

О МЕТОДАХ РАСЧЕТА РАССЕЯНИЯ ЛОБОВЫХ ЧАСТЕЙ ОДНОФАЗНЫХ ОБМОТОК

Г. А. СИПАЙЛОВ, К. А. ХОРЬКОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

Рассеяние лобовых частей, наряду с пазовым рассеянием, является одной из основных составляющих полного рассеяния обмоток электрических машин. Поэтому в тех случаях, когда по условиям работы электрической машины необходимо, чтобы реактивное сопротивление рассеяния было по возможности минимальным, стремятся уменьшать как пазовое, так и лобовое рассеяние. Например, в генераторах разрывной и ударной мощности, в целях получения максимальной величины тока короткого замыкания в машине заданных габаритов, уменьшение реактивного сопротивления рассеяния достигается за счет уменьшения числа витков обмотки статора, уменьшения глубины паза статора и увеличения его ширины, экранирования лобовых частей, уменьшения воздушного зазора и т. д.

Реактивность рассеяния лобовых частей подобно реактивности пазового рассеяния определяется известной формулой

$$X_{л} = 4\pi f \mu_0 \frac{w_2^2}{pq_1} D_{л}, \quad (1)$$

где $\lambda_{л}$ — проводимость рассеяния лобовых частей.

Для определения проводимости лобового рассеяния существуют эмпирические формулы, справедливые для определенного типа обмотки, например, для однофазной однослойной концентрической обмотки эта формула имеет вид

$$\lambda_{л} = (0,47 l_{лсп} - 0,3\tau) \frac{q_1}{l}. \quad (2)$$

Расчет по формуле (2) дает значения $\lambda_{л}$, достаточно близкие к действительным. Недостатком формулы (2) является то, что она не отражает физической сущности сложной картины поля рассеяния лобовых частей. Поэтому невозможно при расчете по формуле (2) оценить влияние отдельных факторов на величину проводимости, в частности, из нее не видно, какое влияние на поле рассеяния оказывают ферромагнитные поверхности, окружающие обмотку, угол наклона лобовой части обмотки и т. п.

Для определения наиболее эффективных методов снижения проводимости лобового рассеяния необходимо найти значения каждой составляющей проводимости. С этой целью в настоящей работе на основе

методов отрезков и зеркальных отображений с помощью счетно-решающей машины «Минск-1» выполнены расчеты, результаты которых позволяют проанализировать влияние отдельных составляющих на величину проводимости лобового рассеяния. Расчет проводился применительно к генераторам ударной мощности, для которых реактивное сопротивление рассеяния является одним из основных параметров и в которых однофазная однослойная обмотка имеет ощутимые преимущества перед другими типами обмоток [6].

Метод отрезков и метод зеркальных отображений

Известны попытки создания методики расчета рассеяния лобовых частей обмоток электрических машин методом отрезков, то есть путем расчета индуктивностей и взаимных индуктивностей отдельных участков катушек обмотки с последующим их суммированием и учета влияния стали статора методом зеркальных отображений [1]. Методика [1] построена на основе классических выражений для индуктивности и взаимной индуктивности двух отрезков [2].

Так как при большом числе катушек расчет методом отрезков становится очень трудоемким, то, с целью упрощения его, автор [1] заменяет среднегеометрические расстояния между отрезками их реальными расстояниями и объединяет группу проводников, составляющих лобовую часть, в один эквивалентный проводник. Такие упрощения приводят к большим погрешностям при расчете взаимных индуктивностей.

Современная вычислительная техника, использующая электронные вычислительные машины, позволяет выполнить расчет рассеяния лобовых частей методом отрезков при любом числе катушек без вышеуказанных упрощений. Такой расчет выполнен нами на счетно-решающей машине Минск-1 для ряда генераторов, имеющих на статоре однофазные однослойные концентрические обмотки. Конфигурация лобовых частей обмотки представлена на рис. 1.

