

УДК 621.313

А.Ш.ФАРАН

Харьковская государственная академия городского хозяйства

### АНАЛИЗ ДОБАВОЧНЫХ ПОТЕРЬ В ВЕНТИЛЬНОМ ДВИГАТЕЛЕ

Систематизированы добавочные потери для синхронных машин, питающихся от тиристорного преобразователя в схеме ВД. Анализируются гармонические составляющие намагничивающих сил многофазных обмоток якоря ВД, приведена методика расчета добавочных потерь в них. На основании анализа расчета получен вывод о том, что добавочные потери и пульсации электромагнитного момента зависят не только от конструктивных и схемных решений ВД, но и от режимов его работы.

В теории электрических машин к добавочным потерям относят потери, связанные с наличием высших гармонических в кривых намагничивающих сил (н.с.) статора и ротора, потоков рассеяния обмоток, пульсаций магнитного поля в воздушном зазоре электрических машин.

В вентильных двигателях (ВД) добавочные потери составляют 20-30% от основных потерь. Они приводят к местным перегревам, уменьшению показателей надежности системы и нарушению работоспособности электропривода [1]. Магнитные поля от токов высших гармоник, взаимодействуя с токами роторных контуров, вызывают появление пульсационных сил и моментов, снижающих энергетические показатели двигателей и их виброакустические характеристики [2].

Для расчета индукции магнитного поля в воздушном зазоре н.с. трех- и шестифазных обмоток якоря ВД представляем в следующем виде:

$$f_{a,b,c}(\alpha, t) = \sum_{\mu, \nu} F_{\mu\nu} \cos\left[\mu\left(\omega t - \frac{\pi}{12}\right) - \nu\left(\alpha - \frac{\pi}{12}\right)\right] \cos\left[\frac{\pi}{12}(\mu - \nu)\right] + \sum_{\mu^*, \nu^*} F_{\mu^*\nu^*} \cos\left[\mu^*\left(\omega t - \frac{\pi}{12}\right) - \nu^*\left(\alpha - \frac{\pi}{12}\right)\right] \cos\left[\frac{\pi}{12}(\mu^* + \nu^*)\right]. \quad (1)$$

В формуле (1) гармоники, имеющие  $\mu, \nu = 6K + 1$ , где  $K=0, 1, 2, \dots$  — это прямо бегущие в пространстве волны н.с., а гармоники с  $\mu^*, \nu^* = 6K - 1$ , где  $K=1, 2, 3, \dots$  — обратно бегущие волны, причем в результате наложения фазных н.с. для шестифазных обмоток остаются лишь те гармоники, которые выделены прямыми скобками в таблице. В общем случае их амплитуды равны

$$F_{\sum \mu \nu} = \frac{m}{\pi} \cdot \frac{I_{m\mu} WK_{w\nu}}{p\nu} \quad (2)$$

Для определения добавочных потерь рассчитаем нормальную составляющую индукции  $B_{\nu}$  отдельных гармоник, пренебрегая падением н.с. вдоль стальных участков магнитопровода и учитывая насыщение введением в соответствующие формулы коэффициента  $K_{\mu}$ . Амплитуда индукции  $\nu$ -й гармоники на поверхности ротора

$$B_{\nu} = \frac{\mu_0 F_{m\mu\nu}}{\delta K_{\mu}} K_{\nu} K_{S1\nu} K_{r\nu} \quad (3)$$

Гармонический состав н.с. трех- и шестифазных обмоток

№μ	№μβ	Гармонический состав н.с. трех- и шестифазных обмоток								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	[0]	-6	+6	[-12]	+12	-18	+18	[-24]	+24
2	5	-6	[0]	[-12]	+6	-18	[+12]	[-24]	+18	-30
3	7	+6	[-12]	[0]	-18	+6	[-24]	[+12]	-30	+18
4	11	[-12]	+6	-18	[0]	[-24]	+6	-30	[+12]	[-36]
5	13	[+12]	-18	+6	[-24]	[0]	-30	+6	[-36]	[+12]
6	17	-18	[+12]	[-24]	+6	-30	[0]	[-36]	+6	-42
7	19	+18	[-24]	[+12]	-30	+6	[-36]	[0]	-42	+6
8	23	[-24]	+18	-30	[+12]	[-36]	+6	-42	[0]	[-48]
9	25	[+24]	-30	+18	[-36]	[+12]	-42	+6	[-48]	[0]

Коэффициент затухания поля  $K_{\nu}$  с учетом кривизны поверхности ротора можно рассчитать по формуле

$$K_{\nu} = \frac{2 \frac{\nu\pi \delta}{\rho\tau} \left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right)^{\nu+1}}{\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right)^{2\nu} - 1} \quad (4)$$

где  $\tau = \frac{\tau_1 + \tau_2}{2}$ ,  $\tau_1, \tau_2$  — полюсные деления, вычисленные по диаметру расточки статора и ротора.

