследований с учетом особенностей СРД не проведено. Большое практическое значение имеет при расчетах СРД учет потерь в меди и стали, насыщения стали, а также учет потоков рассеяния.

Круговая диаграмма СРД вида, широко применяемого в асинхронных машинах, получается, если аргументом принять угол между э. д. с. (полной или без учета потока рассеяния) и поперечной осью или напряжением и поперечной осью. Наиболее фундаментально круговая диаграмма этого вида с учетом потерь в меди, стали и потоков рассеяния разработана [4]. Авторами получены сравнительно простые выражения для ординат центра круга и радиус-вектора. Но так как они приняли за аргумент угол Θ' (при индуктивных сопротивлениях, включающих и реактивные сопротивления от потоков рассеяния), то расчетами допускается некоторая неточность, потому что в этом случае линия нулевых моментов не проходит через точки $\Theta' = 0$ и $\Theta' = \pi/2$. В самом деле, в случае идеального холостого хода, когда ротор расположен строго по магнитному потоку и тем более в режиме «короткого замыкания», когда ротор расположен перпендикулярно магнитному потоку, а ток достигает максимальной величины, всегда есть поток

рассеяния, а следовательно, и э. д. с., и угол Θ' . В этой работе учет потерь в стали произведен вектором, параллельным э. д. с., а не вектору напряжения, что также налагает некоторую дополнительную погрешность.

Последующие работы [1, 2, 5 и др.] принципиально ничего нового не внесли. Некоторые неточные положения [5] из-за принятия аргументом угла Θ (между поперечной осью и вектором напряжения) показаны в дискуссии автором [1]. Кроме того, по нашему мнению, введение пропорциональной зависимости потерь в стали от величины тока, как это произведено в [5] соответствующим изменением активного сопротивления обмотки статора, для СРД, где магнитный поток меняется незначительно, не может дать правильных результатов. В работе [1] нет подобных недостатков, но сложность расчетов не дает возможности применить ее в качестве инженерной методики.

Наиболее фундаментально теория СРД разработана в [6], где указано следующее: «...существенным недостатком... анализа является то обстоятельство, что все показатели... найдены в функции... временно-го угла между вектором \dot{U} и $jI_d x_{ad}$. Однако для суждения о поведении машины... существенное значение имеют не угол ν_e , а пространственный угол ϕ между осями статорного поля и роторных полюсов, т. е. угол рассогласования».

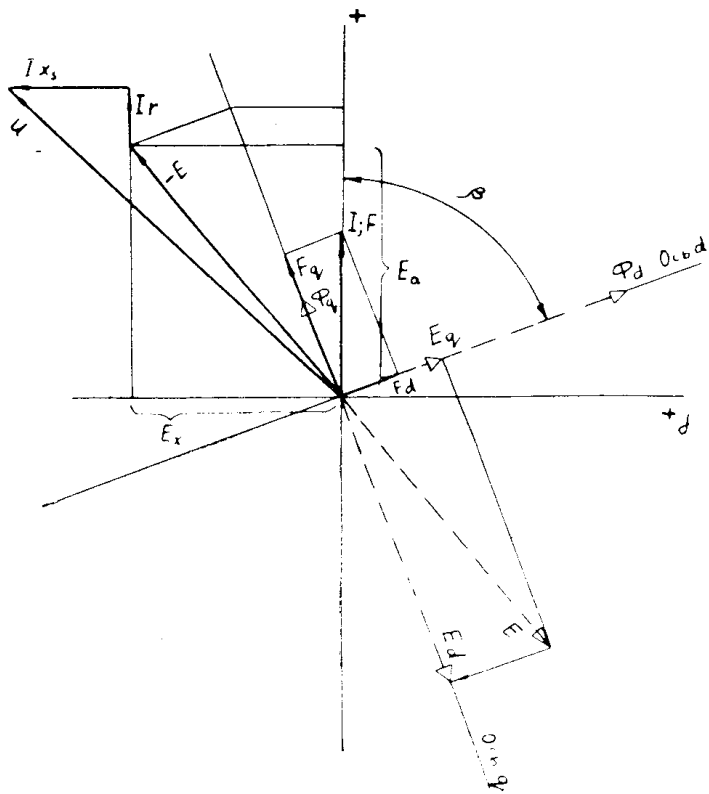


Рис. 1. Векторная диаграмма СРД.