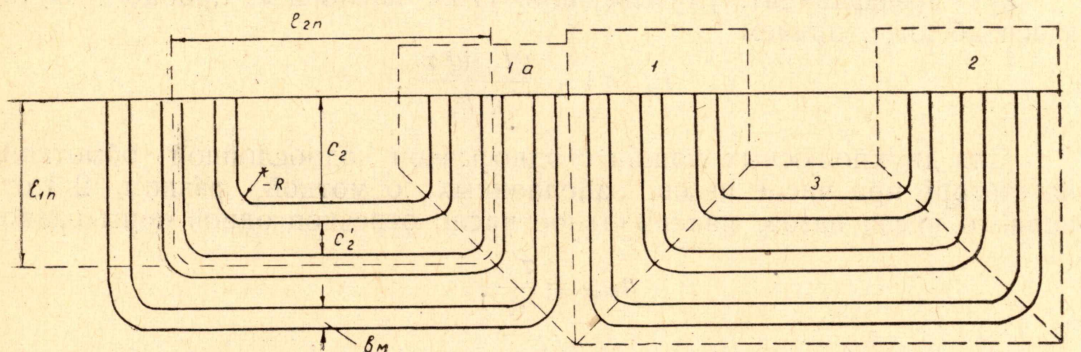


Рис. 1. Лобовая часть обмотки статора.

Реактивность рассеяния лобовых частей рассматривается как сумма реактивностей самоиндукции L всех отрезков каждой из трех зон, обведенных на рис. 1 пунктирными линиями, и взаимных индукций M всех отрезков как внутри каждой зоны, так и между зонами. При этом учитывается увеличение полной индуктивности отрезков за счет наличия стальных поверхностей статора M_{cc} , корпуса M_{ck} , ротора M_{cp} и торцевых щитов M_{ct} .

Самоиндуктивность лобовой части обмотки, представленной на рис. 1, может быть определена через ее геометрические размеры [2]:

$$L = 0,8 \cdot 10^{-8} w_1^2 \sum_{n=1}^{n_{\max}} \left[2l_{1n} \left(\ln \frac{2l_{1n}}{g} + \frac{g}{l_{1n}} - 1 \right) + l_{2n} \left(\ln \frac{2l_{2n}}{g} + \frac{g}{l_{2n}} - 1 \right) \right], \quad (3)$$

где w_1 — число последовательно соединенных витков обмотки,
 n — порядковый номер катушки, начиная с наименьшей,
 g — среднегеометрическое расстояние сечения катушки от самого себя, причем для прямоугольного сечения

$$g = 0,224 (h_m + b_m),$$

h_m и b_m — высота и ширина изолированной меди в пазу, причем

$$b_m = \pi \kappa_n \frac{D}{z_1'},$$

κ_n — отношение ширины паза к зубцовому делению,
 l_{1n} и l_{2n} — длина отрезков n -ной катушки по середине ее сечения соответственно вдоль оси машины и в тангенциальном направлении (рис. 1).

Длину отрезков l_{1n} и l_{2n} можно выразить через параметры, которые являются наиболее характерными для вылета лобовых частей (рис. 1)

$$l_{1n} = C_2 + 0,5 b_m + (n - 1) (b_m + C_2'), \quad (4)$$

$$l_{2n} = \frac{\pi}{z_1'} (D + \kappa_1 \kappa_2 b_m) \left(\frac{z_1'}{6} - 1 + 2n \right), \quad (5)$$

где κ_1 — отношение высоты паза к его ширине;

κ_2 — коэффициент, учитывающий угол наклона α лобовой части к оси абсцисс, причем

$$\kappa_2 = 1 + \frac{2l_{1n} \operatorname{tg} \alpha}{\kappa_1 b_m}.$$

Для двухполюсных машин с однофазной однослойной обмоткой на статоре при числе пазов, заполненных обмоткой, равном $2/3$ от полного числа пазов, максимальное число отрезков одной зоны равно

$$n_{\max} = \frac{z_1'}{6}.$$

Средняя длина отрезков каждой зоны $l_{1\text{ср}}$ и $l_{2\text{ср}}$ может быть определена из выражений (4) и (5) подстановкой вместо n его значения

$$n_{\text{ср}} = \frac{z_1'}{12} + \frac{1}{2}.$$

Тогда средняя длина лобовой части будет равна

$$l_{\text{лср}} = 2C_2 + \frac{\pi}{3} (D + \kappa_1 \kappa_2 b_m) + (C_2' + b_m) \left(\frac{z_1'}{6} - 1 \right) + 0,5 b_m (\pi - 2) + R (\pi - 4). \quad (6)$$