Множитель  $K_{S1\nu}$  отражает влияние открытия паза и может быть найден по формуле

$$K_{S1\nu} = \frac{\sin\left(\nu \frac{b_{S1} \rho\pi}{t_1 Z_1}\right)}{\nu \frac{b_{S1} \rho\pi}{t_1 Z_1}} \quad (5)$$

где  $b_{S1}$  – ширина открытия паза статора, имеющего  $Z_1$  зубцов;  $t_1$  – зубцовый шаг по расточке статора.

Вихревые токи в сердечнике оказывают ослабляющее воздействие на внешнее поле. Для конструкций с шихтованным магнитопроводом допустимо принять  $K_{rv} = 1$ . Для массивного сердечника

$$K_{rv} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{\mu_0 \pi}{v \cdot \Delta \cdot \mu_c \cdot \pi \cdot th \frac{\pi \delta v}{\tau}}\right)^2 + \left(\frac{\mu_0 \pi}{v \cdot \Delta \cdot \mu_c \cdot \pi \cdot th \frac{\pi \delta v}{\tau}}\right)^2}},$$

где  $\Delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega_v \mu_c}}$  – глубина проникновения поля в массив;  $\mu_c \rho$  –

магнитная проницаемость и удельное сопротивление материала.

Добавочные потери в обмотке статора ( $Q_m$ ) обусловлены:

- вытеснением тока в проводниках якоря;
- наличием циркуляционных токов из-за различного расположения по высоте паза параллельно соединенных проводников;
- высшими гармониками рабочего тока;
- вихревыми и контурными токами от внешнего поля.

Величину  $Q_m$  находим через коэффициенты увеличения сопротивления обмотки  $K_{a\mu}$ , соответствующие каждой временной  $\mu$ -й гармонике тока, следующим образом:

$$Q_m = \frac{m}{2} r_1 \sum_{\mu=1,5,7} I_{m\mu}^2 K_{a\mu} - \frac{m}{2} r_1 I_{m1}^2. \quad (7)$$

Добавочные потери в демпферных контурах и обмотке возбуждения в основном обусловлены токами, индуктированными пространственными ( $v$ ) гармониками н.с. статорной обмотки, перемещающимися относительно ротора. При определении токов в демпферных стержнях усредним переменный вдоль полюсного деления  $\tau$  воздушный зазор, используя коэффициент Картера  $K_\delta$ . Пренебрегая относительно малым активным сопротивлением для любого  $n$ -го контура, имеем:

$$I_{\mu\gamma n} = \frac{\tau}{\pi \delta K_\delta v K_n} F \sum \mu v \sin \left( \frac{v\pi t_2}{2\tau} \right), \quad (8)$$

$$\text{где } K_n = \frac{l_2}{\delta K_\delta} + 2K \left[ \frac{1}{\pi} \left( 1,625 + \ln \frac{1}{\Psi} \right) K\nu_x + \frac{h_s}{b_s} + \frac{5}{5 \frac{b_s}{\delta K_\delta} + 4} \right];$$

$$K = \sqrt{\frac{3 - 4 \cos \frac{\nu \pi t}{\tau} + \cos \frac{2\nu \pi t}{\tau}}{1 - \cos \frac{\nu \pi t}{\tau}}}; \quad t_2 - \text{ шаг по пазам демпферной об-}$$

мотки, у которых ширина открытия  $b_s$  и высота шлица  $h_s$ ;  $K\nu_x$  - коэффициент, учитывающий уменьшение индуктивности рассеяния стержня за счет вытеснения тока;  $\Psi = 2 \arcsin \frac{b_s}{d_s}$ , если  $d_s$  - диаметр стержня.

При известном токе  $I_{m\nu}$  потери в демпферной обмотке от  $\nu$ -й пространственной волны н.с. статора определяем по выражению

$$Q_{gm\nu} = 2ph_g K^2 I_{m\nu}^2 K_{2\nu}, \quad (9)$$

где  $2ph_g$  - полное число демпферных стержней на  $2p$  полюса.

