

## ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Бялобржеский А.В.

Кременчугский государственный политехнический университет

Украина, 39601, Кременчуг, ул. Первомайская, 20, КГПУ, кафедра "Систем автоматического управления и электропривода"

*Статичні характеристики генераторів постійного струму низько інформативні і не розкривають особливостей поведінки електричної машини в динамічних режимах. У статті розглянуті особливості характеристик генератора постійного струму одержуваних у динамічних режимах. Приведено спосіб еквівалентності кривій намагнічування індуктора, визначення реальних постійних часу системи порушення з урахуванням впливу вихрових струмів електротехнічної сталі.*

*Статические характеристики генераторов постоянного тока низко информативны и не раскрывают особенностей поведения электрической машины в динамических режимах. В статье рассмотрены особенности характеристик генератора постоянного тока получаемых в динамических режимах. Приведен способ эквивалентизации кривой намагничивания индуктора, определение реальных постоянных времени системы возбуждения с учетом влияния вихревых токов электротехнической стали.*

При испытании генераторов постоянного тока по существующим требованиям необходимо снятие пяти характеристик: холостого хода, короткого замыкания, внешней, нагрузочной и регулировочной. В работах [3,4] рассмотренные процедуры получения характеристик генераторов постоянного тока в динамических режимах, при этом отмечено, что такие характеристики являются более информативными, так как отражают обращения машины в динамическом режиме. Статические характеристики получают с помощью алгоритма усреднение. Как следствие, обнаруживается задача определения реальных параметров электромагнитной системы индуктора с учетом особенностей протекания физических процессов в магнитной системе. Методика определения электромагнитных параметров индуктора в динамических режимах отсутствующая.

Цель работы - определение параметров электромагнитной системы машины постоянного тока путем анализа мгновенных значений напряжения, тока возбуждения, э.д.с. обращения, скорости обращения и тока якоря.

Динамические характеристики холостого хода и короткого замыкания генератора получают в соответствии с методикой изложенной в работе [6]. Результаты реализации динамических режимов холостого хода для электрических машин постоянного тока ПЗ1М ( $P_n=1,4$  кВт;  $U_n=220$  В;  $n_n=1500$  об/мин;  $\eta=91\%$ ;  $I_a=8,7$  А;  $J=0,021$  кг·м<sup>2</sup>) и ПБСТ 5394 ( $P_n=9$  кВт;  $U_n=220$  В;  $n_n=3000$  об/мин;  $\eta=91\%$ ;  $I_a=39,4$  А;  $\eta_n=91\%$ ) представлены на рисунке 1.

В электроприводе, для упрощения описания процессов в системах с электромагнитными элементами, как правило, пренебрегают нелинейностью кривой намагничивания и явлением гистерезиса, и, следовательно, всеми связанными с этим процессами. Это оправдано для систем электропривода, в которых регулирование осуществляется посредством изменения напряжения якоря, однако при регулировании напряжения возбуждения в широком диапазоне, в частности в приводе с генераторами постоянного тока, указанные выше упрощения неоправданны. В работах [1,2], показано, что вид динамической характе-

ристики намагничивания стали, обуславливается несколькими явлениями: наличием вихревых токов, магнитной вязкостью и динамикой перемагничивания материала.

Рассмотрим в общем виде уравнения равновесия электромагнитной системы цепи возбуждения

$$u_g(t) = \frac{d\psi_g(t)}{dt} + i_g(t) \cdot R_g, \quad (1)$$

$$0 = \frac{d\psi_k(t)}{dt} + i_k(t) \cdot R_k, \quad (2)$$

где  $u_g(t)$  - напряжение возбуждения;  $\psi_g(t) = \Phi(t) \cdot w_g$  - потокосцепление обмотки возбуждения;  $\psi_k(t) = \Phi(t) \cdot w_k$  - потокосцепление эквивалентной обмотки вихревых токов;  $i_g(t)$ ,  $i_k(t)$  - токи возбуждения и эквивалентного контура вихревых токов;  $R_g$ ,  $R_k$  - активное сопротивление цепи возбуждения и эквивалентного контура вихревых токов.

