

МЕТОДИКА РАСЧЕТА УСИЛИЙ В ЛОБОВЫХ ЧАСТЯХ ОДНОСЛОЙНОЙ ОБМОТКИ С ПОМОЩЬЮ ЭЦВМ

А. И. ВЕРХОТУРОВ, Г. А. СИПАЙЛОВ, К. А. ХОРЬКОВ

(Представлена научным семинаром электромеханического факультета)

При некоторых аварийных режимах работы электрических машин, например, при коротких замыканиях или замыканиях на небольшое внешнее сопротивление возникают большие электродинамические усилия в зоне лобовых частей обмотки статора. Особенно большую опасность эти усилия представляют в ударном генераторе, нормальным режимом работы которого является режим внезапного короткого замыкания или внезапного замыкания на нагрузку, параметры которой соизмеримы с параметрами генератора. Например, в генераторе ударной мощности амплитуда первой полуволны тока может превышать в $30 \div 40$ раз амплитудное значение установившегося тока и, следовательно, усилия, которые будут испытывать проводники статора генератора, возрастут в $900-1600$ раз.

Наилучшим типом обмотки статора однофазного генератора ударной мощности является однослойная подразделенная концентрическая обмотка. Для расчета усилий в лобовых частях обмотки удобно подразделить весь вылет лобовых частей на три зоны (рис. 1, а).

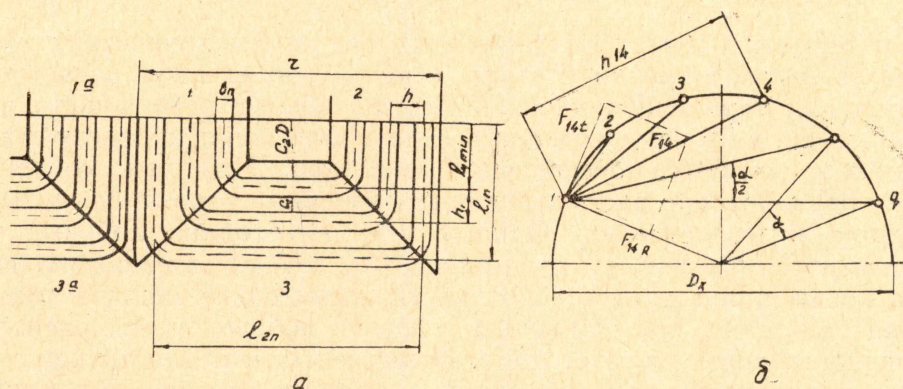


Рис. 1. К определению геометрических размеров обмотки и усилий на проводник.

Усилия на лобовую часть рассматриваются как сумма усилий между отрезками как внутри каждой зоны, так и между зонами. При

этом усилия, возникающие между лобовой частью и торцем железа статора, учитываются в виде усилий между отрезками лобовой части и их зеркальными отображениями. Усилие между двумя отрезками, параллельными друг другу и отстоящими один от другого на расстоянии h , определяется уравнением

$$F_{ab} = \frac{\mu_0}{4\pi} i_1 i_2 \int_0^a \int_0^b \frac{db_1 da_1 \sin \gamma}{\rho^2}, \quad (1)$$

где ρ — расстояние между рассматриваемыми отрезками db_1 , da_1 , γ — острый угол, заключенный между отрезками db_1 , ρ .
Общее решение уравнения (1) получается сложным, однако для частных положений отрезков можно получить сравнительно простые расчетные формулы. Используя методику [2], для интересующих нас случаев получаем следующие зависимости:

а) отрезки исходят от одной граничной плоскости (рис. 2,а)

$$F_{ab} = 1,02 \cdot 10^{-8} I_{уд}^2 \left[\frac{q + r \pm h - p}{h} \right], \quad (2)$$

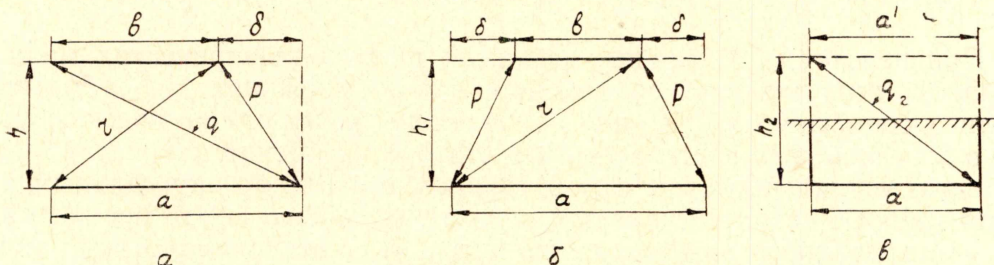


Рис. 2. К расчету механических усилий между отрезками.

