

Ո. Դ. ԻՆԿԻՅԱՆ, Մ. Ե. ԻՈՆԴԵՄ, Ա. Լ. ՄԱԻԼՅԱՆ

ПРОВОДИМОСТИ ПАЗОВОГО И ЛОБОВОГО РАССЕЯНИЯ ОБМОТКИ СТАТОРА АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ

Создание новых серий современных асинхронных двигателей выдвигает задачу совершенствования методов расчета их параметров. Существующие методики [1-4] дают результаты, значительно отличающиеся друг от друга. В связи с этим возникает необходимость оценить точность методики расчета, что может быть выполнено на основе достоверных опытных данных.

В настоящей статье производится оценка точности расчета пазовой и лобовой составляющих индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора в установившемся режиме асинхронной машины малой мощности (от 0,1 до 0,6 кВт). Указанные составляющие определяются соответствующими удельными магнитными проводимостями. Их опытное определение представляет собою отдельную задачу, решение которой излагается ниже.

Опытные значения удельных магнитных проводимостей рассеяния будем определять при условии, принятом в расчетных методиках, — при ненасыщенной магнитной системе машины. В двигателях рассматриваемого диапазона мощностей станина и подшипниковые щиты выполняются обычно из немагнитного материала (алюминиевого сплава), ввиду чего на лобовое рассеяние практически не влияет близость подшипниковых щитов. В связи с изложенным можно считать, что пазовое и лобовое рассеяние статора остается неизменным в собранной и разобранной машине, и соответствующие удельные магнитные проводимости определять из опытов на отдельном статоре. При удалении ротора ощутимо возрастает поток торцевой зоны по сравнению с потоком в расточке статора, и изменяется картина дифференциального рассеяния. Поток, существующий в расточке, представляет собою поток взаимоиנדукции всех трех фаз обмотки в пределах сердечника статора. Потоки торцевых зон будем рассматривать как состоящие из потоков взаимоиנדукции (рис. 1, потоки «а» и «б») и потоков рассеяния лобовых частей (потоки «в»). Потоки взаимоиנדукции разделяем на потоки, замыкающиеся через полость, занимаемую ротором (потоки «а»), и потоки, не достигающие этой полости (потоки «б»). Последние с потоками рассеяния «в» обуславливают индуктивное сопротивление рассеяния лобовых частей при наличии ротора. Сумму потока в расточке и потока взаимоиנדукции «а» будем называть полным потоком взаимоиנדукции.

Исследования проводились на асинхронных двигателях серии АОЛ 1-го и 2-го габаритов (см. табл. 1). На статоре были установлены следующие измерительные катушки (рис. 1):

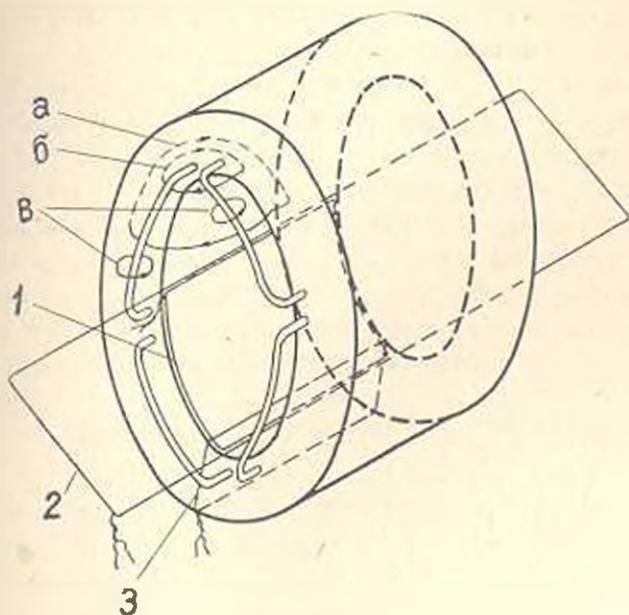


Рис. 1. Расположение измерительных катушек на статоре. Упрощенная картина магнитного поля в торцевой зоне статора: а — потоки взаимной индукции, замыкающиеся через полость, занимаемую ротором; б — потоки взаимной индукции, не достигающие полости, занимаемой ротором; в — потоки лобового рассеяния.

