

## **КОСВЕННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**

Э. К. СТРЕЛЬБИЦКИЙ

(Представлено научным семинаром электромеханического факультета)

Известно, что вследствие технологических и эксплуатационных причин воздушный зазор асинхронных электродвигателей не является равномерным. Различают два вида неравномерности воздушного зазора. Во-первых, неравномерность, вызванная смещением оси вала относительно оси расточки статора — статическая неравномерность; во-вторых, неравномерность, вызванная неконцентричной посадкой пакета ротора на вал, — вращающаяся неравномерность. Разумеется, в действительности имеют место оба эти вида неравномерности, но обычно принимается во внимание тот вид неравномерности, который доминирует. Кроме указанных двух видов неравномерности воздушного зазора, имеется еще неравномерность, вызванная эллиптической формой расточки статора или эллиптической формой пакета ротора. Однако неравномерность воздушного зазора, вызываемая этими причинами, оказывает такое же влияние на магнитное поле машины в воздушном зазоре, что и неравномерность, вызванная неконцентричностью [1]. Неравномерность, вызванная эллиптической формой расточки статора, обуславливает статическую неравномерность и аналогична неравномерности, вызванной смещением оси ротора относительно оси расточки статора. Неравномерность, вызванная эллиптической формой пакета ротора, обуславливает вращающуюся неравномерность воздушного зазора и аналогична неравномерности, вызванной эксцентричной посадкой ротора на вал.

Следует отметить, что статическая неравномерность встречается чаще и имеет большую величину. Это объясняется технологическими особенностями производства асинхронных машин. Действительно, пакет ротора протачивается относительно вала, который закрепляется в центрах станка. Таким образом, неконцентричность пакета ротора относительно вала определяется только одной операцией, которая к тому же вносит относительно малое биение. Смещение оси вала относительно оси расточки статора определяется погрешностями, возникающими в целом ряде операций, а именно: расточка посадочных мест под подшипники в двух щитах, расточка замков подшипниковых

щитов, расточка замков корпуса статора, расточка корпуса под посадку пакета статора. Причем перечисленные операции дают большую абсолютную погрешность, чем расточка пакета ротора. По изложенным соображениям технологическому контролю в основном подлежит статическая неравномерность и в дальнейшем мы будем иметь в виду лишь этот вид неравномерности.

Неравномерность воздушного зазора вызывает появление магнитного неуравновешенного усилия, которое всегда направлено в сторону наименьшего воздушного зазора и имеет постоянную и переменную составляющие. Частота основной гармоники переменной составляющей усилия равна удвоенной частоте питающей оси. Величина усилия для асинхронных двигателей 3...6 габарита единой серии лежит в пределах от десятков до сотен килограммов в зависимости от величины эксцентриситета, индукции, главных размеров и числа полюсов машины [1]. Неравномерность воздушного зазора отрицательно сказывается на показателях работы электрических машин. Несколько ухудшаются энергетические показатели, возникает перераспределение тока по параллельным ветвям обмотки статора и перераспределение температур вследствие этого [6]. При большой температуре ротора может возникнуть большой местный перегрев подклиновой зоны обмотки статора в месте минимального воздушного зазора. Повышается износ и сокращается срок службы подшипников. Переменная составляющая магнитного неуравновешенного усилия вызывает вибрацию корпуса с частотой, равной удвоенной частоте питающей сети [2, 3, 4]. Расчету магнитных полей и магнитных неуравновешенных усилий при неравномерном воздушном зазоре посвящено большое количество работ. Однако следует отметить, что величины усилий, получаемые по формулам различных авторов иногда довольно сильно отличаются друг от друга.

В связи с изложенным понятна необходимость контроля воздушного зазора при изготовлении и ремонте асинхронных электродвигателей.

Измерение воздушного зазора обычно производится с помощью щупов, если это позволяет конструкция машины. Конструкция целого ряда машин сильно усложняет такой контроль (машины закрытого исполнения, в которых приходится в целях измерения предусматривать в подшипниковых щитах специальные отверстия, которые после измерения необходимо заделывать), или полностью исключают применение такого метода (машины взрывобезопасного исполнения). Поэтому возникает необходимость косвенного измерения неравномерности воздушного зазора. Разработка такого метода позволит обеспечить контроль неравномерности воздушного зазора в закрытых машинах и повысить качество и надежность машин.