В настоящей работе предлагается метод построения круговой диаграммы СРД, где за аргумент принят угол рассогласования между вектором тока и продольной осью ротора. Это дало возможность получить более простую схему замещения СРД и, кроме того, упростить расчеты, представить более наглядно рабочие характеристики и некоторые физические процессы, происходящие в СРД при изменении нагрузки.

Векторная диаграмма СРД представлена на рис. 1. Сопротивления и ток статора с учетом активного сопротивления фазы и сопротивления

рассеяния можно записать

$$\bar{z} = (R' + r) + j(x' + x_s). \quad (1)$$

$$i = \frac{\dot{U}}{(R' + r) + j(x' + x_s)}. \quad (2)$$

Здесь r ; x_s — активное сопротивление и сопротивление рассеяния фазы.
 R' ; x' — активное и реактивное сопротивления фазы статора, зависящие от нагрузки.

При совмещении оси вещественных с вектором тока э. д. с. от основного потока определится как

$$\dot{E} = E_a + jE_x = I(R' + jX'). \quad (3)$$

Составляющие E_a и E_x легко определяются из векторной диаграммы, как э. д. с. от продольного и поперечного потоков через угол β .

$$E_a = E_d \cos\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) + (-E_q) \cos\beta. \quad (4)$$

$$E_x = E_d \cos\beta + E_q \sin\beta. \quad (5)$$

E_d и E_q определяются как и в синхронных явнополюсных машинах

$$E_d = x_a K_d I \cos\beta = x_{ad} I \cos\beta = x_{ad} I_d, \quad (6)$$

$$E_q = x_a K_q I \sin\beta = x_{aq} I \sin\beta = x_{aq} I_q, \quad (7)$$

здесь x_a — индуктивное сопротивление фазы обмотки статора в предположении, что зазор равномерен и равен минимальному;

K_d ; K_q — коэффициенты формы поля по продольной и поперечной осям. С учетом уравнений (6, 7) из уравнений (4, 5) получаем

$$E_a = \frac{1}{2} I (x_{ad} - x_{aq}) \sin 2\beta, \quad (8)$$

$$E_x = I (x_{ad} \cos^2 \beta + x_{aq} \sin^2 \beta). \quad (9)$$

Соответственно

$$R' = \frac{E_a}{I} = \frac{x_{ad} - x_{aq}}{2} \sin 2\beta, \quad (10)$$

$$X' = \frac{E_x}{I} = x_{ad} \cos^2 \beta + x_{aq} \sin^2 \beta. \quad (11)$$

По уравнению (2) ток СРД с учетом уравнений (10, 11) определится

$$i = \frac{\dot{U}}{r + \frac{x_{ad} - x_{aq}}{2} \sin 2\beta + j(x_{ad} \cos^2 \beta + x_{aq} \sin^2 \beta + x_s)}. \quad (12)$$

Таким образом, полный комплекс сопротивления уравнения (12) содержит лишь два последовательно включенных сопротивления — активное и индуктивное:

$$R = r + \frac{x_{ad} - x_{aq}}{2} \sin 2\beta, \quad (13)$$

$$X = x_{ad} \cos^2 \beta + x_{aq} \sin^2 \beta + x_s. \quad (14)$$

При совмещении оси вещественных с вектором напряжения уравнение (12) упрощается. Несложными математическими преобразова-

ниями знаменатель уравнения (12) приводится к виду:

$$\bar{Z} = Z_1 e^{j\tau_1} + \frac{x_{ad} + x_{aq}}{2} e^{j\pi/2} + \frac{x_{ad} - x_{aq}}{2} e^{j(\pi/2 - 2\beta)} = \bar{A} + \bar{B} e^{j2\beta}. \quad (15)$$