- катушка 1 с двумя активными сторонами, уложенными на поверхности расточки посередине зубцов на расстоянии полюсного деления одна от другой, имеющими длину сердечника статора;
- катушка 2 — такая же, как и катушка 1, но с активными сторонами, длина которых значительно превышает длину обмотанного статора;
- катушка 3, охватывающая сердечник статора и имеющая одну активную сторону, расположенную посередине зубца.

В собранной машине были установлены только катушки 1 и 3. Катушка 2 устанавливалась дополнительно при вынутом роторе. В измерительной катушке 1 э. д. с. индуцируется только потоком в расточке, а в катушке 2 — полным потоком взаимной индукции. Э. д. с. катушки 3 индуцируется тем же потоком, что и в катушке 2, но дополнительно также потоками взаимной индукции лобовых частей, не достигающими полости, занимаемой ротором (потоки «в»).

Э. д. с. измерительной катушки, приведенная к обмотке статора, будет

$$E = \frac{\omega k_0}{\omega_n} E_n,$$

где E_n и ω_n — э. д. с. и число витков измерительной катушки; ω и k_0 — число витков и обмоточный коэффициент фазы обмотки статора.

При синхронном вращении двигателя АОЛ21-4 (270 Вт, 1400 об/мин) значения приведенных э. д. с. измерительных катушек 1 и 3 практически совпадают (рис. 2, кривая 1). При вынутом роторе э. д. с. катушки 1 значительно меньше, чем катушек 2 и 3 (рис. 2, кривые II). Эти данные показывают, что в собранной машине поток взаимной индукции в торцовой зоне практически не ощущается, в то время, как при вынутом роторе он составляет значительную долю потока в расточке. Эта доля определяется по соотношению э. д. с. измерительных катушек и для указанного двигателя, имеющего отношение $l/\tau=1$ (l — длина сердечника, τ — полюсное деление статора), равна 0,31, а для двигателя АОЛ21-2 (400 Вт, 2800 об/мин, $l/\tau=0,5$) составляет 0,67.

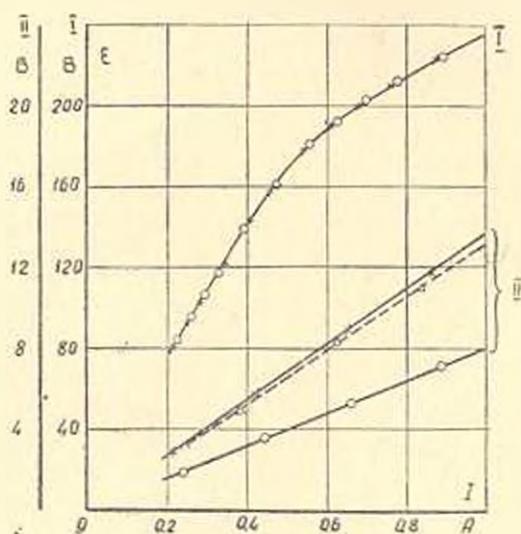


Рис. 2. Э. д. с. измерительных катушек двигателя АОЛ21-4 при синхронном вращении (кривая I) и при вынутом роторе (кривые II), приведенные к обмотке статора:
 —○—○— катушки 1; —△—△— катушки 2; —×—×— катушки 3.

В известном способе вынутого ротора [5] возрастание торцового потока не учитывается и вследствие этого оказывается отнесенным к потокам рассеяния. В способе рекомендуется учитывать либо расчетным (поправка Шенкеля), либо опытным (с помощью специальной измерительной катушки) путем только поток в расточке. Однако принципиально правильным является учет не только потока в расточке, но и возросшего торцового потока, что и выполняется в данной работе.

