

## ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ УСИЛИЯ В ЛОБОВЫХ ЧАСТЯХ УДАРНОГО ГЕНЕРАТОРА

В. И. Попов, Г. А. Сипайлов

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин  
и общей электротехники)

При внезапных коротких замыканиях в обмотках электрических машин возникают значительные электродинамические силы. Еще большие электродинамические усилия (эду) воздействуют на обмотки статоров генераторов ударной и разрывной мощности (УГ). Так, в отечественном УГ типа ТИ-75-2 при амплитуде тока 170 ка эду, действующее на лобовую часть стержня, лежащего на краю фазной зоны, составляет 1000 н/см, а суммарная сила на всю лобовую часть—7,7 т [2]. Чтобы противостоять таким огромным динамическим нагрузкам, лобовая часть обмотки статора УГ должна быть надежно закреплена. Разработка наиболее совершенного крепления может быть произведена только при наличии достаточно ясной и полной картины распределения механических нагрузок, действующих на лобовую часть.

На основе [1] для составляющих усилий, действующих на элементарные объемы проводника лобовой части, в цилиндрической системе координат имеем:

$$dF_z = \frac{I}{ab} B_{rII} dv, \quad \text{н}; \quad (1)$$

$$dF_{rk} = \frac{I}{ab} B_{zII} dv, \quad \text{н}. \quad (2)$$

для прямолинейных участков

$$dF_{rII} = \frac{I}{ab} B_{\varphi II} dv', \quad \text{н}; \quad (3)$$

$$dF_{\varphi} = \frac{I}{ab} B_{rII} dv', \quad \text{н}, \quad (4)$$

где  $F_z$  — аксиальное усилие в криволинейной части обмотки;  
 $F_{rk}$  — радиальное усилие в криволинейной части обмотки;  
 $F_{rII}$  — радиальное усилие, действующее на прямые участки стержней;  
 $F_{\varphi}$  — тангенциальное усилие, действующее на прямые участки стержней;  
 $v$  — объем интегрирования в криволинейной части обмотки;

$v'$  — то же, для прямолинейной части;  
 $I$  — полный ток стержня;  
 $ab$  — сечение стержня;  
 $B_{\text{II}}, B_{z\text{II}}, B_{\varphi\text{II}}$  — составляющие индукции для соответствующих точек, в которых определяются эду (область II) [1].

Для определения суммарных эду, действующих на стержень, необходимо элементарные усилия просуммировать по объему стержня. После интегрирования выражений (1), (2), (3), (4) и преобразований получим формулы для вычисления суммарных усилий, действующих на произвольный объем лобовой части.