б) отрезки неравной длины расположены симметрично (рис. 2,б)

$$F_{ab} = 2,04 \cdot 10^{-8} I_{уд}^2 \left[\frac{r - p}{h} \right], \quad (3)$$

где $I_{уд}$ — максимум сверхпереходного тока короткого замыкания;

$$r = \sqrt{(a - \delta)^2 + h^2}, \quad q = \sqrt{a^2 + h^2}, \quad p = \sqrt{\delta^2 + h^2}. \quad (4)$$

В известных работах, посвященных расчету механических усилий в лобовых частях обмотки статора, с целью облегчения расчетов допускается ряд упрощений, вносящих существенные погрешности в расчет. Например, в [3] не учитывается сила притяжения к железу статора, проводники считаются бесконечно длинными. Наиболее совершенна методика [4], в которой рассматриваются конечные отрезки и учитывается влияние железа статора. Однако в этой методике лобовые части предполагаются плоскими, что справедливо только для многополюсных машин, когда длина дуги лобовой части значительно меньше диаметра расточки статора, а прямолинейные отрезки лобовой части расположены перпендикулярно торцу статора. Естественно, что для двухполюсных машин с concentрической обмоткой методика [4] дает погрешности. В настоящей статье дается методика расчета механических усилий в лобовых частях однослойной concentрической обмотки статора с учетом реального расположения проводников обмотки.

Расчет усилий, действующих на отдельный проводник лобовой части, удобно проводить с помощью цифровых вычислительных машин,