Сумму пазовой x_n и лобовой x_l , составляющих индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора предлагается определять следующим образом (измерения производятся также, как и в способе вынужденного ротора). К обмотке статора подводится симметричное трехфазное напряжение такой величины, чтобы ток в ней не превышал номинального значения. Измеряются напряжение, ток и потребляемая мощность. По этим данным определяется индуктивное сопротивление x обмотки статора, обусловленное всеми потоками взаимной индукции и рассеяния. На статоре предварительно устанавливается измерительная катушка 2, активные стороны которой располагаются на поверхности расточки посередине шлицов. При таком расположении катушки э.д.с. в ней индуцируется полным потоком взаимной индукции, а также потоком рассеяния по головкам зубцов при вынужденном роторе. По э.д.с. измерительной катушки определяется обусловленное этими потоками индуктивное сопротивление $x_n = E/I$, где I — ток фазы обмотки статора в опыте.

Сумма пазовой и лобовой составляющих индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора будет равна $x - x_n$.

Измерения показывают, что при токах $0,5I_n \leq I < I_n$ магнитная проницаемость стали статора значительно больше, чем воздуха. Поэтому в указанном интервале искомые величины можно рассматривать как постоянные, не зависящие от тока статора, что позволяет применить метод наложения при раздельном определении значений x_n и x_l . Для этого можно использовать данные опытов на статорах, имеющих одинаковую поперечную геометрию, один и тот же тип обмотки, одинаковую форму и размеры лобовых частей, и отличающихся только длиной сердечника. В принципе можно ограничиться двумя статорами. Однако, чтобы в некоторой мере компенсировать погрешности, возникающие из-за неизбежных отклонений в расположении измерительных катушек, нужно иметь данные измерений более, чем на двух объектах. Для большей надежности результатов желательно использовать машины с одинаковыми пазами, но с разным числом пазов на полюс и фазу.

Машины, удовлетворяющие этим условиям, имеются в серии АОЛ. В двух- и четырехполюсных двигателях каждого габарита здесь применен один и тот же лист статора. Рассмотрим, например, двигателя 2-го габарита:

АОЛ 21-4 — машина № 1

АОЛ 22-1 — машина № 2

АОЛ 21-2 — машина № 3

АОЛ 22-2 — машина № 4

Пазы статора полузакрытые, грушевидной формы. Машины №№ 1 и 2 четырехполюсные, имеют простую шаблонную обмотку и отличаются числом витков фазы обмотки и длиной сердечника статора, машины №№ 3 и 4 двухполюсные, имеют шаблонную обмотку «вразвалку» и от-

личаются также числом витков фазы обмотки и длиной сердечника статора. Длины сердечников статоров находятся в соотношениях (индекс указывает номер машины):

$$l_{(1)} = l_{(3)}; \quad l_{(2)} = l_{(4)}. \quad (1)$$

Указанные условия в равной мере выполняются и в двигателях серии АОЛ 1-го габарита. В них пазы статора полузакрытые трапециевидальные с плоским дном.

Обозначим для каждой машины:

$$\begin{aligned} x_{n(1)} + x_{s(1)} &= A; \\ x_{n(2)} + x_{s(2)} &= B; \\ x_{n(3)} + x_{s(3)} &= C; \\ x_{n(4)} + x_{s(4)} &= D. \end{aligned} \quad (2)$$

Согласно методикам [1, 2]

$$x_n = \frac{4\pi f \omega^2 l}{pq} \lambda_n = G \lambda_n, \quad (3)$$

$$x_s = \frac{4\pi f \omega^2 l}{pq} \lambda_s = G \lambda_s, \quad (4)$$

где $G = \frac{4\pi f \omega^2 l}{pq}$; f — частота тока в обмотке статора; q — число пазов на полюс и фазу статора; p — число пар полюсов; λ_n и λ_s — удельная магнитная проводимость соответственно пазового и лобового рассеяния.