Значения C_2 , C_2' и R даются в виде таблиц в зависимости от величины диаметра расточки статора и напряжения генератора [3,4]. В рассматриваемом случае было принято $C_2 = 0,14D$, $C_2' = 0,5b_m$, $R = 0,05D$. Результаты расчета средней длины лобовой части обмотки представлены в табл. 1 в виде отношения $l_{л.ср}$ к полюсному шагу. Из табл. 1 следует, что при $\alpha < 10^\circ$

$$l_{л.ср} = (1,07 \div 1,17) \tau.$$

Таблица 1

Z_1'	24	30	36	42	48	54	60	66
$\alpha=0^\circ$	1,10	1,09	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07	1,07
$\alpha=5^\circ$	1,12	1,11	1,10	1,10	1,09	1,09	1,09	1,09
$\alpha=10^\circ$	1,17	1,16	1,16	1,15	1,15	1,15	1,15	1,14
$\alpha=25^\circ$	1,29	1,28	1,28	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27

Взаимоиндуктивность любых двух параллельных отрезков (рис. 2а) в общем случае равна

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_0^a \int_0^b \frac{dx_1 dx_2}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + h^2}}. \quad (7)$$

После интегрирования (7) получаются очень громоздкие выражения, которые, однако, становятся более простыми для частных соотношений отрезков, имеющих место в рассматриваемом случае:

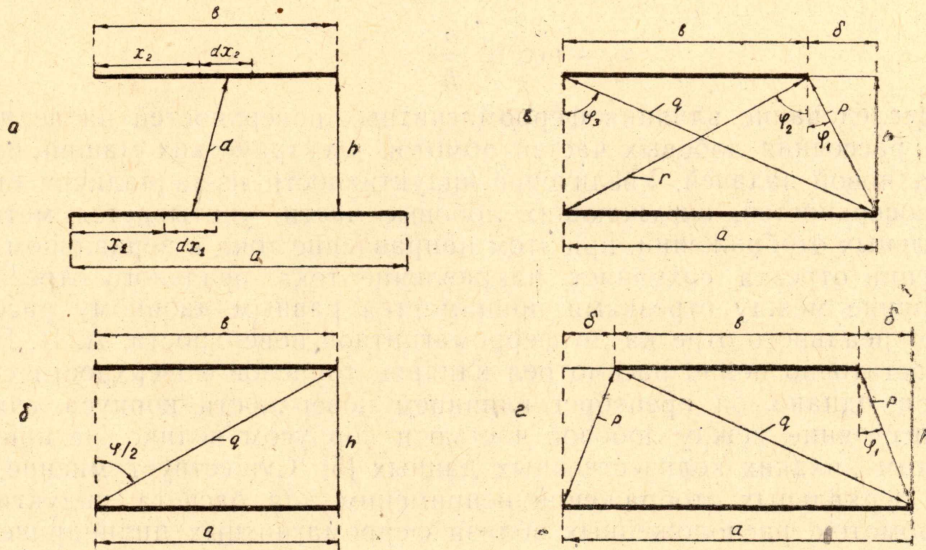


Рис. 2. К расчету взаимоиндуктивности отрезков.

1) при равных отрезках, исходящих от одной граничной плоскости (рис. 2, б),

$$M_1 = 16 \cdot 10^{-8} \omega_1^2 b \left[\ln \frac{b + q_1}{h_1} + \frac{h_1}{b} - \frac{q_1}{b} \right]; \quad (8)$$

2) при неравных отрезках, исходящих от одной граничной плоскости (рис. 2, в)

$$M_2 = 0,1 \cdot 10^{-8} \omega_1^2 \left[a \ln \frac{q_1 + a}{h_1} + b \ln \frac{r_1 + b}{h_1} - \delta \ln \frac{p_1 + \delta}{h_1} + p_1 + h_1 - q_1 - r_1 \right]; \quad (9)$$

3) при неравных отрезках, расположенных симметрично (рис. 2,г)

$$M_3 = 0,2 \cdot 10^{-8} \omega_1^2 \left[(b + \delta) \ln \frac{b + \delta + q_1}{h_1} - \delta \ln \frac{\delta + p_1}{h_1} + p_1 - q_1 \right], \quad (10)$$

где h_1 — среднегеометрическое расстояние между отрезками: p_1, q_1 и r_1 — отрезки, аналогичные отрезкам p, q и r (рис. 2), рассчитанные заменой реального расстояния между отрезками h на среднегеометрическое расстояние h_1 .