Нами был исследован ряд вариантов косвенного измерения неравномерности воздушного зазора. Ниже приводится их краткое описание и оценка.

### **Измерение по прогибу вала**

Одним из проявлений неравномерности воздушного зазора является прогиб вала под действием неуравновешенного магнитного усилия (рис. 1).

Измеряя при помощи индикатора смещение свободного конца вала, можно судить о величине эксцентриситета. Величину смещения  $\Delta l$  можно рассчитать, зная усилие и конструктивные данные вала с пакетом ротора. В асинхронных электродвигателях 3...6 габаритов величина смещения составляет несколько десятков микрон. Измерение

производится следующим образом. Индикатор приставляется к свободному концу вала. Риска шкалы устанавливается на нуль. Затем в обмотку статора подается постоянный ток, равный примерно току холостого хода. Конiec вала перемещается и фиксируется показание индикатора.

Недостатки этого метода:

1. Необходимость измерения как минимум в двух взаимно-перпендикулярных направлениях, поскольку мы не знаем ориентацию плоскости эксцентриситета, а смещение лежит в этой плоскости.

2. Большая погрешность метода, создаваемая радиальным люфтом шарикоподшипников, который имеет такой же порядок, что и величина смещения, и составляет 20...50 микрон для двигателей 3...6 габаритов [5, стр. 153].

3. Малая величина смещения и, следовательно, необходимость применения индикатора с ценой деления 0,002 мм. Указанные недостатки сильно затрудняют применение этого метода.

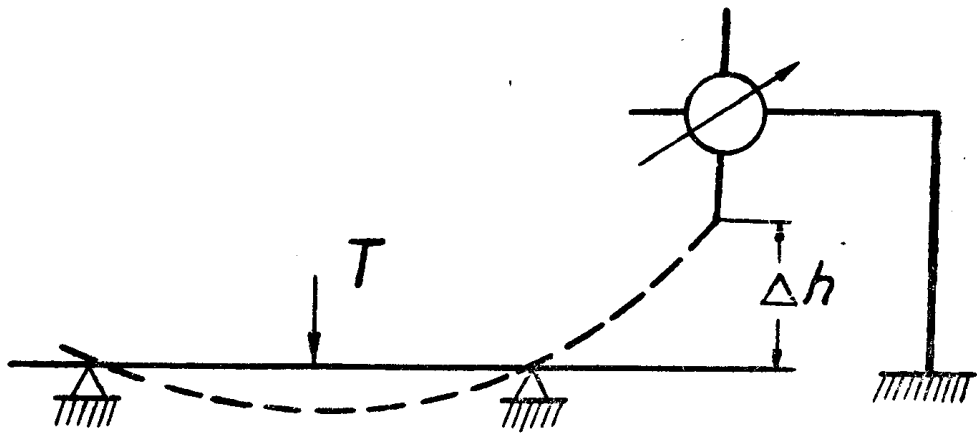


Рис. 1.

#### Измерение по моменту трения, создаваемому в подшипниках магнитным неуравновешенным усилием

Непосредственно магнитное неуравновешенное усилие измерить не удастся, так как ротор и статор по отношению к этому усилию образуют замкнутую систему. Однако можно измерить момент трения в шарикоподшипниках, возникающий от этого усилия. Зависимость этого момента от усилия выражается формулой [5, стр. 318].

$$M = 1,3 KR \frac{D_0}{d_{ш}} \text{ Гсм}, \quad (1)$$

где  $K$  — коэффициент трения качения;  $R$  — радиальная нагрузка на подшипник, в Г;  $D_0$  — диаметр окружности расположения шариков, в см;  $d_{ш}$  — диаметр шариков, в см.

Недостатки этого метода:

1. При вращении ротора в магнитном поле постоянного тока электромагнитный момент короткозамкнутого ротора является сильной помехой измерений.

2. Довольно большой разброс моментов трения в собранных машинах.