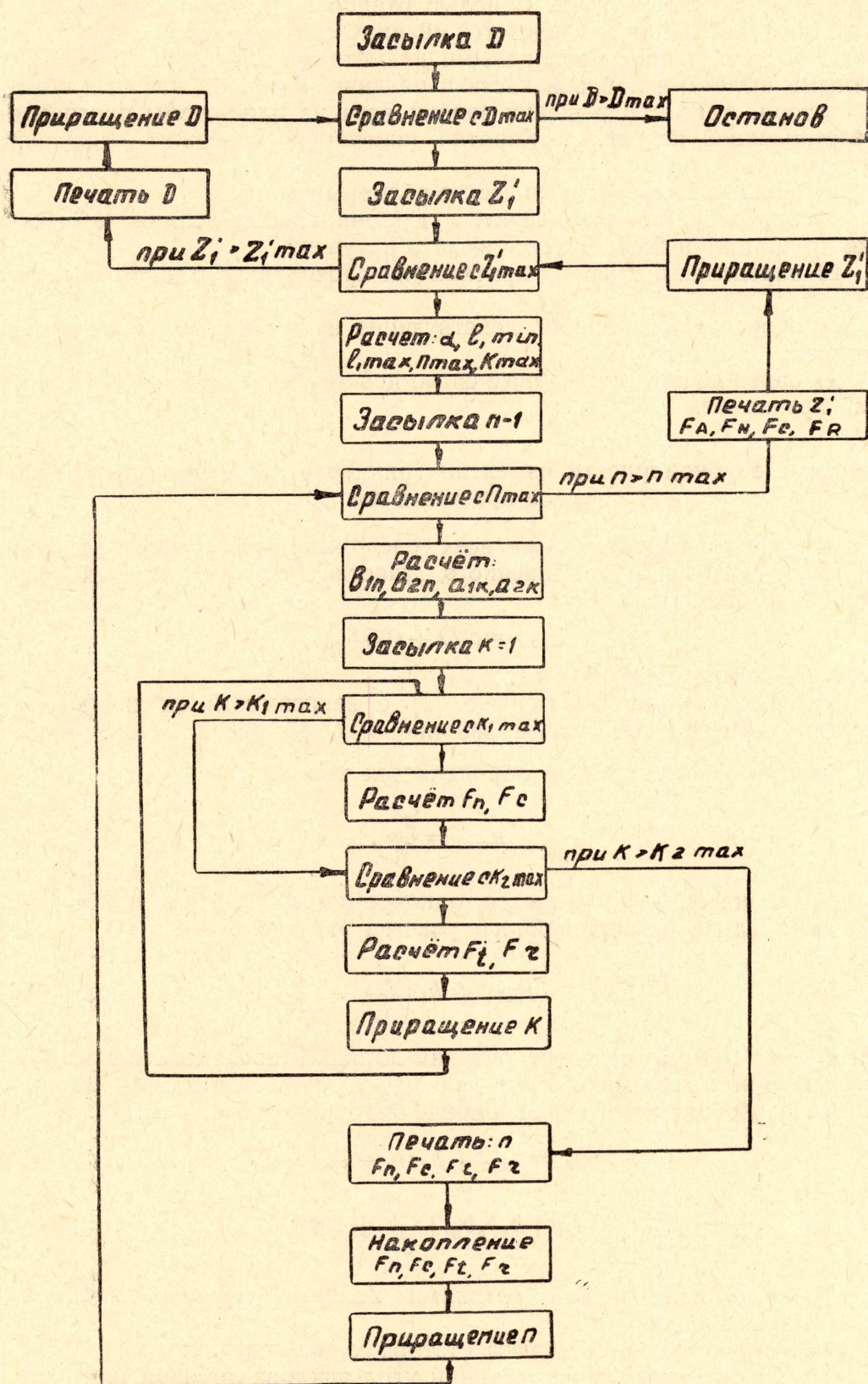


Рис. 3. Блок-схема расчета механических усилий в лобовых частях обмотки статора на ЭЦВМ.

задавая порядок чередования отрезков и закон изменения их длин и расстояний между ними. С целью отработки методики были проделаны на ЭЦВМ Минск-1 расчеты механических усилий в лобовых частях для ряда машин с различными диаметрами расточки статора, различными вылетами лобовой части и различным числом катушек обмотки статора. Алгоритм решения задачи ясен из блок-схемы программы, представленной на рис. 3. Коротко программа содержит следующие разделы решения:

- а) определяются геометрические размеры катушек;
- б) определяются радиальные и тангенциальные усилия, действующие на прямолинейные участки вылета катушек;
- в) определяются усилия притяжения проводников с током к железу статора;
- г) определяются усилия, действующие на изогнутые части вылета катушек;
- д) определяются суммарные силы, действующие на проводник и детали крепления.

Основные закономерности изменения размеров лобовой части катушек в пространстве

Присвоим катушке, ближе всех расположенной к торцу статора, номер 1. Длина прямолинейного участка вылета этой катушки (рис. 1, а) равна

$$l_{1\min} = c_2 D + 0,5 b_n, \quad (5)$$

где b_n — ширина паза статора.

Величина c_2 принимается по [1] в зависимости от напряжения обмотки статора. При числе заполненных обмоткой пазов, равном $\frac{2}{3} z'_1$, число катушек в зоне определяется как

$$n_{\max} = \frac{z'_1}{6}, \quad (6)$$

причем величина $n_{\max}$ является одновременно номером наибольшей катушки. Длина прямолинейного участка этой катушки

$$l_{1\max} = l_{1\min} + h_1 \left(\frac{z'_1}{6} - 1 \right). \quad (7)$$

Логика программы построена на порядке последовательного изменения номера катушек n от 1 до $n_{\max}$, при этом длины прямолинейных и изогнутых отрезков определяются по формулам:

$$b_{1n} = l_{1\min} + h_1 (n - 1), \quad (8)$$

$$b_{2n} = \frac{\pi}{z'_1} (D + k_1 k_4 b_n) \left(\frac{z'_1}{6} + 2n - 1 \right), \quad (9)$$

где h_1 — расстояние между средними линиями соседних изогнутых отрезков;

k_1 — отношение высоты паза статора к его ширине;

k_4 — коэффициент, учитывающий угол наклона лобовой части к оси машины β :

$$k_4 = 1 + \frac{2b_{1n} \operatorname{tg} \beta}{k_1 b_n}. \quad (10)$$

Расчет усилий, действующих на прямолинейные отрезки

Рассматриваем последовательно прямолинейные отрезки 1, 2, 3... катушек первой и второй зоны (рис. 1, а). Усилия на прямолинейный отрезок первой катушки складываются из усилий между этим отрезком и рядом лежащими отрезками, номера которых обозначаем через k . Величина k характеризует число зубцовых делений между отрезками внутри зоны от $k=1$ до $k=n_{\max}-n$ в сторону возрастания отрезков a_{1k} и от $k=-1$ до $k=-(n-1)$ в сторону уменьшения отрезков a_{1k} относительно длины рассматриваемого n -ного отрезка b_{1n} . Длина отрезка k -той катушки равна

$$a_{1v} = b_{1n} + kh_1. \quad (11)$$

Расстояние между n -ным и k -тым отрезками по прямой (рис. 1, б) равно

$$h = (D + k_1 k_4 b_n) \sin k \frac{\alpha}{2}, \quad (12)$$

где α — угол между осями соседних пазов,

$$\alpha = \frac{2\pi p}{z'_1}. \quad (13)$$

Для каждого n -ного отрезка первой зоны одновременно определяется усилие, действующее на него от отрезков зоны 1а, при этом величина k получает соответственно большие значения до $k=2n_{\max}-n$.