Поток возбуждения при нулевом значении тока якоря определяется действием токов возбуждения и эквивалентного контура вихревых токов с учетом геометрических и физических свойств электромагнитной системы, в соответствии с выражением:

$$\Phi(t) = S_{\text{экв}} \cdot \mu_a(H) \cdot \frac{(i_g(t) \cdot w_g - i_k(t) \cdot w_k)}{l_{\text{экв}}}, \quad (3)$$

где  $S_{\text{экв}}$ ,  $l_{\text{экв}}$  - эквивалентные геометрические параметры электромагнитной системы,  $\mu_a(H)$  - абсолютная магнитная проницаемость среды.

Поток возбуждения в ходе снятия характеристик изменяется, в результате действия напряжения возбуждения, реакции контуров вихревых токов с учетом электромагнитных свойств стали индуктора. Тогда состояние электромагнитной системы индуктора можно представить системой уравнений, полагая зависимость абсолютной магнитной проницаемости, временной

$$u_g(t) = \frac{d\Phi(t)}{dt} \cdot k_g + i_g(t) \cdot R_g, \quad (5)$$

$$0 = \frac{d\Phi(t)}{dt} \cdot k_k + i_k(t) \cdot R_k, \quad (6)$$

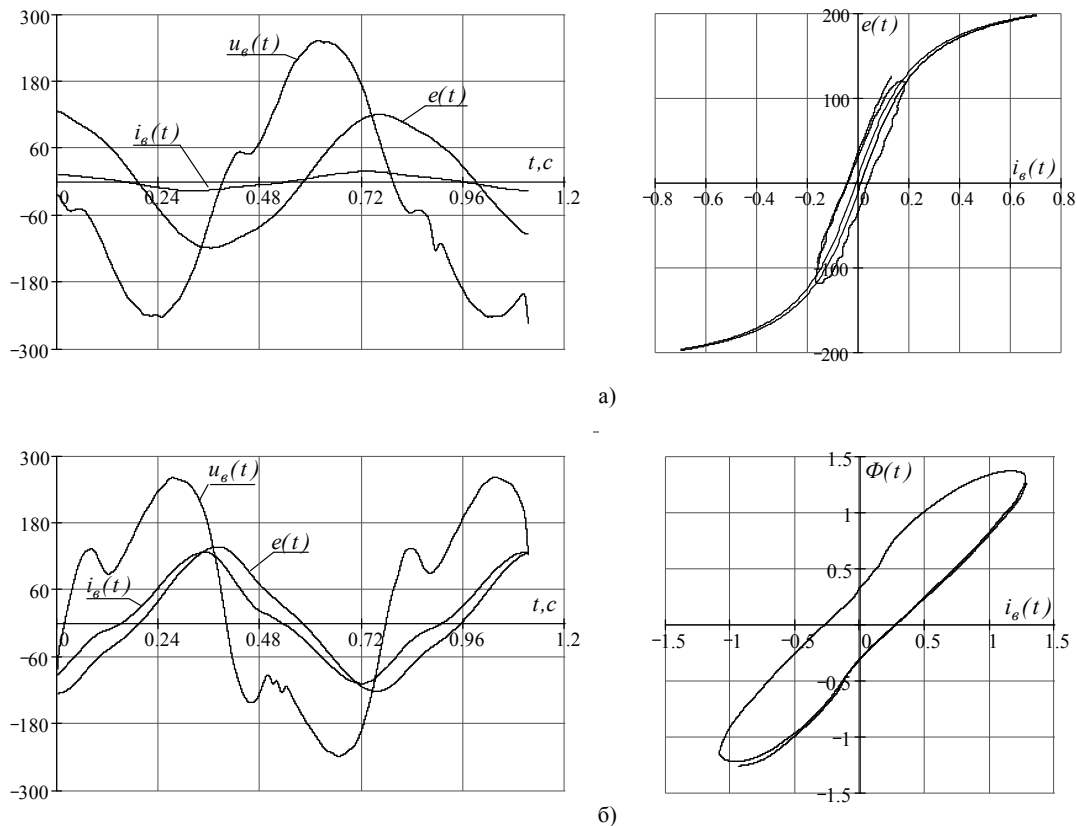


Рис. 1. Экспериментальные характеристики генератора постоянного тока в режиме холостого хода при гармоническом задании напряжения управления возбудителем (а - машина ПЗ1М; б - машина ПБСТ 5394)

$$\Phi(t) = k_{\phi} \cdot \mu_a(t) \cdot (i_g(t) \cdot k_g - i_k(t) \cdot k_k), \quad (7)$$

где  $k_g = w_g$ ;  $k_k = w_k$ ;  $k_{\phi} = \frac{S_{\text{экв}}}{I_{\text{экв}}}$ .