Среднегеометрическое расстояние между отрезками определяется величиной отрезков и их взаимным расположением (рис. 2)

$$\ln h_1 = \frac{h^2}{ab} \ln \frac{hp}{qr} - \frac{1}{2ab} [p^2 \ln p + h^2 \ln h - r^2 \ln r - q^2 \ln q] - \frac{h}{ab} [\delta \varphi_1 - b \varphi_2 - a \varphi_3] - \frac{3}{2}, \quad (11)$$

где

$$\varphi_1 = \operatorname{arctg} \frac{\delta}{h}, \quad \varphi_2 = \operatorname{arctg} \frac{b}{h},$$

$$\varphi_3 = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{a}{h}.$$

Исследование влияния ферромагнитных поверхностей на величину полей рассеяния лобовых частей обмоток электрических машин не является новой задачей. Увеличение индуктивности из-за наличия стальных поверхностей, окружающих лобовые части, учитывается методом зеркальных отображений, при этом направление тока в зеркальном отображении отрезка сохраняет направление тока реального отрезка, а расстояние между отрезками принимается равным двойному расстоянию от реального отрезка до ферромагнитной поверхности. А. И. Вольдек достаточно полно рассмотрел влияние торцевой поверхности стали статора, однако, он пренебрег влиянием поверхности корпуса, считая, что расстояние между лобовой частью и корпусом велико, не приводя при этом никаких количественных данных [5]. Существует мнение, что метод зеркальных отображений неприменим для расчета индуктивностей обмоток, расположенных вблизи ферромагнитных цилиндрических поверхностей.

Учет влияния ротора и корпуса на индуктивность рассеяния лобовых частей

Проведенные нами исследования показали, что введением поправочного коэффициента можно свести рассмотрение изогнутого проводника, расположенного вблизи цилиндрической ферромагнитной поверхности, к прямому проводнику и плоской ферромагнитной поверхности. Этот коэффициент зависит от ширины катушки и расстояния ее до ферромагнитной поверхности.

Для экспериментального определения поправочного коэффициента было изготовлено три группы катушек по три катушки в каждой группе. Одна из катушек группы изготовлялась изогнутой по радиусу $R = \frac{\tau}{\pi}$ и имела вид лобовой части концентрической обмотки, причем в первой группе ширина катушки принималась равной полному шагу τ , во второй группе — $\frac{2}{3}\tau$, в третьей — $\frac{1}{3}\tau$. Во всех изогнутых катушках прямолинейные стержни имели меньшую длину по сравнению с изогнутыми стержнями. Две другие катушки каждой группы изготовлялись квадратными со сторонами равными соответственно большей и меньшей стороне изогнутой катушки.

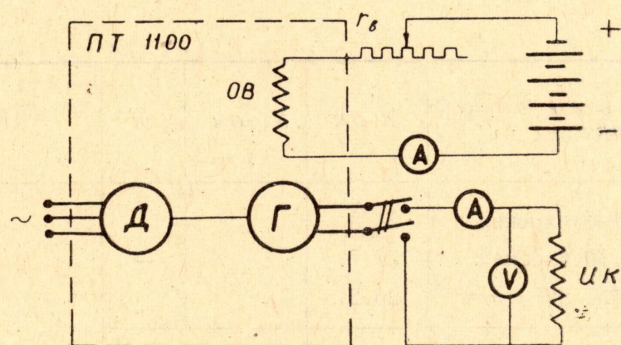


Рис. 3. Схема экспериментальной установки, где УК — поочередно устанавливаемые исследуемые катушки.

Эксперимент производился на установке, принципиальная схема которой представлена на рис. 3. В качестве источника переменного тока использован генератор ПТ-1100, позволяющий получать регулируемое напряжение с частотой 1000 гц. Применение повышенной частоты обусловлено стремлением получить заметные изменения реактивного сопротивления катушек, имеющих сравнительно небольшие геометрические размеры. В процессе экспериментов для всех катушек поочередно измерялись полное сопротивление Z и активное сопротивление r . Полное сопротивление измерялось методом вольтметра и амперметра с использованием приборов класса 0,2, а активное сопротивление измерялось с помощью моста постоянного тока типа УМВ. Реактивное сопротивление катушек определялось расчетным путем

$$x = \sqrt{z^2 - r^2}.$$

Первоначально определялось реактивное сопротивление изогнутой и плоских катушек каждой группы, расположенных в воздухе, затем — сопротивление тех же катушек при расположении их на расстоянии h от ферромагнитной поверхности. При этом для каждой катушки фиксировалась разница X_m между ее сопротивлением вблизи ферромагнитной поверхности и сопротивлением в воздухе.

