

С. Г. АМАМЧЯН, В. С. АРУТЮНЯН

### ИНДУКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ОБМОТКИ В СИНХРОННЫХ МАШИНАХ С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ОТ ТРЕТЬЕЙ ГАРМОНИКИ ПОЛЯ

1. Одним из перспективных направлений по улучшению надежности и экономичности синхронных машин с автоматическим регулированием возбуждения является переход на встроенную систему возбуждения с использованием третьей гармоники поля [1—3]. Питание обмотки возбуждения через выпрямитель при этом осуществляется от специальной дополнительной обмотки (ДО), устанавливаемой в пазах вместе с основной обмоткой якоря. Наиболее целесообразная конструкция ДО имеет вид симметричной трехфазной обмотки с числом полюсов, утроенным по отношению к основной обмотке, с шагом, возможно близким к трети полюсного деления. Для разработки и исследования такой системы возбуждения необходимо определение индуктивного сопротивления ДО. Величина этого параметра имеет важное значение при определении мощности, генерируемой ДО, а также при определении внешних характеристик синхронной машины.

2. Для  $m$ -фазной ДО индуктивное сопротивление фазы, с учетом взаимоиндуктивности от других фаз, при синусоидальном распределении н. с. и неявнополюсном роторе, может быть определено в виде:

$$x_{a3} = \frac{4m}{3\pi} f_1 \frac{\mu_0 \tau l}{\delta k_c} \cdot \frac{(\omega_1 k_{o03})^2}{p_1}, \quad (1)$$

где  $f_1$  — частота первой гармоники поля;  $\tau$  — полюсное деление машины;  $l$  — длина якоря (расчетная);  $\delta$  — величина воздушного зазора;  $k_c$  — коэффициент воздушного зазора;  $\omega_1$  — число витков в фазе ДО;  $k_{o03}$  — обмоточный коэффициент ДО для третьей гармоники поля;  $p_1$  — число пар полюсов машины;  $\mu_0$  — магнитная проницаемость воздуха.

Индуктивное сопротивление  $x_{a3}$  является сопротивлением реакции ДО. Полное индуктивное сопротивление ДО

$$x_3 = x_{\mu 3} + x_{a3},$$

где  $x_{\mu 3}$  — индуктивное сопротивление рассеяния.

3. При явнополюсном роторе характер реакции ДО и ее индуктивное сопротивление изменяются. В этом случае кривая поля  $B_3(x)$  имеет несинусоидальную форму (рис. 1, а) и зависит от величины

воздушного зазора  $\delta$ , коэффициента полюсного перекрытия  $\alpha$ , отношений  $\delta_m/\delta$ ,  $\delta/\tau$  и угла между осями полюса и н.с. ДО  $\beta = \frac{\pi}{\tau} b$ .

Особенности реакции ДО при явнополюсном роторе удобно выявить в простейшем случае, когда величина воздушного зазора на протяжении полюсного наконечника весьма мала ( $\delta \approx 0$ ), что позволяет пренебречь краевыми эффектами и принять  $\delta_m/\delta = 1$ .

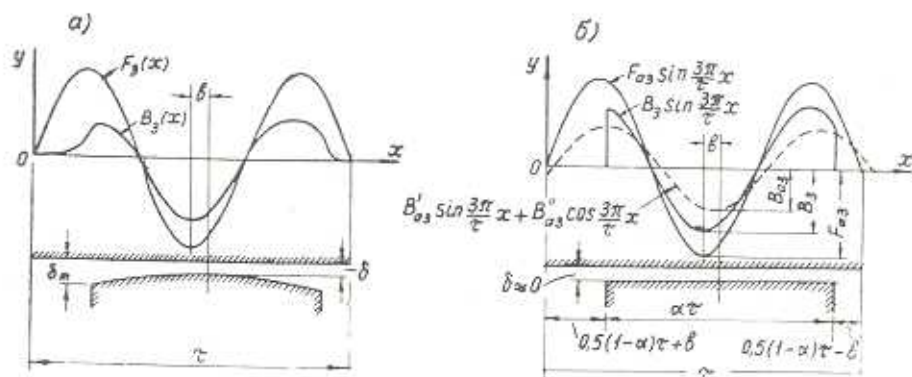


Рис. 1. Реакция ДО при реальном (а) и идеализированном (б) роторах.