$$\begin{aligned}
 F_z = & \frac{32I^2 R_K^2 \mu_0 q}{\pi^2 a (C_2 - C_1) p} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \left( \Lambda_{1v_n} + \frac{R_K + R_1}{4R_K} \Lambda_{1n} \right) \frac{1}{n} \cos \frac{\pi n (C_2 + C_1)}{2C} \times \right. \\
 & \times \sin \frac{\pi n (C_2 - C_1)}{2C} \sin \frac{\pi (1 - 0,5\gamma)}{2} - \left( \Lambda_{1w_n} + \frac{R_K + R_1}{4R_K} \Lambda_{1n} \right) \times \\
 & \times \frac{p^2 (C_2 - C_1) C k_p}{\pi R_K^2} \frac{1}{n^2} \cdot \sin^2 \frac{\pi n (C_2 + C_1)}{4C} \left. \right] \cdot \sin \frac{\pi n (z_2 + z_1)}{2C} \times \\
 & \times \sin \frac{\pi n (z_2 - z_1)}{2C} \cdot \sin \frac{p(\varphi_2 + \varphi_1)}{2} \sin \frac{p(\varphi_2 - \varphi_1)}{2}, \quad (5)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_{rK} = & \frac{2I^2 \mu_0 q (z_2 - z_1)}{\pi a b^2 p^2 C} \left[ \Lambda_{0p} + \frac{16b R_K C^2 p}{\pi^2 (z_2 - z_1) (C_2 - C_1)} \sum_{n=1}^{\infty} (\Lambda_{2v_n} + \Lambda_{2n}) \times \right. \\
 & \times \frac{1}{n^2} \cos \frac{\pi n (z_2 + z_1)}{2C} \cdot \sin \frac{\pi n (z_2 - z_1)}{2C} \cos \frac{\pi n (C_2 + C_1)}{2C} \times \\
 & \left. \times \sin \frac{\pi n (C_2 - C_1)}{2C} \right] \sin \frac{\pi (1 - 0,5\gamma)}{2} \cdot \sin \frac{p(\varphi_2 + \varphi_1)}{2} \sin \frac{p(\varphi_2 - \varphi_1)}{2}, \quad (6)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_{r\text{II}} = & \frac{16I^2 \mu_0 q k_p C}{\pi^2 a b} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \Lambda_{2w_n} + \Lambda_{2n} - b \frac{R_K + R_1}{4R_K} \Lambda_{1n} \right) \times \\
 & \times \frac{1}{n^2} \sin^2 \frac{\pi n (C_2 + C_1)}{4C} \sin \frac{\pi n (z_2' + z_1')}{2C} \cdot \sin \frac{\pi n (z_2' - z_1')}{2C} \times \\
 & \times \cos \frac{p(\varphi_2' + \varphi_1')}{2} \sin \frac{p(\varphi_2' - \varphi_1')}{2}, \quad (7)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_{\varphi} = & \frac{32I^2 R_K^2 \mu_0 q}{\pi^2 a (C_2 - C_1) p} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \left( \Lambda_{1v_n} + \frac{R_K + R_1}{4R_K} \Lambda_{1n} \right) \frac{1}{n} \cos \frac{\pi n (C_2 + C_1)}{2C} \times \right. \\
 & \times \sin \frac{\pi n (C_2 - C_1)}{2C} \sin \frac{\pi (1 - 0,5\gamma)}{2} - \left( \Lambda_{1w_n} + \frac{R_K + R_1}{4R_K} \Lambda_{1n} \right) \times \\
 & \times \frac{p^2 (C_2 - C_1) C k_p}{\pi R_K^2} \frac{1}{n^2} \sin^2 \frac{\pi n (C_2 + C_1)}{4C} \left. \right] \sin \frac{\pi \cdot (z_2' + z_1')}{2C} \times \\
 & \times \sin \frac{\pi n (z_2' - z_1')}{2C} \sin \frac{p(\varphi_2' + \varphi_1')}{2} \sin \frac{p(\varphi_2' - \varphi_1')}{2}, \quad (8)
 \end{aligned}$$

где

$$\Lambda_{1v_n} = \frac{f_v K_p(mR_K) + \varepsilon_v I_p(mR_K)}{\beta_v f_v - \varepsilon_v \lambda_v} \left[ \beta_v I_p(mR_K) + \lambda_v K_p(mR_K) \right],$$

$$\Lambda_{1w_n} = \frac{f_w K_p(mR_K) + \varepsilon_w I_p(mR_K)}{\beta_w f_w - \varepsilon_w \lambda_w} \left[ \beta_w I_p(mR_K) + \lambda_w K_p(mR_K) \right],$$

$$\Lambda_{2v_n} = \frac{f_v K_p(mR_K) + \varepsilon_v I_p(mR_K)}{\beta_v f_A - \varepsilon_v \lambda_v} \times$$

$$\times \left[ \beta_v \{R_2 I_p(mR_2) - R_1 I_p(mR_1)\} + \lambda_v \{R_2 K_p(mR_2) - R_1 K_p(mR_1)\} \right],$$

$$\Lambda_{2w_n} = \frac{f_w K_p(mR_K) + \varepsilon_w I_p(mR_K)}{\beta_w f_w - \varepsilon_w \lambda_w} \left[ \beta_w \left\{ R_2 I_p(mR_2) - R_1 I_p(mR_1) - b I_p(mR_K) \right\} + \right.$$