3. Наличие дополнительных моментов, обусловленных магнитным притяжением между зубцами ротора и статора, что иллюстрируется на рис. 2. Такая неравномерность момента не позволяет получить достаточную точность измерений, поэтому этот метод является неприемлемым.

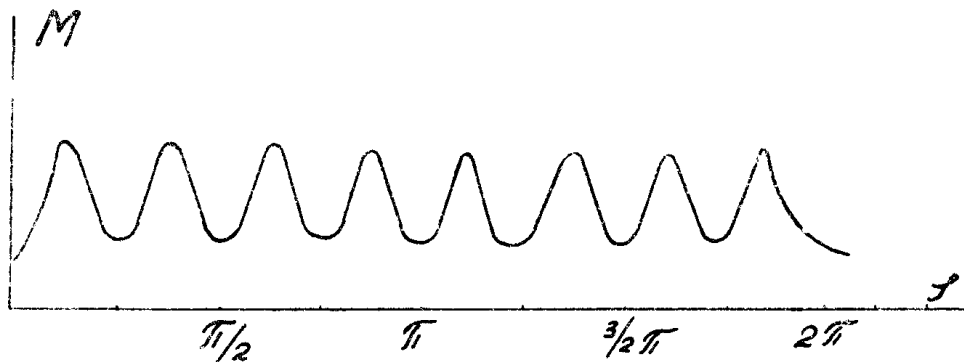


Рис. 2. Зависимость момента трения от угла поворота вала при питании обмотки статора постоянным током.

### Измерение, основанное на искажении магнитного поля в воздушном зазоре

При равномерном воздушном зазоре между обмотками статора, расположенными под углом 90 электрических градусов друг к другу, отсутствует магнитная связь. В случае неравномерного воздушного зазора кривая магнитной индукции в воздушном зазоре искажается и имеет для двухполюсной машины вид, показанный на рис. 3.

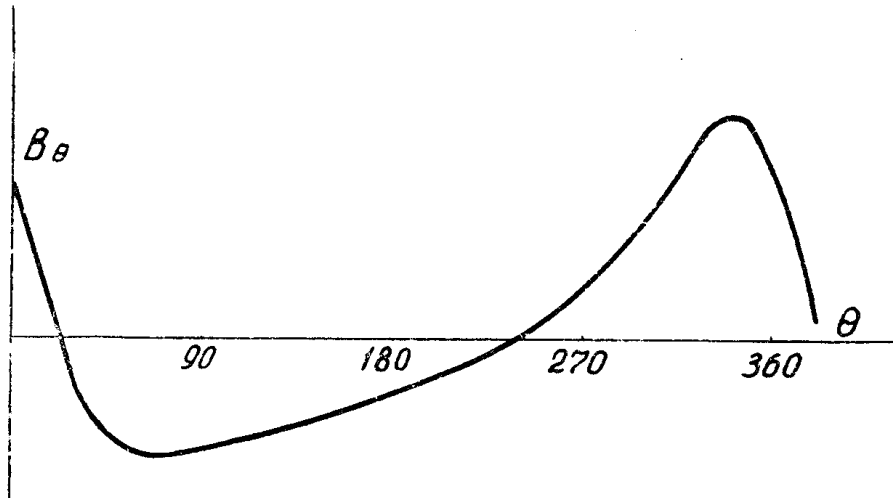


Рис. 3. Распределение индукции по окружности воздушного зазора двухполюсной машины для момента времени, когда ось магнитного потока составляет с плоскостью эксцентриситета угол  $=50^\circ$ ;  $e=0,8$ .

Таким образом, ось магнитного потока фазы отклоняется от геометрической оси обмотки и появляется составляющая потока в перпендикулярном направлении, которая сцепляется с обмоткой, расположенной под углом 90 электрических градусов.