При  $\mu_{ст} = \infty$  кривая индукции в воздушном зазоре  $B_3(x)$  в пределах полюсного наконечника воспроизводит форму кривой н.с.:

$$F_3(x) = F_{a3} \sin \frac{3\pi}{\tau} x; \quad B_3(x) = B_3 \sin \frac{3\pi}{\tau} x.$$

Амплитуда третьей гармоники поля

$$B_{a3} = \sqrt{(B'_{a3})^2 + (B''_{a3})^2},$$

где

$$B'_{a3} = \frac{2}{\tau} \int_0^{\tau} B_3(x) \sin \frac{3\pi}{\tau} x dx = \frac{2}{\tau} \int_{0,5(1-\alpha)\tau+b}^{0,5(1-\alpha)\tau+b} B_3 \sin^2 \frac{3\pi}{\tau} x dx;$$

$$B''_{a3} = \frac{2}{\tau} \int_0^{\tau} B_3(x) \cos \frac{3\pi}{\tau} x dx = \frac{2}{\tau} \int_{0,5(1-\alpha)\tau+b}^{0,5(1-\alpha)\tau+b} B_3 \sin \frac{3\pi}{\tau} x \cos \frac{3\pi}{\tau} x dx.$$

С учетом  $b = \tau\beta/\pi$  получим:

$$B'_{a3} = B_3 \left( \alpha + \frac{\sin 3\pi\alpha}{3\pi} \cos 6\beta \right); \quad B''_{a3} = B_3 \left( -\frac{\sin 3\pi\alpha}{3\pi} \sin 6\beta \right).$$

Окончательно амплитуда третьей гармоники поля будет:

$$B_{a3} = B_3 \sqrt{x^2 + 2x \frac{\sin 3\pi\alpha}{3\pi} \cos 6\beta + \frac{\sin^2 3\pi\alpha}{9\pi^2}}.$$

Коэффициент формы поля

$$k_3 = \frac{B_{a3}}{B_3} = \sqrt{x^2 + 2x \frac{\sin 3\pi x}{3\pi} \cos 6\beta + \frac{\sin^2 3\pi x}{9\pi^2}} \quad (2)$$

учитывает уменьшение третьей гармоники поля реакции ДО из-за явнорасположенности и сдвига осей н. с. ДО и полюса. Значения  $k_3$  экстремальны при  $\beta = 0$  и  $\beta = \pi/6$ , причем, период  $k_3(\beta)$  составляет  $\pi/6$ .

В явнополюсной машине основная обмотка имеет аналогичные свойства, но уже при утроенном значении углов  $\beta$ . Поскольку реакция основной обмотки допускает разложение по продольной и поперечной осям, то и реакция ДО может быть разложена на две составляющие. Но здесь, в отличие от основной обмотки, в соответствующих выражениях аргументы тригонометрических функций должны быть утроены.

По аналогии с теорией двух реакций разложим н. с.  $F_{a3}$  на две составляющие:

$$F_{ad3} = F_{a3} \cos 3\beta,$$

экстремум которой совпадает с осью полюса, и

$$F_{aq3} = F_{a3} \sin 3\beta,$$

экстремум которой сдвинут относительно оси полюса на 30 эл.град по периоду основного поля\*. Третьи гармоники соответствующих индукций при совмещении начала координаты  $x$  с центром полюса составляют:

$$\begin{aligned} B_{ad3} &= \frac{\mu_0}{\delta} F_{ad3} \left( x + \frac{\sin 3\pi x}{3\pi} \right) \cos \frac{3\pi}{\tau} x; \\ B_{aq3} &= \frac{\mu_0}{\delta} F_{aq3} \left( x - \frac{\sin 3\pi x}{3\pi} \right) \sin \frac{3\pi}{\tau} x. \end{aligned} \quad (3)$$

В (3) величины

$$k_{ad3} = k_3(0) = x + \frac{\sin 3\pi x}{3\pi} \quad \text{и} \quad k_{aq3} = k_3\left(\frac{\pi}{6}\right) = x - \frac{\sin 3\pi x}{3\pi}$$

являются коэффициентами поля реакции ДО по соответствующим осям. Зависимости  $k_{ad3}$  и  $k_{aq3}$  от  $x$  при идеализированном рассмотрении приведены на рис. 2.

В соответствии с вышеизложенным сопротивление реакции ДО для явнополюсной машины будет:

$$x_{a3n} = x_{a3} \sqrt{x^2 + 2x \frac{\sin 3\pi x}{3\pi} \cos 6\beta + \frac{\sin^2 3\pi x}{9\pi^2}},$$

а сопротивление реакции ДО по осям запишется в виде:

$$x_{ad3} = x_{a3} k_{ad3}; \quad x_{aq3} = x_{a3} k_{aq3}.$$

\* Здесь индекс  $q$  не относится к поперечной оси машины.