$$\left. + \lambda_w \left\{ R_2 K_p(mR_2) - R_1 K_p(mR_1) - b K_p(mR_K) \right\} \right],$$

$$\Lambda_{1n} = I_p \left( m \frac{R_K + R_1}{2} \right) K_p(mR_K) - I_p(mR_K) K_p \left( m \frac{R_K + R_1}{2} \right),$$

$$\Lambda_{2n} = R_2 [I_p(mR_K) K_p(mR_2) - I_p(mR_2) K_p(mR_K)],$$

$$\Lambda_{op} = \frac{R_2^{2-p} - R_1^{2-p}}{2-p} \left[ \frac{r_2^{2p} (R_2^{1+p} - R_1^{1+p})}{r_2^{2p} - r_1^{2p}} + \right.$$

$$\left. + \frac{p+1}{p-1} \frac{(r_1 r_2)^{2p} (R_2^{1-p} - R_1^{1-p})}{r_2^{2p} - r_1^{2p}} - R_2^{1+p} \right] +$$

$$+ \frac{R_2^{2+p} - R_1^{2+p}}{2+p} \left[ \frac{r_1^{2p} (R_2^{1-p} - R_1^{1-p})}{r_2^{2p} - r_1^{2p}} - \frac{p-1}{p+1} \frac{R_2^{1+p} - R_1^{1+p}}{r_2^{2p} - r_1^{2p}} + R_2^{1-p} \right],$$

$q$  — число стержней на полюс и фазу,  
 $z_1, z_2, \varphi_1, \varphi_2$  — пределы интегрирования по переменным  $z$  и  $\varphi$  в криволинейной части обмотки,  
 $z_1', z_2', \varphi_1', \varphi_2'$  — то же, в прямолинейной части.

Задача по определению поля рассеяния в лобовой зоне решена в общем виде, то есть для любой полюсности машины [1], поэтому при вычислении коэффициента  $\Lambda_{op}$  для  $p=1$  и  $p=2$  появляются неопределенности вида  $\frac{0}{0}$ . Воспользовавшись правилом Лопиталья, можно избавиться от этой неопределенности. Например, для  $p=1$  имеем

$$\Lambda_{o1} = b \left[ \frac{r_2^2 (R_2^2 - R_1^2)}{r_2^2 - r_1^2} + \frac{2(r_1 r_2)^2}{r_2^2 - r_1^2} \ln \frac{R_1}{R_2} - R_2^2 \right] + \frac{R_2^3 - R_1^3}{3}.$$

Из-за неоднородности поля рассеяния в лобовой зоне стержни испытывают неодинаковые усилия. Поэтому для выявления наиболее напряженных мест в лобовой части приходится определять усилия, действующие на каждый стержень в отдельности:

С этой целью введем следующие обозначения [рис. 1]:

$n_c$  — номер стержня, считая от активной стали статора,

$b_n$  — ширина паза статора,

$h$  — толщина дистанционной распорки между стержнями в криволинейной части,

$\Delta_{из}$  — толщина односторонней изоляции стержня.