Если обозначить через X_{m1} увеличение индуктивного сопротивления за счет наличия стали вблизи плоской квадратной катушки, сторона которой равна меньшей (прямолинейной) стороне изогнутой катушки, через X_{m2} — то же, для большей квадратной катушки и через X_{m3} — то же, для изогнутой катушки, то приращение индуктив-

ного сопротивления одного изогнутого стержня из-за наличия стали будет равно

$$\frac{X_{m3} - 0,5 X_{m1}}{2},$$

а приращение индуктивного сопротивления прямого стержня, равного по длине изогнутому стержню, равно $0,25 X_{m2}$. Отсюда можно найти искомый поправочный коэффициент

$$k = \frac{2X_{m3} - X_{m1}}{X_{m2}}. \quad (12)$$

Результаты расчета поправочного коэффициента по экспериментальным данным для одного зазора между катушкой и ферромагнитной поверхностью представлены в табл. 2. При определении коэффициента k .

Таблица 2

№ группы катушек	Размеры в мм и форма катушек	X ом	X_m ом	k	Примечание
1	135×135 плоская	21,3	—	—	Катушки располагались в воздухе
	210×210 плоская	37,7			
	210×135 из. $y = \tau$	26,2			
2	115×115 плоская	18,6	—	—	
	140×140 плоская	22,2			
	140×115 из. $y = \frac{2}{3} \tau$	19,0			
3	65×65 плоская	8,0	—	—	
	70×70 плоская	9,1			
	70×65 из. $y = \frac{1}{3} \tau$	8,6			
1	135×135 плоская	29,7	8,4	0,30	Катушки охватывались ферромагнитной поверхностью. Расстояние от катушки до поверхности $h = 4$ мм.
	210×210 плоская	55,1	17,4		
	210×135 $y = \tau$	33,0	6,8		
2	115×115 плоская	25,8	7,2	0,53	
	140×140 плоская	32,0	9,8		
	140×115 $y = \frac{2}{3} \tau$	25,0	6,2		
3	65×65 плоская	11,1	3,1	0,70	
	70×70 плоская	12,6	3,5		
	70×65 $y = \frac{1}{3} \tau$	11,4	2,8		
1	210×135 $y = \tau$	47,2	21,0	1,93	Катушки охватывали ферромагнитную поверхность $h = 4$ мм
2	140×115 $y = \frac{2}{3} \tau$	31,0	12,0	1,70	
3	70×65 $y = \frac{1}{3} \tau$	12,6	4,0	1,40	

в случае, когда катушка охватывает стальную поверхность, данные для плоских катушек были взяты из строк табл. 2, относящихся к катушкам охватываемым сталью. Аналогичные расчеты были проведены для других зазоров. Зависимости коэффициента k от расстояния между катушкой и ферромагнитной поверхностью как ротора, так и корпуса представлены на рис. 4.

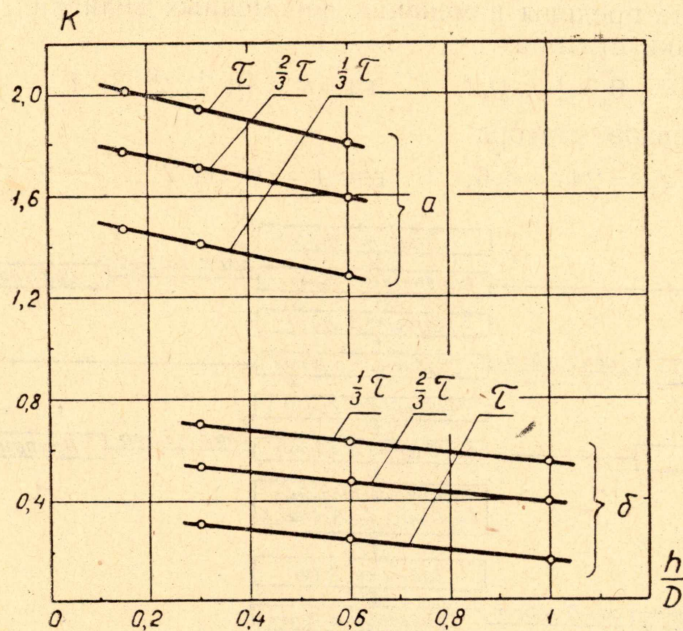


Рис. 4. Зависимость поправочного коэффициента k от расстояния между катушкой и ферромагнитной цилиндрической поверхностью: а) катушка охватывает поверхность, б) катушка охватывается поверхностью.