Измерение производилось следующим образом. На соединенные в неполную звезду две фазы трехфазной обмотки статора (обмотку возбуждения) подавалось переменное напряжение. На третью фазу,

которую мы будем называть измерительной обмоткой, подключался вольтметр (рис. 4). Можно считать, что распределение индукции по окружности воздушного зазора от первой гармонической намагничивающей силы выражается формулой (2) [2].

$$B_{\theta} = \frac{B_m}{\psi_{\alpha}} \left[ \frac{\cos p(\theta + \alpha) - \beta_{\alpha}}{1 - e \cos \theta} \right] \sin \omega_1 t. \quad (2)$$

где  $B_{\theta}$  — текущая индукция в воздушном зазоре при угловой координате  $\theta$ ;

$B_m$  — максимальное значение магнитной индукции;

$\varepsilon$  — эксцентриситет;

$e$  — относительный эксцентриситет;

$p$  — число пар полюсов;

$\alpha$  — угол эксцентриситета, равный углу между плоскостью эксцентриситета и центральной линией магнитного поля.

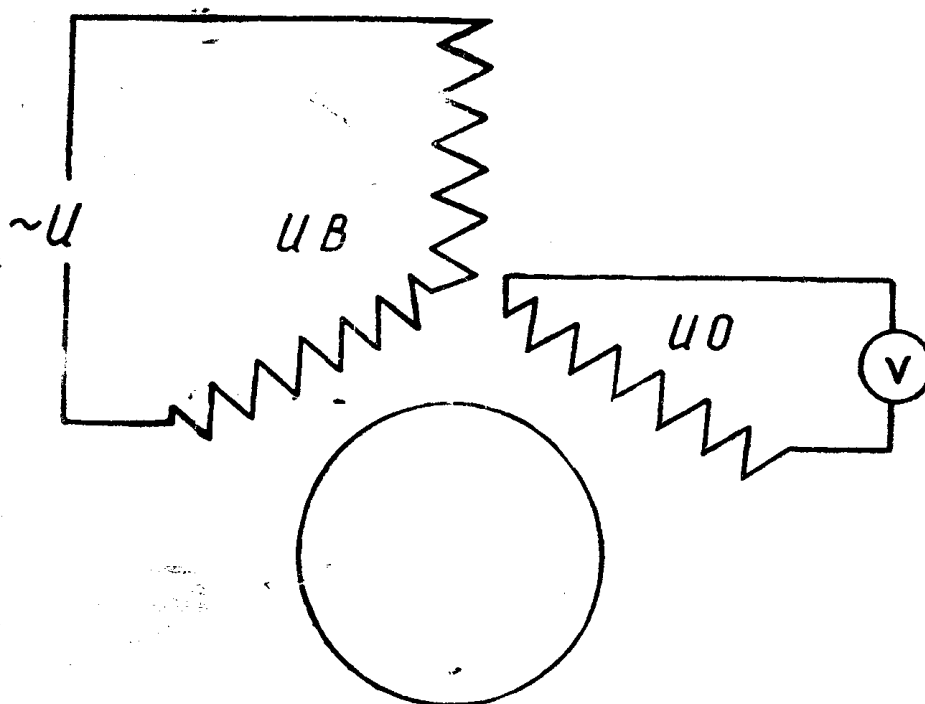


Рис. 4.

Схематически неравномерный воздушный зазор электродвигателя представлен на рис. 5. Очевидно, что в измерительной обмотке будет наводиться э. д. с.

$$E_{\text{изм}} = 4,44 \omega_{\text{изм}} \cdot k_{\text{о изм}} f_1 \Phi_{\text{изм}} \cdot 10^{-8} \text{ в},$$

$$\Phi_{\text{изм}} = \int_{\text{и.о.}} B_{\theta} d\theta. \quad (3)$$

Проведенные расчеты показали, что при изменении  $e$  и  $\alpha$  изменяется э. д. с., наводимая в измерительной обмотке. Эта э. д. с. составляет примерно 1...3% от напряжения на обмотке возбуждения. Опыты, проведенные на машине с гладким ротором, хорошо подтвердили правильность теоретических выводов.