Из рис. 1 с учетом введенных обозначений можно показать, что для

$$\gamma = \frac{2}{3}.$$

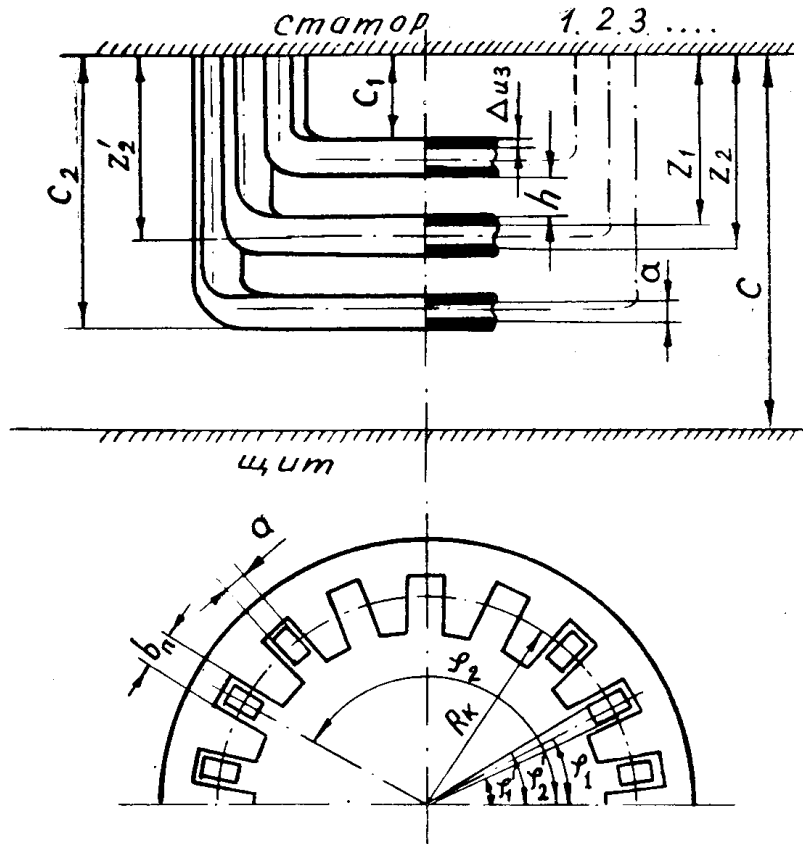


Рис. 1. К определению геометрических размеров лобовой части УГ

$$\frac{z_2 + z_1}{2} = z_2' = C_1 - h - 0,5b_n + n_c(h + b_n),$$

$$z_2 - z_1 = a,$$

$$z_1' = 0.$$

$$\frac{\varphi_2' + \varphi_1'}{2} = \frac{\pi}{3q} (q + 1 - 2n_c),$$

$$\frac{\varphi_2' - \varphi_1'}{2} = \frac{a}{2R_k},$$

$$\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} = \frac{\pi}{3p} \left[ \frac{1}{2} + \frac{1}{q} (2n_c - 1) \right],$$

$$\frac{\varphi_2 + \varphi_1}{2} = \frac{\pi}{2p}.$$

Подставив полученные соотношения в (5), (6), (7), (8), получим конечные выражения для вычисления суммарных составляющих ЭДУ на любой стержень лобовой части ударного генератора, имеющего  $\frac{2}{3}$  заполненных пазов статора.

$$F_z = \frac{16\sqrt{3} I^2 R_k^2 \mu_0 q}{\pi^2 a (C_2 - C_1) p} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \left( \Lambda_{1Vn} + \frac{R_k + R_1}{4R_k} \Lambda_{1n} \right) \frac{1}{n} \times \right.$$