Здесь $\bar{Z}_1 = r + jx_s = Z_1 e^{j\tau_1}, \quad (16)$

$$\bar{A} = Z_1 e^{j\tau_1} + \frac{x_{ad} + x_{aq}}{2} e^{j\pi/2}, \quad (17)$$

$$\bar{B} = \frac{x_{ad} - x_{aq}}{2} e^{j\pi/2}. \quad (18)$$

Из уравнения (15) видно, что полный комплекс сопротивления представляет сумму двух векторов, один из них $\bar{A} = \text{const}$, а второй — \bar{B} постоянный по модулю, но в зависимости от β конец вектора описывает на комплексной плоскости окружность с центром на конце вектора \bar{A} , причем при изменении β от 0 до 360° радиус-вектор \bar{B} проходит окружность дважды, т. е. от 0 до 720°. Из теории переменных токов известно, что если построить обращенную кривую сопротивления в той же комплексной плоскости, то новая кривая будет не что иное, как проводимость. Форма ее будет подобна, т. е. конец вектора проводимости \bar{Y} будет также описывать окружность, но в зеркальном изображении относительно оси вещественных с центром обращения в начале координат. На рис. 2 показано графически проведенное обращение, при

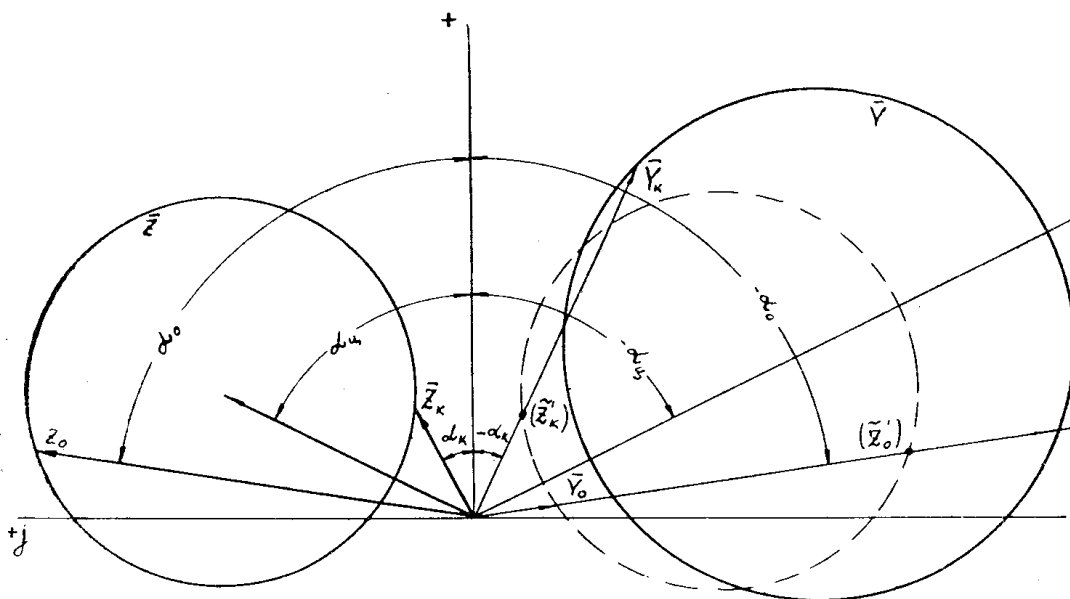


Рис. 2. Обращение в комплексной плоскости.

котором исходили из известного условия:

$$\bar{Z}\bar{Z}' = s \quad \text{или, что то же} \quad \bar{Z}\bar{Y} = s, \quad (19)$$

где s — степень обращения.

Пусть $\bar{Z} = Z e^{j\alpha}$; $\bar{Y} = Y e^{j\alpha'}$, тогда

$$\bar{Y} = \frac{s}{\bar{Z}} = \frac{s}{Z} e^{-j\alpha}, \quad (20)$$

т. е. расстояние искомой точки от центра обращения определяется отношением степени обращения к модулю вектора, но эта точка будет

лежать на луче, являющемся зеркальным изображением в оси вещественных основного луча. Если ось вещественных совместить с вектором напряжения, то обращенная кривая будет представлять в определенном масштабе одновременно круговую диаграмму тока, ибо

$$i = U\bar{Y}. \quad (21)$$

Так как нас интересует только круговая диаграмма тока, то промежуточные диаграммы \bar{Z} и \bar{Y} строить не нужно, но в этом случае при построении круговой диаграммы тока для определения центра круга и его радиуса мы можем предположить, что все три диаграммы ($i; \bar{Z}; \bar{Y}$) совмещены в одной при выполнении их в разных масштабах. Определив последние, можно найти степень обращения s , а затем обращенные вектор \tilde{A}' и радиус-вектор \tilde{B}' . Такой путь построения сложен. Наиболее простой способ построения заключается в определении луча, проходящего через центр окружности, и двух точек, лежащих на окружности. Эти точки легко найти, например, по току холостого хода и «короткого замыкания»:

а) направление луча-вектора, проходящего через центр окружности, определяется из уравнения (17)

$$\operatorname{tg} \alpha_{\text{ц}} = - \frac{2x_3 + x_{ad} + x_{aq}}{2r} = - \frac{x_d + x_q}{2r}; \quad (22)$$

б) модуль вектора „идеального“ холостого хода определяется из уравнения (12) для случая $\beta = 0$, а направление — из отношения реактивного и активного сопротивлений для этого режима

$$I_0 = \frac{U}{\sqrt{x_d^2 + r^2}}; \quad \operatorname{tg} \alpha_0 = - \frac{x_d}{r}; \quad (23)$$

в) модуль вектора тока „короткого замыкания“ и направление определяются подобно, но для случая $\beta = 90^\circ$

$$I_{\text{кз}} = \frac{U}{\sqrt{x_q^2 + r^2}}; \quad \operatorname{tg} \alpha_{\text{кз}} = - \frac{x_q}{r}. \quad (24)$$

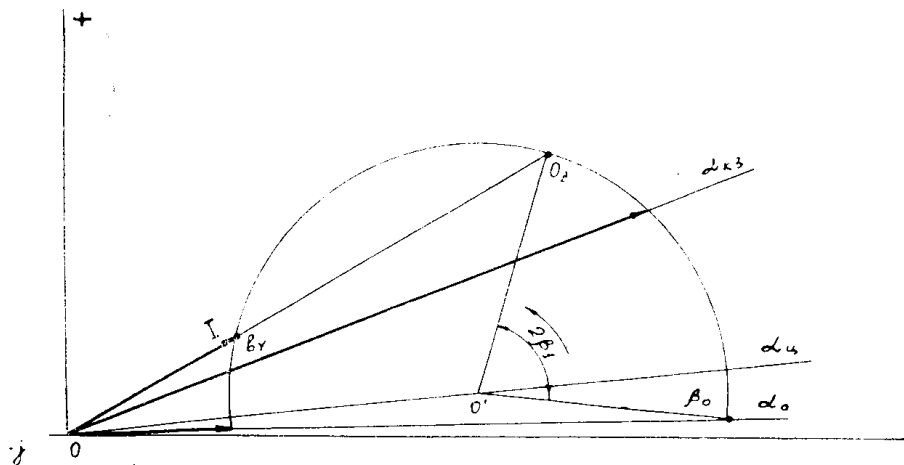


Рис. 3. Круговая диаграмма тока СРД.

На рис. 3 представлена круговая диаграмма тока, построенная вышеуказанным способом. Следует обратить внимание на некоторые особенности при работе с обращенной круговой диаграммой. Так как

основная зависимость по аргументу β получена для комплекса \bar{Z} , то на обращенной круговой диаграмме тока, которая по существу является диаграммой проводимости \bar{Y} , как это видно по уравнению (21), надо отсчет угла 2β производить по концу вектора \tilde{Z}' (см. рис. 2), а величину тока — на этом же луче, но по окружности проводимости. Например, величина тока двигателя при моменте, соответствующем углу рассогласования β_1 , находится как вектор с началом в центре обращения (начало координат), а конец в точке пересечения прямой с окружностью проводимости в точке v_y . Причем точка a_z находится по углу $2\beta_1$, отсчитываемому против часовой стрелки от линии, соединяющей центр окружности O' с точкой $\beta = 0$, взятой на окружности \tilde{Z}' . Таким образом, отсчеты величины угла и величины тока производятся до точек пересечения луча с окружностью, причем всегда на различных сторонах.