В отличие от основной обмотки, где  $x_{ad1} > x_{aq1}$ , в ДО  $x_{ad3} \cong x_{aq3}$ . Косвенным подтверждением разницы сопротивлений  $x_{ad3}$  и  $x_{aq3}$  является тот факт, что генератор 60 кВт ( $\alpha = 0,77$ ;  $\delta = 1,5$  мм;  $\delta_m/\delta = 1$ ;  $\tau = 275$  мм) с ДО, подключенной к трехфазному источнику частотой 150 гц, оказался в состоянии вращаться в режиме синхронного реактивного двигателя. При этом основная обмотка якоря и обмотка возбуждения были разомкнуты. ДО была выполнена с большим числом витков и сечением меди, чем это было необходимо для обеспечения самовозбуждения генератора.

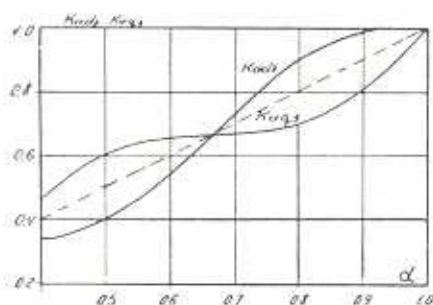


Рис. 2. Коэффициенты формы поля реакции ДО при идеализированном роторе.

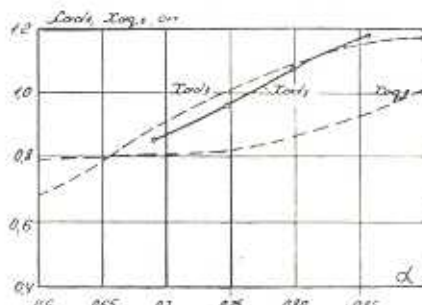


Рис. 3. Зависимость сопротивлений  $x_{ad3}$  и  $x_{aq3}$  от  $\alpha$  для генератора ЕСС82-4:  
— экспериментальная,  
--- расчетная.

В отличие от основной обмотки, где  $x_{ad1} = x_{aq1}$  при  $\alpha = 1$ , в ДО  $x_{ad3} = x_{aq3}$  при  $\alpha = 1/3$ ;  $2/3$ ;  $1$ .

В отличие от основной обмотки, где  $x_{ad1}$  и  $x_{aq1}$  обычно заметно отличаются, в ДО это различие между  $x_{ad3}$  и  $x_{aq3}$  гораздо меньше.

4. При рассмотрении общего случая  $\delta \neq 0$  для полей реакции ДО имеем:

$$B_{ad} = \frac{\mu_0}{\delta} \lambda_3 F_{ad3} \cos \frac{3\pi}{\tau} x; \quad (4)$$

$$B_{aq} = \frac{\mu_0}{\delta} \lambda_3 F_{aq3} \sin \frac{3\pi}{\tau} x,$$

где  $\lambda_3 = \frac{\delta}{\mu_0} \Lambda_3$ , а  $\Lambda_3$  является удельной магнитной проводимостью на единицу площади зазора.

В соответствии с [4]:

$$\lambda_3 = \lambda_0 + \sum_{k=1,2,3} \lambda_{3k} \cos \frac{2k\pi}{\tau} x. \quad (5)$$

Используя (5), выражения (4) запишутся в виде:

$$B_{ad} = \frac{\mu_0}{\delta} F_{ad3} \left\{ \lambda_0 \cos \frac{3\pi}{\tau} x + \frac{1}{2} \sum_{k=1, 2, 3, \dots} \lambda_{2k} \times \right. \\ \left. \times \left[ \cos \frac{(2k-3)\pi}{\tau} x + \cos \frac{(2k+3)\pi}{\tau} x \right] \right\}; \quad (6)$$

$$B_{aq} = \frac{\mu_0}{\delta} F_{aq3} \left\{ \lambda_0 \sin \frac{3\pi}{\tau} x - \frac{1}{2} \sum_{k=1, 2, 3, \dots} \lambda_{2k} \times \right. \\ \left. \times \left[ \sin \frac{(2k-3)\pi}{\tau} x - \sin \frac{(2k+3)\pi}{\tau} x \right] \right\}. \quad (7)$$

Выделяя из (6) и (7) третьи гармоники поля  $B_{ad3}$  и  $B_{aq3}$ , получим, что они обусловлены только проводимостями  $\lambda_0$  и  $\lambda_6$ :

$$B_{ad3} = \frac{\mu_0}{\delta} F_{ad3} \left( \lambda_0 + \frac{1}{2} \lambda_6 \right) \cos \frac{3\pi}{\tau} x;$$

$$B_{aq3} = \frac{\mu_0}{\delta} F_{aq3} \left( \lambda_0 - \frac{1}{2} \lambda_6 \right) \sin \frac{3\pi}{\tau} x.$$