$$\begin{aligned} & \times \cos \frac{\pi n(C_2 + C_1)}{2C} \sin \frac{\pi n(C_2 - C_1)}{2C} - \left( \Lambda_{1Wn} + \frac{R_K + R_I}{4R_K} \Lambda_{1n} \right) \times \\ & \times \frac{2p^2(C_2 - C_1)C_{Kp}}{\sqrt{3} \pi R_K^2} \frac{1}{n^2} \sin^2 \frac{\pi n(C_2 + C_1)}{4C} \left] \sin \frac{\pi[0,5q + (2n_c - 1)]}{3q} \times \right. \\ & \left. \times \sin \frac{\pi n[C_1 - h - 0,5b_{II} + n_c(h + b_{II})]}{C} \sin \frac{\pi na}{2C}, \quad (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{TK} = & \frac{\sqrt{3} I^3 \mu_0 q}{\pi b^2 p^2 C} \left[ \Lambda_{Op} + \frac{16bR_K p C^2}{\pi^2 a(C_2 - C_1)} \sum_{n=1}^{\infty} (\Lambda_{2Vn} + \Lambda_{2n}) \frac{1}{n^2} \times \right. \\ & \left. \times \cos \frac{\pi n[C_1 - h - 0,5b_{II} + n_c(h + b_{II})]}{C} \sin \frac{\pi na}{2C} \times \right. \\ & \left. \times \cos \frac{\pi n(C_2 + C_1)}{2C} \sin \frac{\pi n(C_2 - C_1)}{2C} \right] \sin \frac{\pi[0,5q + (2n_c - 1)]}{3q}, \quad (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{III} = & \frac{32I^2 \mu_0 q C_{Kp}}{\pi^2 ab} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \Lambda_{2Wn} + \Lambda_{2n} - \frac{R_K + R_I}{4R_K} \Lambda_{1n} \right) \frac{1}{n^2} \times \\ & \times \sin^2 \frac{\pi n(C_2 + C_1)}{4C} \cdot \sin^2 \frac{\pi n[C_1 - h - 0,5b_{II} + n_c(h + b_{II})]}{2C} \times \\ & \times \cos \frac{p\pi(q + 1 - 2n_c)}{3q} \cdot \sin \frac{pa}{2R_K}, \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{\varphi} = & \frac{16\sqrt{3} I^2 R_K^2 \mu_0 q}{\pi^2 a(C_2 - C_1) p} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \left( \Lambda_{1Vn} + \frac{R_K + R_I}{4R_K} \Lambda_{1n} \right) \frac{1}{n} \times \right. \\ & \times \cos \frac{\pi n(C_2 + C_1)}{2C} \sin \frac{\pi n(C_2 - C_1)}{2C} - \left( \Lambda_{1Wn} + \frac{R_K + R_I}{4R_K} \Lambda_{1n} \right) \times \\ & \times \frac{2p^2(C_2 - C_1)C_{Kp}}{\sqrt{3} \pi R_K^2} \frac{1}{n^2} \sin^2 \frac{\pi n(C_2 + C_1)}{4C} \left] \times \right. \\ & \times \sin^2 \frac{\pi n[C_1 - h - 0,5b_{II} + n_c(h + b_{II})]}{2C} \sin \frac{\pi p(q + 1 - 2n_c)}{3q} \times \\ & \times \sin \frac{pa}{2R_K}. \quad (12) \end{aligned}$$

Ряды, входящие в выражения (9), (10), (11), (12), быстро сходятся благодаря наличию членов с  $\frac{1}{n^2}$ , поэтому при вычислении сумм рядов достаточно взять 2÷3 члена. Для убедительности могут быть приведены такие цифры. При определении усилий в машине, взятой в качестве примера, в рядах бралось по пять членов. Если сумму пяти членов принять за 100%, то, например, для первого стержня усилия в аксиальном направлении составили соответственно для  $n=1,2,3,4,5$  +10,88%, 90,2%, +0,67%, -1,48%, -0,25%.

По (9), (10), (11), (12) были рассчитаны суммарные и удельные усилия, действующие на стержни УГ, имеющего следующие данные:  $D_c=1,125 м$ ;  $D_p=1,075 м$ ;  $\beta=0,3$ ;  $2p=2$ ;  $q=16$ ;  $B_\delta=1 тл$ ;  $B_{zc}=2 тл$ ;  $C=0,55 м$ ;  $C_1=0,13 м$ ;  $C_2=0,42 м$ ;  $R_1=0,575 м$ ;  $R_2=0,62 м$ ;  $r_1=0,525 м$ ;  $r_2=1,38 м$ ;  $a=0,0187 м$ ;  $h=0$ .

Расчетные кривые суммарных и удельных нагрузок на стержни лобовой части УГ приведены на рис. 2 и 3. Как и следовало ожидать, наи-