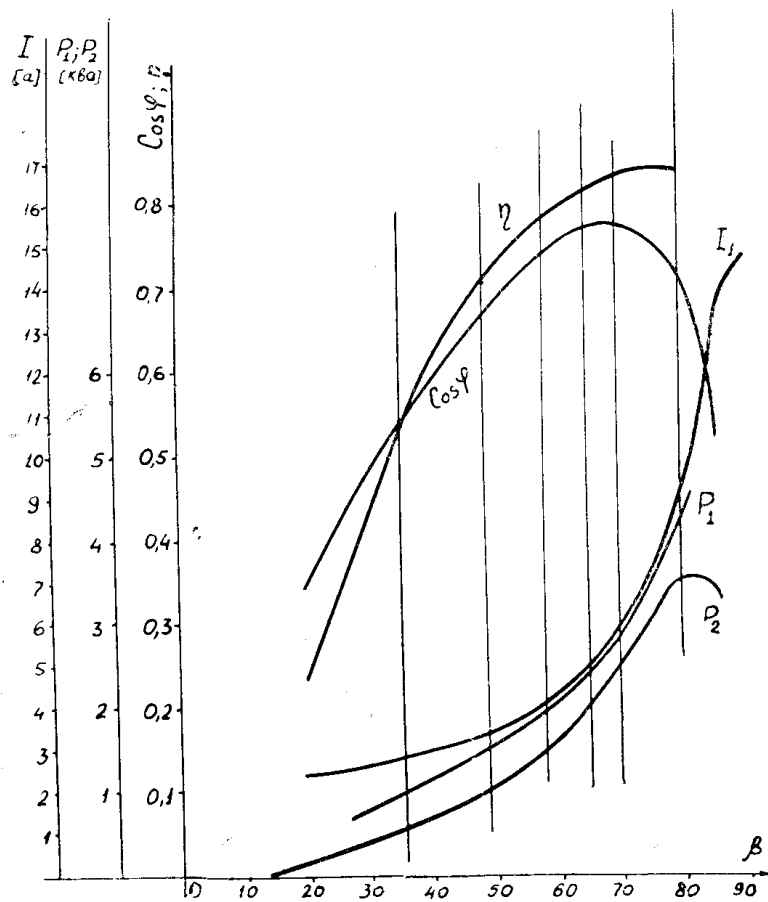


Рис. 4. Рабочие характеристики СРД, полученные из обращенной круговой диаграммы.

На рис. 4 представлены рабочие характеристики СРД с опрокидывающей мощностью 3,5 квт, полученные из круговой диаграммы. Большое значение на точность расчетов оказывает учет насыщения и потерь в стали, а также высших гармонических. В СРД в зависимости от угла рассогласования β меняется величина составляющих магнитного потока по продольной и поперечной осям и форма распределения индукции в зазоре. Поэтому нельзя полагать, что параметры машины остаются

неизменными. В то же время круговая диаграмма строится для неизменных параметров. Следовательно, необходимо строить семейство круговых диаграмм или выбирать какие-то усредненные параметры для различных режимов, дающие наиболее близкое совпадение, т. е. соответствующие реальной работе.

Учет насыщения стали. Как показало сравнение результатов экспериментального исследования СРД с расчетными характеристиками, пренебрежение влиянием насыщения ведет к недопустимой погрешности расчета. Вследствие того, что магнитный поток в зависимости от нагрузки изменяет свое положение по отношению к осям полюсов и учитывая, что магнитное сопротивление по продольной и поперечной осям разное, коэффициенты насыщения стали по продольной и поперечной осям не могут быть одинаковы и, кроме того, изменяются в зависимости от нагрузки. Поэтому для более точных расчетов необходимо выполнять круговую диаграмму для холостого хода и затем для «короткого замыкания». Можно рекомендовать также приближенный метод расчета, который дал удовлетворительные результаты. Он заключается в том, что точку холостого хода и точку короткого замыкания мы определяем для разных режимов (т. е. для разных β), а именно:

а) При определении тока холостого хода I_0 по уравнению (23), предполагая, что при малых углах β весь магнитный поток проходит по продольной оси, при расчете x_{ad} коэффициент магнитного насыщения определяем как

$$\kappa_{p,d} = \frac{(\Sigma AW_0 - AW'_{\delta d}) + AW'_{\delta d}}{AW'_{\delta d}}. \quad (25)$$

Здесь $AW'_{\delta d}$; ΣAW_0 — определяются по характеристике холостого хода для э.д.с. холостого хода (т. е. $E \approx (0,8 \div 0,95) U$),

$AW'_{\delta d} = \frac{AW_{\delta d}}{K_d}$ — м.д.с. воздушного зазора, приведенная к первой гармонической потока (с учетом увеличения магнитного сопротивления за счет неравномерного зазора).