По данным рис. 4 получены выражения, позволяющие определять поправочный коэффициент аналитическим путем в ходе проектирования машины:

а) для случая, когда катушка охватывает ферромагнитную поверхность,

$$k = 1 + 1,1 \frac{y}{\tau} - 0,5 \frac{h}{D}. \quad (13)$$

б) для случая, когда катушка охватывается ферромагнитной поверхностью,

$$k = 1 - 0,65 \frac{y}{\tau} - 0,2 \frac{h}{D}. \quad (13a)$$

Применение поправочного коэффициента позволит пользоваться методом зеркальных отображений в случае, когда катушка расположена вблизи цилиндрической ферромагнитной поверхности.

Учет влияния подшипниковых щитов на величину рассеяния лобовых частей обмотки статора осуществляется таким же путем, как и торцевой поверхности статора.

Анализ результатов расчета реактивности рассеяния лобовых частей

По изложенной методике, с использованием выражений (3—13), был выполнен на ЭЦВМ «Минск-1» расчет отдельных составляющих и результирующего реактивного сопротивления рассеяния лобовых частей. Блочная схема расчета представлена на рис. 5. При расчетах были приняты следующие пределы изменения переменных величин: диаметр расточки статора

$$D = 0,5 + \kappa \cdot 0,2, \quad \text{где } \kappa = 0; 1; 2; 3; 4,$$

полное число пазов статора

$$z_1 = 24 + \kappa \cdot 6, \quad \text{где } \kappa = 0; 1; 2 \dots 7.$$

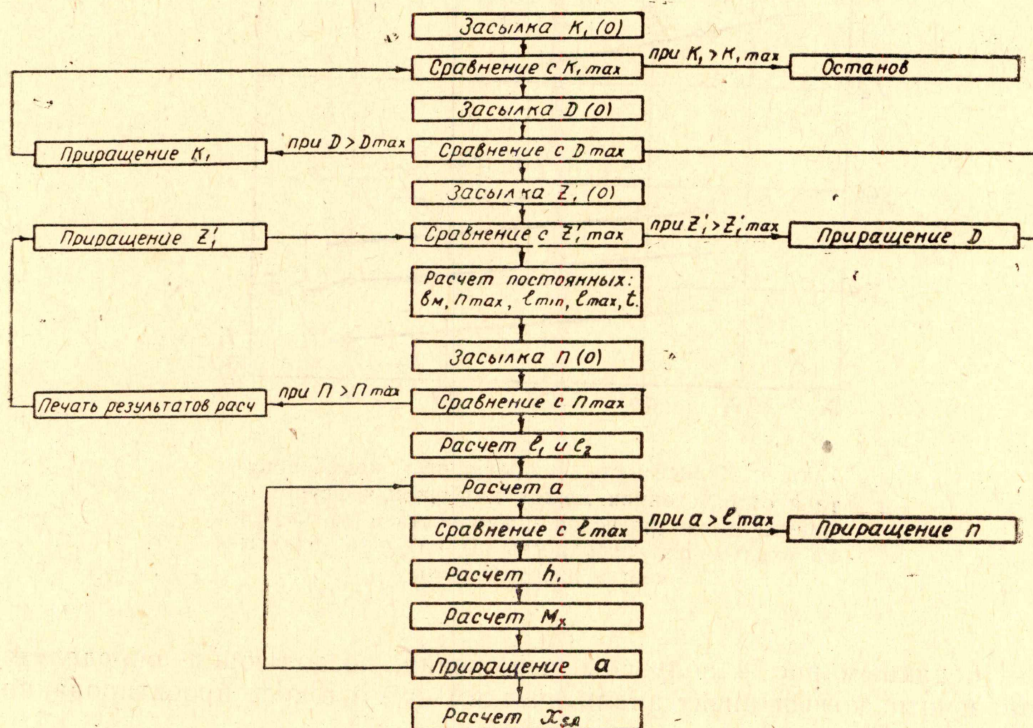


Рис. 5. Блок — схема расчета реактивности лобового рассеяния на ЭЦВМ «Минск-1».