При работе электрической машины контролировать поток возбуждения непосредственно затруднительно. Его значение, в некотором масштабе, в любой момент времени можно определить из выражения

$$k\Phi(t) = \frac{e(t)}{\omega(t)},$$

где  $e(t)$  - э.д.с. генератора в режиме холостого хода;  $\omega(t)$  - скорость вращения якоря.

Таким образом, доступными для анализа становятся зависимости напряжения возбуждения, тока возбуждения, скорости вращения, э.д.с. генератора и коэффициента потока. Неизвестными параметрами, которые отражают характеристики электромагнитной системы и подлежат определению, являются:  $k_g$ ,  $k_k$ ,  $R_g$ ,  $R_k$ ,  $k_{\phi}$  и  $\mu_a(t)$ . Параметры  $R_g$  и  $k_g$ , с учетом того, что контролируется напряжение возбуждения, ток возбуждения и поток, можно определить из выражения (5) применяя метод гармонического анализа [5]. Для этого, используя разложение в ряд Фурье, представим параметры, которые измеряются, в таком виде:

$$u_g(t) = u_0 + \sum_{n=1}^{\infty} u_{cn} \cdot \cos(\Omega_j t) + \sum_{n=1}^{\infty} u_{sn} \cdot \sin(\Omega_j t);$$

$$i_g(t) = i_0 + \sum_{j=1}^{\infty} i_{cj} \cdot \cos(\Omega_j t) + \sum_{j=1}^{\infty} i_{sj} \cdot \sin(\Omega_j t);$$

$$\Phi(t) = \Phi_0 + \sum_{m=1}^{\infty} \Phi_{cm} \cdot \cos(\Omega_m t) + \sum_{m=1}^{\infty} \Phi_{sm} \cdot \sin(\Omega_m t),$$

где  $u_0$ ,  $i_0$ ,  $\Phi_0$  - постоянные составляющие напряжения, тока и потока возбуждения;  $i_{cj}$ ,  $\Phi_{cm}$ ,  $u_{cn}$  - амплитуды косинусных квадратурных составляющих параметров;  $i_{sj}$ ,  $\Phi_{sm}$ ,  $u_{sn}$  - амплитуды синусных квадратурных составляющих.

Приравнявая в соответствии с выражением (5) синусные и косинусные, соответственно, квадратурные составляющие первой гармоники, получим систему:

$$\begin{cases} u_{c1} = \Phi_{s1} \cdot \Omega_1 \cdot k_g + i_{c1} \cdot R_g; \\ u_{s1} = -\Phi_{c1} \cdot \Omega_1 \cdot k_g + i_{s1} \cdot R_g. \end{cases} \quad (8)$$

В результате решения данной системы уравнений определяются параметры  $R_g$  и  $k_g$ .

Определение других величин затруднено тем, что ток эквивалентного контура вихревых токов прямым образом не может быть измерен. По этому следует исключить его из рассмотрения, выразив в соответствие с выражением (6) так

$$i_k(t) = -\frac{d\Phi(t)}{dt} \cdot \frac{k_k}{R_k} \quad (9)$$

и, подставив в выражение (7), получим

$$\Phi(t) = k_{\phi} \cdot \mu_a(t) \cdot i_g(t) \cdot k_g + k_{\phi} \cdot \mu_a(t) \cdot \frac{d\Phi(t)}{dt} \cdot \frac{k_k^2}{R_k}$$

Введем замену переменной  $k_{\phi} \cdot \mu_a(t) = \mu_a^k(t)$ , тогда выражение примет вид

$$\Phi(t) = \mu_a^k(t) \cdot i_\theta(t) \cdot k_\theta + \mu_a^k(t) \cdot \frac{d\Phi(t)}{dt} \cdot \frac{k_k^2}{R_k} \quad (10)$$

Параметр  $k_\theta$  определяется из системы уравнений (8). Для этого приведем выражение (10) к виду:

$$i_\theta(t) \cdot k_\theta + \frac{d\Phi(t)}{dt} \cdot \frac{k_k^2}{R_k} - \frac{\Phi(t)}{\mu_a^k(t)} = 0 \quad (11)$$