Однако величина э. д. с., наводимой в случае зубчатого ротора, в сильной степени зависит от угла поворота. На рис. 6 представлено изменение э. д. с. в зависимости от угла поворота ротора асинхронно-

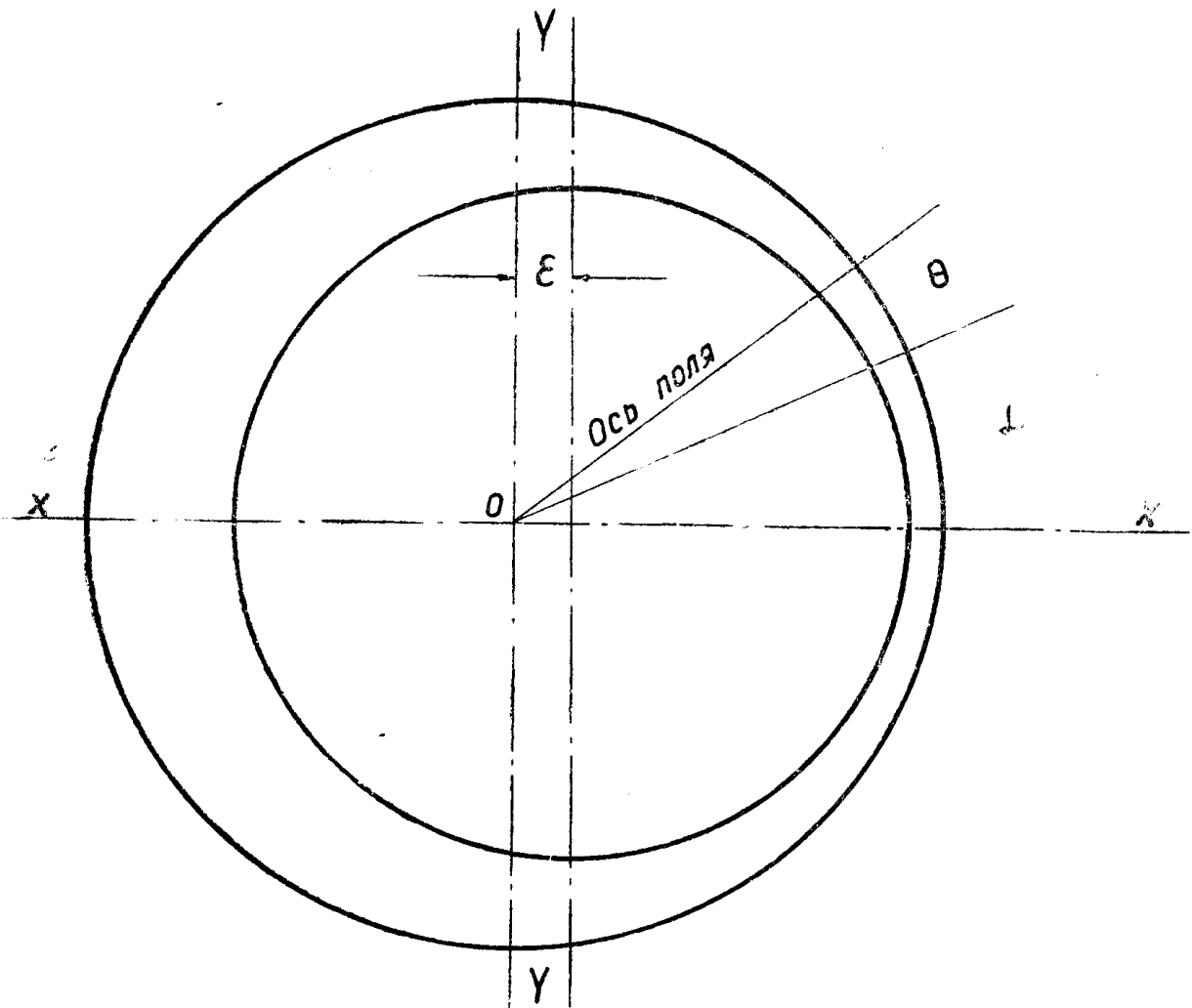


Рис. 5. Схема поперечного разреза асинхронного двигателя с неравномерным воздушным зазором.