Индуктивное сопротивление по продольной оси

$$x_{ad} = \frac{x_a K_d}{\kappa_{p,d}}, \quad x_d = x_{ad} + x_s; \quad (26)$$

б) При определении тока «короткого замыкания» по уравнению (24), предполагая, что при больших углах β основная часть магнитного потока проходит по поперечной оси, при расчете коэффициент магнитного насыщения определяем как

$$\kappa_{p,q} = \frac{(\Sigma AW_0 - AW'_{\delta q}) + AW'_{\delta q}}{AW'_{\delta q}}. \quad (27)$$

Здесь $AW'_{\delta q}$; ΣAW_0 — определяются по характеристике холостого хода для э.д.с., соответствующей максимальной нагрузке (т. е. $E \approx U - (I_{кз} \sqrt{x_s^2 + r^2})$);

$AW'_{\delta q} = \frac{AW_{\delta q}}{K_q}$ — м.д.с. воздушного зазора, приведенная к первой гармонической потока.

Индуктивное сопротивление по поперечной оси

$$x_{aq} = \frac{x_a K_q}{\kappa_{p,q}}; \quad x_q = x_{aq} + x_s. \quad (28)$$

Учет потерь в стали. Потери в стали в СРД при работе от сети с $U = \text{const}$ можно считать постоянными, так как $\Phi \approx \text{const}$. Поэтому, определив их для номинального режима, уточнение круговой диаграммы производим смещением линии подводимой мощности $P_1 = 0$, как это выполняется при построении круговых диаграмм асинхронных двигателей.

Круговой диаграммой при построении рабочих характеристик пользуются методом, подобно описанным для асинхронных машин, т. е. $\cos \varphi$; P_1 ; P_2 ; η и т. д. находятся так же. Например, линия нулевых моментов находится соединением концов вектора тока холостого хода и короткого замыкания, а линия нулевой мощности $P_2 = 0$ — проведением параллельной линии на расстоянии, равном в масштабе мощности механическим потерям. Для определения угла можно построить шкалу, подобную шкале скольжения асинхронных машин, но так как эта шкала будет по существу $\text{tg} \beta$, а номинальный режим и максимальные моменты обычно в зоне $\beta > 60^\circ$, когда $1,5 < \text{tg} \beta < \infty$, построение шкалы нецелесообразно. Более точно определять β — по центральному углу круга.

Выводы

Круговая диаграмма синхронно-реактивного двигателя, где аргументом принят угол рассогласования продольной оси ротора и вектора тока, имеет ряд преимуществ:

1. Упрощена схема замещения, в которой отсутствует намагничивающий контур. Эквивалентные сопротивления приобрели физический смысл (R' — пропорционален электромагнитному моменту).

2. Сократилось количество математических операций. В расчете необходимы непосредственно определяемые параметры двигателя r , x_s ; x_{ad} ; x_{aq} .

3. Полученные характеристики более реально и наглядно освещают физическую картину работы СРД.

4. Учет потерь в стали и меди, насыщения стали, потоков рассеяния не вызывает особого усложнения расчета круговой диаграммы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. А. Завалишин, С. И. Бардинский, О. Б. Певзнер, Б. Ф. Фролов, В. В. Хрущев. Электрические машины малой мощности. Госэнергоиздат, 1963.
2. Кавамура. Синхронно-реактивные электродвигатели. Тосиба рэбю, 1959, т. 14, № 9, стр. 942—945.
3. Р. Рихтер. Электрические машины. ОНТИ НКТП СССР, 1935, т. 2.
4. П. Г. Сорокер, П. П. Клобуков. Однофазные синхронные реактивные двигатели. Вестник электропромышленности, № 3, 1938.
5. И. М. Постников. Годограф тока и универсальная схема замещения синхронных, явнополюсной и параметрической машины. Электричество, № 8, 1960.
6. Ю. С. Чечет. Электрические микромашины автоматических устройств. Госэнергоиздат, 1957.