Эти двигатели имеют неодинаковые значения G по указанным выше причинам. Разделив каждое из уравнений (2) на соответствующее ему значение G , получим:

$$\begin{aligned} \lambda_{n(1)} + \lambda_{s(1)} &= a; \\ \lambda_{n(2)} + \lambda_{s(2)} &= b; \\ \lambda_{n(3)} + \lambda_{s(3)} &= c; \\ \lambda_{n(4)} + \lambda_{s(4)} &= d; \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$a = A/G_{(1)}; \quad b = B/G_{(2)}; \quad c = C/G_{(3)}; \quad d = D/G_{(4)}.$$

Так как в указанных двигателях применен один и тот же лист статора, то размеры паза одинаковы для всех двигателей, поэтому

$$\lambda_{n(1)} = \lambda_{n(2)} = \lambda_{n(3)} = \lambda_{n(4)}. \quad (6)$$

Величина x_n физически пропорциональна длине сердечника статора, величина x_s от нее не зависит. Для удобства расчета в мето-

дихах [1; 2] величина x_n определяется по формуле такого же вида, что и x_n [см. формулы (3) и (4)]. При этом в (4) под величиной λ_n подразумевается величина реальной удельной магнитной проводимости любых частей λ_n^* (одинаковая для двигателей каждой пары) деленная на длину сердечника статора соответствующего двигателя. Таким образом,

$$\lambda_{n(1)} = \frac{\lambda_n^*}{l_{(1)}}; \quad \lambda_{n(2)} = \frac{\lambda_n^*}{l_{(2)}};$$

откуда получаем

$$\lambda_{n(1)} = \lambda_{n(2)} \frac{l_{(2)}}{l_{(1)}}. \quad (7)$$

Аналогично будем иметь

$$\lambda_{n(3)} = \lambda_{n(4)} \frac{l_{(4)}}{l_{(3)}}. \quad (8)$$

На основании условий (6), (7) и (8) уравнения (5) можно рассматривать как систему, решая ее с учетом (1), получаем:

$$\lambda_{n(1)} = \frac{(l_{(2)} - l_{(1)})(a + b + c + d) - (a - b - c - d)(l_{(2)} + l_{(1)})}{4(l_{(2)} - l_{(1)})}.$$

Величины $\lambda_{n(1)}$, $\lambda_{n(2)}$, $\lambda_{n(3)}$ и $\lambda_{n(4)}$ находим непосредственно из уравнений системы (5).

В табл. 1 представлены результаты опытного* и расчетного определения удельных магнитных проводимостей пазового и лобового рассеяния обмотки статора. Из-за трудностей, связанных с установкой активных сторон измерительной катушки 2 на поверхности расточки точно посередине шлицов, последние располагались в серединах головок зубцов. Измеренное при этом индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора обусловлено пазовым и лобовым рассеянием, а также рассеянием по головкам зубцов при вынутом роторе, которое при данном способе разделения объединяется с пазовым рассеянием. Поэтому здесь реальными являются значения λ_n , значения же λ_n получаются преувеличенными (опытные данные табл. 1 для двигателей 1-го габарита и данные в числителе для двигателей 2-го габарита).

Измерения проводились также с помощью измерительных катушек 3. На каждом статоре были установлены по три или четыре катушки, равноудаленные друг от друга. Активная сторона располагалась на поверхности расточки посередине шлица. В расчетах использовалось среднее арифметическое показаний всех катушек. Измеренное при этом индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора обусловлено пазовым рассеянием и рассеянием лобовых частей, уменьшенным на величину, соответствующую потокам взаимной индукции, не дости-

* В опытах принимал участие инж. Тер-Погосян С. А.

гающим ротора (поток «б» на рис. 1). Поэтому здесь реальными являются значения λ_n , а значения λ_d получаются заниженными (табл. 1, опытные данные в знаменателе для двигателей 2-го габарита). Кривая э.д.с. измерительных катушек определялась с помощью электронного осциллографа и была практически синусоидальной. Напряжение, ток и мощность измерялись приборами с классом точности 0,5, а э.д.с. измерительных катушек — электронным вольтметром типа Ф 563 (класс точности 0,5). Точность примененных приборов позволяет принять измеренные величины (λ_n по данным катушки 1 и λ_d по данным катушки 2) за основу для оценки расчетных методик. Если допустить приемлемой разницу в 10% между расчетными и опытными значениями, то удовлетворительные результаты для удельной проводимости пазового рассеяния λ_n дает методика [1].