Здесь

$$k_{ad3} = \lambda_0 + 0,5 \lambda_6 \quad \text{и} \quad k_{aq3} = \lambda_0 - 0,5 \lambda_6$$

представляют собой коэффициенты формы поля реакции ДО для реального воздушного зазора ( $\delta \neq 0$ ). Значения  $\lambda_0$  и  $\lambda_6$  могут быть определены по кривым, приведенным в [4, 5] для всех практически встречающихся значений  $\alpha$ ,  $\delta_m/\delta$  и  $z_1/\tau$ . Рассмотрение значений  $\lambda_0$  и  $\lambda_6$  по [5] показывает, что  $0,5 \lambda_6/\lambda_0$  характеризующее различие между  $x_{ad3}$ ,  $x_{aq3}$  и их полусуммой, составляет всего  $15\%$ , в то время как соответствующее отношение  $0,5 \lambda_6/\lambda_0$  для основной обмотки несравненно больше.

5. При определении сопротивлений реакции ДО с учетом насыщения стали в (1) необходимо ввести коэффициент  $k_{p3}$ , учитывающий насыщение по пути потока третьей гармоники:

$$x_{a3} = \frac{4m}{3\pi} f_1 \frac{\mu_0 \tau l}{\delta k_z k_{p3}} \frac{(w_1 k_{o3})^2}{p_1}.$$

С достаточной для практических целей точностью коэффициент  $k_{p3}$  может быть определен по выражению:

$$k_{p3} = \frac{F_z + F_z + F_a + F_p}{F_i},$$

где  $F_z$ ,  $F_z$ ,  $F_a$  и  $F_p$  — соответственно п. с. воздушного зазора, зубцов якоря, ярма якоря и зубцов ротора (или полюсного наконечника при явнополюсной машине).

Приемлемость и достаточная практическая точность предлагаемо-

го способа расчета параметров ДО с учетом насыщения подтверждается практическим совпадением экспериментальных и расчетных данных по  $x_{ad}$  (рис. 3). Сопоставление проводилось на макете, выполненном из генератора ЕСС82—4 30 кВт, со следующей геометрией активных частей:  $\alpha=0,692; 0,748; 0,8; 0,857$ ;  $\tau=228$  мм;  $2k_3=1,07$  мм;  $\delta_m/\delta=1$ .

Поступило 20.II.1971.

Ս. Գ. ՀԱՄԱՄՉՅԱՆ, Վ. Ս. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ

ԴԱՇՏԻ ԵՐՐՈՐԳ ՀԱՐՄԱՆԻԿԱՅԻՑ ՍԵՎՈՂ ԳՐԳՌՄԱՆ ՍԻՍՏԵՄՈՎ  
ՍԻՆԵՐՈՆ ՄԵՔԵՆԱՅԻ ԼՐԱՑՈՒՑԻՉ ՓԱԹՈՒՅԹԻ ԻՆԴՈՒԿՏԻՎ ԳԻՄԱԳՐՈՒԹՅՈՒՆԸ

### Ա մ փ ա փ ու մ

Հոդվածը նվիրված է դաշտի երրորդ հարմոնիկայից սեվոլդ զրգոման սիստեմով սինխրոն մեքենայի լրացուցիչ փաթույթի ինդուկտիվ դիմադրության որոշմանը: Գիտված են մեքենայի բացահայտ և ոչ-բացահայտ բևեռներով առարի տեսակները: Արտածված են բանաձևեր, որոնց միջոցով կարելի է որոշել լրացուցիչ փաթույթի ինդուկտիվ դիմադրությունը հազեցման հաշվառքով: Կատարված է հաշվարկային և մակեթի վրա ստացված փորձարկման արդյունքների համադրում:

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Krabbe U. Self-excited synchronous generator. Патент США, ка. 322—28, № 3.025.450, заявл. 10. 02. 59, опыл. 13.03.62.
2. Platthaus H. L. Erregung von Synchronmaschinen durch die dritte Harmonische des Luftspaltfeldes. „ETZ—A“, 1963, Bd. 84, N. 23.
3. Антонов М. В., Радян В. И., Трошин В. Н. Использование третьей гармоники поля для возбуждения синхронных генераторов. „Известия вузов. Электротехника“, № 3, 1965.
4. Вольдек А. И. Исследование магнитного поля в воздушном зазоре явнополюсных синхронных машин методом гармонических проводимостей. „Электричество“, № 7, 1966.
5. Вольдек А. И., Лахтметс Р. А. Магнитная проводимость воздушного зазора и расчет магнитного поля явнополюсных синхронных машин. „Известия вузов. Электротехника“, № 6, 1968.