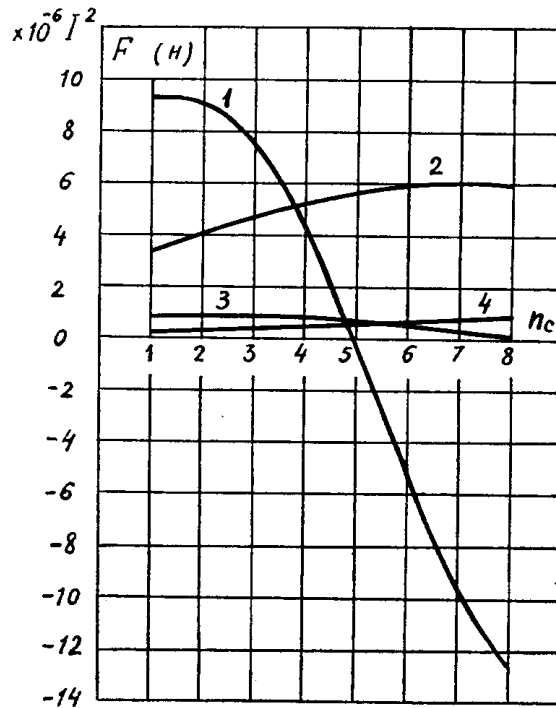


Рис. 2. Распределение суммарных усилий по стержням лобовой части УГ: 1, 2 — аксиальные и радиальные усилия в криволинейной части обмотки; 3, 4 — тангенциальные и радиальные усилия на прямолинейных участках стержней

большие удельные нагрузки приходятся на стержни, лежащие ближе к активной стали статора. Уменьшение тангенциальной нагрузки с увеличением номера стержня объясняется уменьшением радиальной составляющей индукции поля рассеяния. Аксиальные нагрузки в криволинейной части обмотки являются преобладающими. Так, при токе 200 ка для данной машины аксиальная удельная нагрузка на первый стержень составляет 5300 н/см. Суммарная сила, действующая на всю лобовую часть машины, в аксиальном направлении достигает 11 т.

По данной методике могут быть вычислены в один прием как суммарные, так и удельные усилия, действующие на любой стержень лобовой части, поэтому нет необходимости разбивать криволинейную часть обмотки на прямолинейные отрезки и вычислять силы для каждого от-

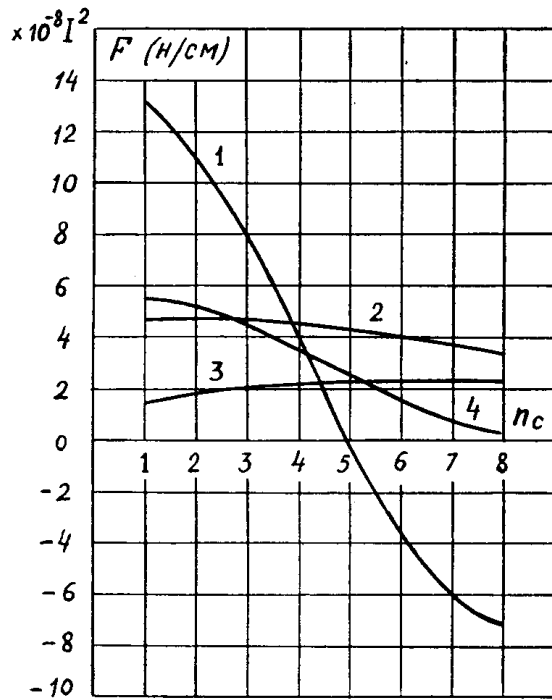


Рис. 3. Распределение удельных механических нагрузок по стержням лобовой части: 1, 2 — аксиальные и радиальные нагрузки в криволинейной части обмотки; 3, 4 — радиальные и тангенциальные нагрузки на прямых участках стержней

резка при взаимодействии его со всеми остальными проводниками. При определении усилий по выражениям (9), (10), (11) и (12) достаточно полно учитывается влияние окружающих ферромагнитных поверхностей, размеры поперечных сечений токопроводов и геометрия лобового пространства, а также влияние всех токов в стержнях лобовой части. Полученные выражения дают возможность определить усилия в лобовой части неразвернутой машины с любой полюсностью.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Попов, Г. А. Сипайлов. Расчет полей рассеяния в лобовых зонах однослойных обмоток (наст. сборн.).
2. М. Ф. Юдов. Вибрация и деформация обмоток статоров синхронных машин. «Энергия», 1968.
3. Е. Я. Казовский, А. А. Чистяков. Конструкции крепления обмоток статоров турбогенераторов зарубежного производства. Информстандартэлектро, М., 1968.