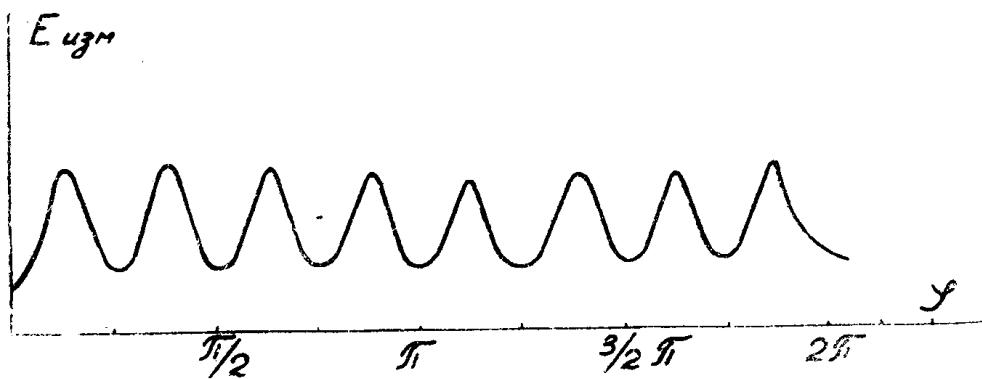


Рис. 6.

го двигателя А31/4. Наличие сильной зубцовой помехи исключает применение этого метода для машин с зубчатым ротором.

### Измерения, основанные на вибрации ротора под действием переменной составляющей магнитного неуравновешенного усилия

Как мы говорили выше, магнитные неуравновешенные усилия имеют постоянную и переменную составляющие. Известно, что для однофазной машины величина постоянной составляющей и амплитуда переменной составляющей существенно зависят от скольжения [3, 4]

$$\begin{aligned} T'_{\text{а пер}} &= T'_{\text{ср}} \frac{s(2-s)}{2} + T'_{\text{а пер}} \frac{2-2s+s^2}{2}, \\ T'_{\text{ср}} &= T'_{\text{ср}} \frac{2-2s+s^2}{2} + T'_{\text{а пер}} \frac{s(2-s)}{2}. \end{aligned} \quad (4)$$

$T'_{\text{ср}}$  — постоянная составляющая усилия однофазной машины;  
 $T'_{\text{а пер}}$  — амплитуда переменной составляющей однофазной машины;  
 $T_{\text{ср}}$  — постоянная составляющая усилия трехфазной машины;  
 $T_{\text{а пер}}$  — амплитуда переменной составляющей трехфазной машины.

Поскольку  $T_{\text{а пер}}$  невелика и составляет примерно 15% от  $T_{\text{ср}}$  для двухполюсной машины и примерно 5% — для четырехполюсной машины, то можно считать, что в случае неподвижной машины

$$T'_{\text{а пер}} \approx T'_{\text{ср}} \approx \frac{1}{2} T_{\text{ср}}. \quad (5)$$

Таким образом, можно констатировать, что при однофазном коротком замыкании амплитуда переменной составляющей равна постоянной составляющей усилия, то есть имеет значительную величину. На рис. 7 в качестве иллюстрации представлена зависимость усилия от тока трехфазного короткого замыкания, заимствованная из [1], для двигателя А52/4.

Переменная составляющая усилия вызывает поперечные изгибные колебания вала в плоскости эксцентриситета. Амплитуда колебаний свободного конца вала может быть рассчитана, если известна величина усилия и конструктивные данные вала с пакетом ротора. Измеряя амплитуду вибраций свободного конца вала, можно судить о величине эксцентриситета. Однако расчет величины магнитного неуравновешенного усилия, проведенный по формулам различных авторов дает довольно большой разброс. Кроме того, при коротком замыкании поток в сильной степени зависит от соотношения полных сопротивлений обмоток статора и ротора. Поэтому следует пойти по пути экспериментального снятия зависимости амплитуды вибраций от величины эксцентриситета.

Практически это осуществляется следующим образом. Для данной машины подшипниковые щиты должны быть переделаны таким образом, чтобы иметь возможность плавно изменять и контролировать величину эксцентриситета: выбираются окна для измерений, увеличиваются диаметры посадочных мест под подшипники на величину, равную величине воздушного зазора. Снятие указанной зависимости производится при однофазном коротком замыкании двигателя. Величину тока в обмотке статора можно выбирать в пределах от 100 до 200% от номинального. Величина тока при тарировании и контрольных измерениях должна быть безусловно одна и та же.