При расчете потерь  $Q_{f\nu}$  по известному значению  $I_{m\nu}$  и схеме замещения следует определить максимальный ток возбуждения  $I_{f\nu}$ , индуцированный  $\nu$ -й гармоникой поля. Пренебрегая при этом активными сопротивлениями контуров, для шестифазных машин получим

$$I_{f\nu} = 2I_{m\nu} \frac{x''_{adv}}{x_{cf}}, \quad (10)$$

$$\text{где } \frac{1}{x''_{adv}} = \frac{1}{x_{ad}} \left( \frac{\nu}{K_{w\nu}} \right)^2 + \frac{1}{X_{sf}} + \frac{1}{X_{xed}}$$

Добавочные потери в обмотке возбуждения будут равны:

$$Q_{f\nu} = \frac{1}{2} I_{f\nu}^2 r_f K_{f\nu}, \quad (11)$$

где  $K_{f\nu}$  - коэффициент, учитывающий вытеснение тока в проводниках ротора, определяется аналогично  $K_{2\nu}$ .

Поверхностные потери на роторе  $Q_{n2}$  или статоре  $Q_{n1}$  имеют место вследствие перемещения высших гармоник поля и индуктирования ими токов в относительно тонких слоях рассматриваемых сред. Без учета потерь на гистерезис, полагая, что ротор выполнен шихтованным, названные потери определим по выражениям вида

$$Q_{n2} = \sum_{\nu} Q_{n2\nu}; \quad Q_{n1} = \sum_{\nu} Q_{n1\nu}, \quad (12)$$

$$Q_{n2} = K_{обр2} \frac{\Delta_2 \sqrt{\pi\gamma}}{2\sqrt{\mu_2}} \frac{\tau}{\nu_2} f_{\nu_1}^{1,5} B_{\nu_1}^2 K_{Q2} \times \\ \times (z_2 b_{z2} l_{t2} K_{Fl2}), \quad (13)$$

$$Q_{n1\nu} = K_{обр1} \frac{\Delta_1 \sqrt{\pi\gamma}}{2\sqrt{\mu_1}} \frac{\tau}{\nu_1} f_{\nu_1}^{1,5} B_{\nu_1}^2 K_{a1} \times \\ \times (z_1 b_{z1} l_{t1} K_{Fl1})_2, \quad (14)$$

где  $K_{обр1,2}$  – коэффициенты, зависящие от качества обработки поверхности статора (1) или ротора (2);  $\Delta_{1,2}$  – толщина листа шихтованных магнитопроводов;  $K_{1,2}$  – коэффициент увеличения поверхностных потерь из-за наличия пазов на статоре (1) или роторе (2);  $Z_{1,2}$  – число пазов, имеющих шаг по расточке, равный  $t_{1,2}$ , и ширину зубцов  $b_{z1,2}$ ;  $L_{1,2}$  – активные длины сердечников;  $K_{Fl1,2}$  – коэффициент заполнения сердечников сталью.

Значения  $K_{a1,2}$  удобнее вычислять, полагая

$$K_{a1,2} = K'_{a1,2} \cdot K_{n1,2}$$

$$K'_{a1,2} = f\left(\frac{2b_{z1,2}}{t_{1,2}}\right); \quad K_{n1,2} = f\left(\frac{h_y}{b_{z1,2}}; \frac{b_{zcp1,2}}{b_{z1,2}}\right),$$

где  $b_{zcp1,2}$  – ширина зубца в среднем сечении;  $h_y$  – высота шлица полузакрытого паза.

Для прямоугольного паза можно принять  $K_{n1,2} = 0,85$ . Функцию

$K'_{n1,2}$  в диапазоне  $1 < \frac{2b_{z1,2}}{t_{1,2}} < 10$  можно представить следующей ана-

литической зависимостью:

$$K'_{a1,2} = 1,5 - (0,1 + 0,7e^{-0,6b_{z1,2}/t_{1,2}}) \sin \pi \left( \frac{2b_{z1,2}}{t_{1,2}} - 0,5 \right)$$

Пульсационные потери в зубцах ( $Q_{z1}, Q_{z2}$ ) обусловлены изменением во времени потока высших пространственных гармоник поля, проникающего в зубцовую зону. Необходимо отметить, что собственная геометрия пазового слоя не влияет на продольное колебание зубцового потока, созданного н.с. статора или ротора [2].