Функции  $\Phi(t)$  и  $i_\theta(t)$  являются периодически и представляются в виде ряда Фурье, подобным образом представим функцию  $F(t) = \frac{1}{\mu_a^k(t)}$ :

$$\frac{1}{\mu_a^k(t)} = \mu_0^* + \sum_i \mu_{ci}^* \cdot \cos(\Omega_i t) + \sum_i \mu_{si}^* \cdot \sin(\Omega_i t)$$

Тогда выражение (11) примет вид

$$k_\theta \cdot i_\theta + k_\theta \cdot \sum_j i_{cj} \cdot \cos(\Omega_j t) + k_\theta \cdot \sum_j i_{sj} \cdot \sin(\Omega_j t) - \frac{k_k^2}{R_k} \cdot \sum_m \Phi_{cm} \cdot \sin(\Omega_m t) + \frac{k_k^2}{R_k} \cdot \sum_m \Phi_{sm} \cdot \cos(\Omega_m t) - \left[ \left( \mu_0^* + \sum_i \mu_{ci}^* \cdot \cos(\Omega_i t) + \sum_i \mu_{si}^* \cdot \sin(\Omega_i t) \right) \times \left( \Phi_0 + \sum_m \Phi_{cm} \cdot \Omega_m \cdot \cos(\Omega_m t) + \sum_m \Phi_{sm} \cdot \Omega_m \cdot \sin(\Omega_m t) \right) \right] = 0 \quad (12)$$

Результаты разложения в ряд Фурье временных зависимостей тока и потока возбуждения (рис. 1.) приведены в таблице 1. В общем спектре гармонических составляющих тока и потока возбуждения, как видно из табл. 1 весомыми являются первая, третья и пятая гармоники.

В виду того, что ток возбуждения и поток содержат нечетные гармоники, в соответствии с выражением (12), произведение рядов  $\frac{1}{\mu_a^k(t)}$  и  $\Phi(t)$

должно также содержать нечетные гармоники, иначе не соблюдается баланс квадратурных составляющих в левой и правой части выражения (12).

Таблица 1

$\Omega_j, c^{-1}$	$\Phi_{cm}, B \cdot c$	$\Phi_{sm}, B \cdot c$	$i_{cj}, A$	$i_{sj}, A$
0	0	0	0	0
1.319	0.6769	-0.2171	0.9968	0.0556
2.639	-0.0078	-0.01495	-0.0072	-0.0459
3.958	-0.0663	0.03363	-0.1645	-0.0246
5.277	-0.0011	-0.008727	0.0098	0.0028
6.596	-0.0114	-0.01215	0.0041	-0.0281

Тогда, учитывая характер ряда  $\Phi(t)$ , ряд  $\frac{1}{\mu_a^k(t)}$

будет содержать только четные гармоники. Раскрывая скобки в выражении (12), и приравнявая синусные и косинусные гармонические составляющие, одного порядка получим, например, для косинусной квадратурной составляющей первой гармоники:

$$\Phi_{s1} \cdot \Omega_1 \cdot \frac{k_k^2}{R_k} - \Phi_{c1} \cdot \mu_0^* - \frac{\Phi_{c1} + \Phi_{c3}}{2} \cdot \mu_{c2}^* - \frac{\Phi_{s1} + \Phi_{s3}}{2} \cdot \mu_{s2}^* - \frac{\Phi_{s3} + \Phi_{s5}}{2} \cdot \mu_{c4}^* - \frac{\Phi_{s3} + \Phi_{s5}}{2} \cdot \mu_{s4}^* = -k_\theta \cdot i_{c1}$$

Проводя подобные преобразования для ортого-

нальных составляющих 3 и 5-ой гармоник, получим систему уравнений, которую можно записать в матричной форме:  $A \times B = C$ , где