При этом расстояние от крайней катушки до торцевого щита принималось равным $0,6 D$, расстояние от катушек до корпуса — равным D , расстояние от катушек до ротора, в зависимости от числа зубцов статора и ротора и величины диаметра, — равным $(0,1 \div 0,3) D$.

Результаты расчета для одного из диаметров ($D = 0,9$ м) представлены в табл. 3, там же для сравнения приведены значения реактивности лобового рассеяния, рассчитанные по формулам (1) и (2). Для выражения самоиндукции и взаимной индукции в генри необходимо значения L и M в табл. 3 умножить на 10^{-8} .

Для всех рассмотренных диаметров картина распределения составляющих реактивного сопротивления рассеяния лобовых частей получается такой же, как и для $D = 0,9$ м, поэтому данные расчета для других диаметров не приводятся.

Анализируя полученные результаты, частично представленные в табл. 3, можно заключить, что реактивность лобового рассеяния со-

Таблица 3

z_1'	24	30	36	42	48	54	60	66
L	1356	1627	1922	2228	2548	2880	3220	3569
M	1789	3086	4373	6087	8078	10346	12895	15723
$L + M$	3145	4713	6295	8315	10626	13226	16115	19292
M_{cc}	1231	1779	2427	3176	4025	4975	6025	7175
M_{ck}	238	342	465	606	767	946	1144	1361
M_{ct}	622	899	1225	1602	2029	2507	3035	3613
M_{cp}	1189	1710	2237	3058	3863	4791	5803	6903
M_c	3280	4730	6458	8443	10684	13340	16107	19052
$L_{л} = L + M + M_c$	6427	9442	12750	16758	21310	26445	32222	38344
$(L+M) : L_{л} \%$	49	50	49,2	49,7	50	50	50	50,2
$M_{cc} : L_{л} \%$	19,1	18,8	19,0	18,9	18,9	18,8	18,7	18,8
$M_{ck} : L_{л} \%$	3,7	3,6	3,7	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
$M_{ct} : L_{л} \%$	9,7	9,5	9,6	9,6	9,5	9,5	9,5	9,4
$M_{cp} : L_{л} \%$	18,5	18,1	17,5	18,2	18,0	18,1	18,2	18,0
$M_c : L_{л} \%$	51	50	50,8	50,3	50	50	50	49,8
$X_{л} (o.m)$ Минск—1	0,0202	0,0296	0,0400	0,0526	0,067	0,083	0,101	0,120
$X_{л}^* (o.m)$ эмп. форм.	0,0197	0,0294	0,0406	0,0540	0,070	0,088	0,107	0,129
$X_{л} : X_{л}^* \%$	102,5	100,5	98,5	97,5	96,0	94,5	94,5	93,0

стоит из двух примерно одинаковых частей: реактивного сопротивления, которое имела бы лобовая часть при отсутствии стали и реактивного сопротивления, добавляющегося за счет наличия ферромагнитных поверхностей, окружающих обмотку. При этом приращение реактивного сопротивления за счет влияния торцевой поверхности стали статора составляет около 20%, торцевой поверхности щитов — около 10%, цилиндрической поверхности ротора — около 20% и поверхности корпуса — около 4% от полного реактивного сопротивления рассеяния лобовых частей.

Сравнивая результаты расчета на ЭЦВМ с данными, полученными при расчете по формулам (1) и (2), можно отметить их хорошее совпадение. Следовательно, в тех случаях, когда не требуется количественной оценки отдельных составляющих реактивности рассеяния лобовых частей, целесообразно выполнять расчет по эмпирическим формулам.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. В. Шехман. Электричество, № 3, 1950.
 2. П. Л. Калантаров, Л. А. Цейтлин. Расчет индуктивностей (справочная книга), 1955.
 3. И. М. Постников. Проектирование электрических машин. ГИТЛ УССР, Киев, 1960.
 4. А. Е. Алексеев. Конструкция электрических машин. ГЭИ, 1958.
 5. А. И. Вольдек. Электричество, № 1, 1963.
 6. Г. А. Сипайлов, К. А. Хорьков. К выбору обмотки статора ударного генератора. Известия ТПИ, т. 132, 1965.
-