При отсутствии насыщения магнитной цепи, что имеет место при коротком замыкании, зависимость между величиной магнитного неуравновешенного усилия и эксцентриситетом можно считать линейной. Поэтому при тарировании имеет смысл снять только одну точку, а именно: при максимальном эксцентриситете (порядка  $e = 0,8$ ). Измерение в этой точке дает меньшую погрешность, так как амплитуда вибраций получается максимальной.

Этот метод избавлен от ряда недостатков предыдущих методов. Действительно, величина усилия практически не зависит от ориентации зубцов ротора и статора, так как усилие определяется полным магнитным потоком двигателя. Некоторое изменение усилия от угла

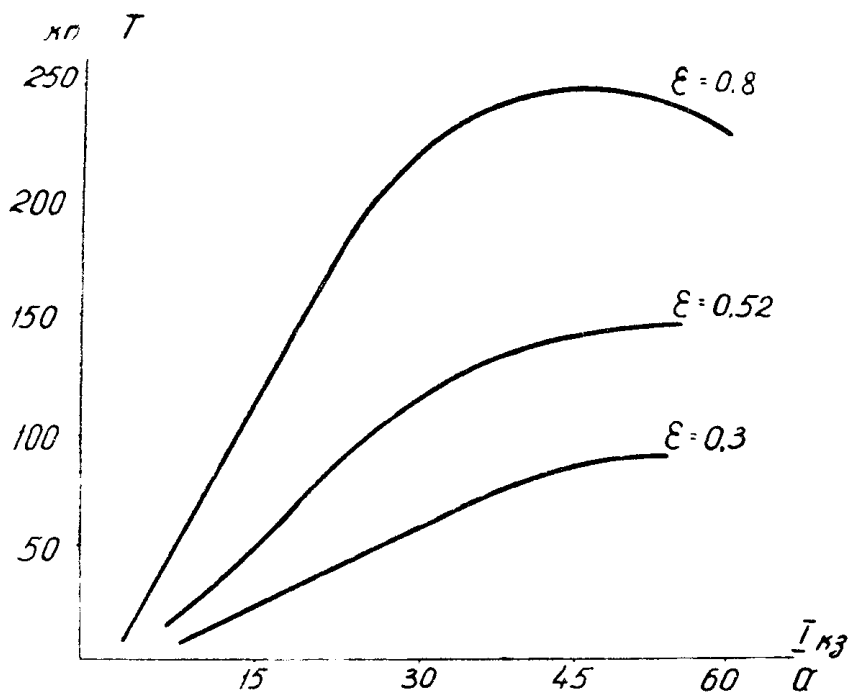


Рис. 7.

поворота ротора может произойти из-за различного демпфирования клеткой ротора магнитного потока статора, вызванного плохой заливкой ротора. Однако роторы с плохой заливкой должны отбраковываться на предыдущем контроле.

Погрешность, обусловленная радиальным люфтом подшипников качения в этом методе также исключается, так как существует постоянное прижатие внутреннего кольца к наружному постоянной составляющей магнитного неуравновешенного усилия.

Недостатки этого метода:

1. Необходимость измерения по крайней мере в двух взаимно-перпендикулярных направлениях.
2. Необходимость применения виброметра.

Тем не менее этот метод можно рекомендовать для внедрения в практику контрольных испытаний.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. П. Воскресенский. Исследование влияния неравномерности воздушного зазора на характеристики асинхронного двигателя. Диссертация. Москва, 1957.
2. А. Соно. Неуравновешенное магнитное усилие в асинхронных двигателях с эксцентричным ротором. Тр. А. И. Е. Е., vol. 73, pt. III B.



3. Э. К. Стрельбицкий. Неуравновешенные магнитные усилия в однофазных асинхронных двигателях с неравномерным воздушным зазором. Изв. ВУЗ, сб., "Электро-механика", № 10, 1961.

4. Э. К. Стрельбицкий. Исследование вибраций асинхронных однофазных электродвигателей малой мощности. Диссертация, Томск, 1961.

5. Н. А. Спицын, А. И. Спришевский. Подшипники качения. Машгиз, 1961.

6. Чо-Хон-Ель. Исследование работы асинхронных машин при неравномерном воздушном зазоре. Диссертация МЭИ, Москва, 1957.

---

Поступила в редакцию  
в июне 1962 г.