Усилия, действующие на прямолинейные отрезки, имеет смысл разложить на тангенциальные F_{tn} и радиальные F_{rn} , для чего необходимо умножить данные, полученные по формуле (2), соответственно на $\cos k \frac{\alpha}{2}$ и на $\sin k \frac{\alpha}{2}$. Общее радиальное усилие от прямолинейных отрезков первой зоны на единицу длины машины определяется как сумма

$$f_R = \sum_{n=1}^{n_{\max}} \frac{2F_{rn}}{b_{1n}} \cos \left(\frac{z'_1}{3} - 2n + 1 \right) \frac{\pi}{z'_1}. \quad (14)$$

Расчет усилий, действующих на криволинейные отрезки

Расчет усилий, действующих на отрезки третьей зоны, целесообразно разделить на две части: расчет усилий за счет взаимодействия магнитных полей отрезков внутри зоны и расчет усилий за счет взаимодействия магнитных полей отрезков с ферромагнитной поверхностью торца статора. В обоих случаях порядок расчета аналогичен порядку расчета усилий в первой зоне. Это позволяет связать все расчеты воедино алгоритмом изменения n и k .

Расчет усилий между отрезками n и k третьей зоны F_n ведется по формуле (3). При этом длина n -ного отрезка определяется по (9), а длина k -того отрезка — по (15)

$$a_{2k} = \frac{\pi}{z'_1} (D + k_1 k_4 b_n) \left(\frac{z'_1}{6} + 2n + 2k - 1 \right). \quad (15)$$

Расстояние между осевыми линиями n -ного и k -того отрезков равно

$$h_1 = k(b_n + c_1). \quad (16)$$

Усилия между отрезками третьей зоны и ферромагнитной поверхностью

$$F_{cn} = 2,04 \cdot 10^{-8} I_{yd}^2 \left[\frac{q_2 - h_2}{h_2} \right], \quad (17)$$

где h_2 —расстояние между n -ным отрезком и его зеркальным отображением (рис. 2в).

Общее аксиальное усилие, действующее на лобовую часть от взаимодействия отрезков внутри зоны и от сил притяжения отрезков с током к железу на единицу длины лобовой части, определяется как сумма

$$f_A = \sum_{n=1}^{n_{\max}} \left[\frac{F_n}{b_{2n}} + \frac{F_c}{b_{2n}} \right]. \quad (18)$$

В качестве примера можно привести результаты расчета усилий на лобовую часть машины с $D = 90$ см, $c_2 = 0,14$ и $z'_1 = 48$, проведенные на ЭЦВМ Минск-1 (табл. 1).

Таблица 1

n	1	2	3	4	5	6	7	8
f_t	45,6	39,0	31,0	30,0	23,0	19,4	13,5	5,60
f_r	10,7	9,60	8,50	7,50	6,40	5,30	3,20	2,10
f_n	63,5	26,7	14,2	8,26	22,4	37,7	56,3	81,5
f_c	2,40	2,08	2,00	1,73	1,67	1,58	1,56	1,53
$f_R = 85$	$f_N = 101$		$f_{ст} = 13$			$f_A = 114$		

Примечание: Для получения усилий в кг на метр длины лобовой части необходимо значения, приведенные в табл. 1, умножить на величину $I_{уд}^2 \cdot 10^{-8}$.

Из приведенных расчетов можно сделать следующие выводы:

1. Наибольшие усилия на единицу длины проводника действуют на первый проводник. Разложение силы на тангенциальную и радиальную составляющие позволяет рассчитывать проводник на срез и определять результирующее радиальное усилие на внутреннюю каппу бандажного узла статора.

2. Найденное аксиальное усилие позволяет рассчитать криволинейные участки лобовой части на изгиб и на прочность. А найденная сила притяжения отрезков лобовой части к железу статора позволяет рассчитывать внешнее кольцо каппы статора.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Е. Алексеев. Конструкция электрических машин. ГЭИ, 1958.
2. Г. Б. Холявский. Расчет электродинамических усилий в электрических аппаратах, ГЭИ, 1962.
3. I. F. Calvet. Forces in Turbine Generator Stator Windings, Trans. of the A. I. E. E., 1931, 50, p. 173.
4. D. Harrington. Forces in Machine End Winding, Trans. of the A. I. E. E., 1952, 71, pt. III.