Для определения потерь найдем поток зубца ротора (статора) от высших гармоник н.с. статора (ротора). Амплитудное его значение рассчитываем следующим образом:

$$\Phi_{2,1\nu} = \ell_t \int_{\frac{t'_{2,1}}{2}}^{\frac{t'_{2,1}}{2}} B_{1,2\nu} \cos \nu \frac{\pi}{2} x dx, \quad (15)$$

где  $t'_{2,1}$  – приведенное зубцовое деление ротора (2) или статора, приблизительно равное  $t'_{2,1} = t_{2,1} / K_{z2,1}$ ;  $\ell_t$  – активная длина машины.

Разделив  $\Phi_{2,1\nu}$  на среднее сечение соответствующего зубца, получим амплитуду пульсации индукции в зубцах:

$$B_{2,1\nu} = \frac{2}{\pi} \frac{l_t}{l_{Fe}} \frac{\tau}{\nu B_{Z2,1}} \sin \nu_{1,2} \frac{\pi t'_{2,1}}{2}. \quad (16)$$

Частота пульсации потока  $\Phi_{1\nu}$  относительно статора равна  $f_{1\nu} = \nu f_1$ , так как любая из гармоник  $B_{2\nu}$  поля возбуждения перемещается в пространстве вместе с ротором. Для определения  $f_{2\nu} = \nu f$  удобно пользоваться приведенной выше таблицей. Тогда потери от вихревых токов находим согласно выражениям

$$Q_{Z1,2} = \sum_{\nu} Q_{Z1,2\nu}, \quad (17)$$

$$Q_{Z1,2\nu} = K_{обр} \frac{\pi^2 d^2}{6\rho} f_{1,2\nu}^2 B_{1,2\nu}^2 Z_{1,2} h_{Z1,2} l_{Fe} b_{Z1,2} K_l, \quad (18)$$

где  $K_l$  – коэффициент, учитывающий неравномерность поля по толщине "d" листа стали шихтованного магнитопровода за счет вихревых токов. Аналогичным образом можно вычислить добавочные потери в сердечниках статора и роторе за счет пульсаций магнитного потока.

Таким образом, нами выполнена систематизация добавочных потерь наиболее существенных и специфичных для синхронной машины, питающейся от тиристорного преобразователя в схеме ВД. Для более корректного учета добавочных потерь проведен анализ гармонических составляющих намагничивающих сил многофазных обмоток якоря ВД. С учетом анализа гармонических составляющих н.с. приведены расчетные формулы для добавочных потерь.

Необходимо отметить, что добавочные потери и пульсации электромагнитного момента зависят не только от конструктивных и схемных решений ВД, но и от режимов его работы.

1. Зиннер Л.Я., Скороспешкин А.И. Вентильные двигатели постоянного и переменного тока. – М.: Энергоиздат, 1981. – 136 с.

2. Волчуков Н.П., Глебова М.П. Особенности работы ВД в статистических режимах // Вестник Харьковского гос. политехн. ун-та. Вып.13. – Харьков: Нац. техн. ун-т "ХПИ", 2000. – С. 97-98.

Получено 26.06.2002

УДК 621.311.25

Г.А.ЛЕЩИНСКИЙ, канд. техн. наук

Украинская инженерно-педагогическая академия, г.Харьков

О.А.ПОДУФАЛАЯ

Национальный университет им. В.Н.Каразина, г.Харьков

## **ИЗМЕРЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ДАВЛЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО ДВУХФАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ**

Описывается способ выделения переменной составляющей давления двухфазного потока, результаты которого используются в вибрационных расчетах трубопроводных систем электростанций.

Для получения граничных условий и проверки решения нестационарной задачи на дренажном трубопроводе были измерены давления в пяти сечениях по длине (рис.1). Датчики давления устанавливали на отборных трубках. Принятые уклоны последних препятствовали попаданию в них паровой фазы.

В первых, методических, опытах оценивали частоту и амплитуду переменной составляющей давления, для чего были выбраны серийные проволочные резистивные мембранные преобразователи типа ТДДМ, включаемые в схему многоканального тензометрического усилителя постоянного тока "Топаз" с выходом на светолучевой осциллограф Н-117. Установка преобразователей и проверка на резонансную частоту акустических колебаний присоединенной системы рассмотре-