Таблица 1

Удельные магнитные проводимости пазового и лобового рассеяния обмотки статора двигателей серии АОЛ 1-го и 2-го габаритов

Тип двигателя	О п ы т				Р а с ч е т							
	мощность, Вт	скорость вращения, об/мин	λ_n	λ_d	λ_n				λ_d			
					[1]	[2]	[3]	[4]	[1; 2]	[3]	[4]	
АОЛ 11-4	120	1400	1,75	2,10	1,54	1,93	1,51	1,75	2,27	1,65	2,10	
АОЛ 12-4	180	1400	1,75	1,53	1,54	1,93	1,51	1,75	1,68	1,23	1,56	
АОЛ 11-2	180	2800	1,75	3,10	1,54	1,93	1,51	1,75	2,74	6,50	6,16	
АОЛ 12-2	270	2800	1,75	2,30	1,54	1,93	1,51	1,75	2,03	4,82	3,98	
АОЛ 21-4	270	1400	1,74	1,67	1,33	1,75	1,39	1,59	1,98	1,59	1,92	
			1,25	1,48								
АОЛ 22-4	400	1400	1,74	1,21	1,33	1,75	1,39	1,59	1,46	1,17	1,41	
			1,25	1,10								
АОЛ 21-2	400	2500	1,74	2,45	1,33	1,75	1,39	1,56	2,34	6,23	5,59	
			1,25	1,77								
АОЛ 22-2	600	2800	1,74	1,83	1,33	1,75	1,39	1,59	1,72	4,61	4,12	
			1,25	1,29								

Для удельной проводимости лобового рассеяния λ_d удовлетворительные результаты получаются для четырехполюсных двигателей по методикам [1; 2; 4], а для двухполюсных — по методикам [1; 2].

В ы в о д ы

1. При удалении ротора поток взаимной индукции торцевой зоны статора значительно возрастает по сравнению с потоком в расточке. Поэтому при определении индуктивного сопротивления, обусловленного потоками рассеяния при вынужденном роторе, торцевой поток, замы-

кающийся через полость, занимаемую ротором, должен быть исключен.

2. Разработан способ отдельного определения проводимостей пазового и лобового рассеяния обмотки статора, позволяющий путем несложных опытов на серийных статорах, собранных из одних и тех же листов, получить искомые величины.

3. Оценка методик расчетного определения удельной проводимости пазового и лобового рассеяния показывает, что применительно к синхронным машинам малой мощности наиболее точной (погрешность не более 10%) является методика. [1].

ԵրԼԻ յմ. Կ. Մարքս

Поступило 7.1.1977.

Ն. Գ. ԱՊՐԻԱՆ, Մ. Կ. ՅՈՒԿԵՄ, Ա. Ը. ՄԱՅՐԱՅԱՆ

ԱՊԱՍԻՆԵՐԻՆ ՄԵՔԵՆԱՅԻ ՍՏԱՏՈՐԻ ՓԱԹՈՒՅԹԻ ՓՈՐԱՏԱՅԻՆ
ԵՎ ՃԱԿԱՏԱՅԻՆ ՑՐՄԱՆ ՀԱՂՈՐԳԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

Ա մ փ ո փ ո ս մ

Մշակված է հանված ոտտորի ժամանակ փորատային և ճակատային ցրման տեսակարար հաղորդականությունների փորձնական որոշման եղանակ: Արդյունքները ստացված են ստատորի նույն թիթեղներով հափարված, բայց տարբեր միջուկի երկարություն ունեցող, սերիական ապասխինրոն շարժիչների համար: Փորձնական տվյալների հիման վրա կատարված է նշված հաղորդականությունների հաշվառման համար դոյություն ունեցող մեթոդիկաների դիսհատում:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. ВНИИЭМ. Нормаль расчетная ОАВ630000.
2. Сергеев П. С., Виноградов Н. В., Горяинов Ф. А. Проектирование электрических машин. «Энергия», 1969.
3. Данилович Я. Б., Домбровский В. В., Казовский Е. Я. Параметры электрических машин переменного тока. «Наука», 1965.
4. Шубский В. П. Расчет электрических машин. «Энергия», 1968.
5. Жерас Г. К. Промышленные испытания электрических машин. «Энергия», 1966.