$$A = \begin{pmatrix} \Phi_{s1} \cdot \Omega_1, -\Phi_{c1}, -\frac{(\Phi_{c1} + \Phi_{c3})}{2}, -\frac{(\Phi_{s1} + \Phi_{s3})}{2}, -\frac{(\Phi_{c3} + \Phi_{c5})}{2}, -\frac{(\Phi_{s3} + \Phi_{s5})}{2} \\ -\Phi_{c1} \cdot \Omega_1, -\Phi_{s1}, \frac{(\Phi_{s1} - \Phi_{s3})}{2}, \frac{(\Phi_{c3} - \Phi_{c1})}{2}, \frac{(\Phi_{s3} - \Phi_{s5})}{2}, \frac{(\Phi_{c3} - \Phi_{c5})}{2} \\ \Phi_{s3} \cdot \Omega_3, -\Phi_{c3}, -\frac{(\Phi_{c1} + \Phi_{c5})}{2}, \frac{(\Phi_{s1} - \Phi_{s5})}{2}, -\frac{\Phi_{c1}}{2}, -\frac{\Phi_{s1}}{2} \\ -\Phi_{c3} \cdot \Omega_3, -\Phi_{s3}, -\frac{(\Phi_{s1} + \Phi_{s5})}{2}, \frac{(\Phi_{c5} - \Phi_{c1})}{2}, \frac{\Phi_{s1}}{2}, -\frac{\Phi_{c1}}{2} \\ \Phi_{s5} \cdot \Omega_5, -\Phi_{c5}, -\frac{\Phi_{c3}}{2}, \frac{\Phi_{s3}}{2}, -\frac{\Phi_{c1}}{2}, \frac{\Phi_{s1}}{2} \\ -\Phi_{c5} \cdot \Omega_5, -\Phi_{s5}, -\frac{\Phi_{s3}}{2}, -\frac{\Phi_{c3}}{2}, -\frac{\Phi_{s1}}{2}, -\frac{\Phi_{c1}}{2} \end{pmatrix}$$

$$B = \left[ \frac{k_k^2}{R_k}, \mu_0^*, \mu_{c2}^*, \mu_{s2}^*, \mu_{c4}^*, \mu_{s4}^* \right]^T$$

$$C = \left[ -k_\theta \cdot i_{c1}, -k_\theta \cdot i_{s1}, -k_\theta \cdot i_{c3}, -k_\theta \cdot i_{s3}, -k_\theta \cdot i_{c5}, -k_\theta \cdot i_{s5} \right]^T$$

Из полученного уравнения определяются составляющие  $\frac{k_k^2}{R_k}, \mu_0^*, \mu_{c2}^*, \mu_{s2}^*, \mu_{c4}^*, \mu_{s4}^*$ , таким образом

восстанавливается временная зависимость коэффициента магнитной проницаемости от времени. Из выражения (6), подобным образом, определяется зависимость  $i_\theta(t) \cdot k_\theta$ . Полученные в ходе решения уравнений (6), (8), (12) коэффициенты и зависимости, не пригодны для суждения о состоянии стали и индуктора в целом. Исходя из полученных коэффициентов и зависимостей, перейдем к общепринятым параметрам цепи возбуждения, необходимым при анализе и синтезе.

Индуктивность цепи возбуждения является переменной и определяется выражением:

$$L_\theta(t) = \frac{S_{\text{экв}}}{l_{\text{экв}}} \cdot \mu_a(t) \cdot w_\theta^2 = \mu_a^\phi(t) \cdot k_\theta^2 \quad (13)$$

индуктивность эквивалентного контура вихревых токов

$$L_k(t) = \frac{S_{\text{экв}}}{l_{\text{экв}}} \cdot \mu_a(t) \cdot w_k^2 = \mu_a^\phi(t) \cdot k_k^2 \quad (14)$$

С учетом того, что  $\mu_a^\phi(t)$  есть периодическая функция, индуктивность представляется в виде

$$L(t) = L_0 + \sum_l L_{cl} \cdot \cos \Omega_l t + \sum_l L_{sl} \cdot \sin \Omega_l t \quad (15)$$

Изменение индуктивности во времени приводит к усложнению описания процессов в индукторе электрической машины при синтезе систем с регулированием магнитного потока. Однако при этом выявляется многогранность процессов протекающих в стали индуктора, показателем которых является функция  $\mu_a^\phi(t)$ . Отклонение  $\mu_a^\phi$  относительно постоянной величины свидетельствует о сложности и инерционности процесса перемагничивания стали.

Для учета электромагнитной инерционности обмотки возбуждения и эквивалентного контура вихревых токов в системах с регулированием магнитного потока, с целью упрощения процедур анализа и синтеза, можно использовать систему дифференциальных уравнений, основанную на постоянных составляющих параметров полученных в ходе решения уравнений (13 - 15) [6]:

$$M \frac{di_{\theta}(t)}{dt} = L_{\kappa 0} \frac{di_{\kappa}(t)}{dt} + i_{\kappa}(t) R_{\kappa}$$

$$u_{\theta}(t) = L_{\theta 0} \frac{di_{\theta}(t)}{dt} + i_{\theta}(t) R_{\theta} + M \frac{di_{\kappa}(t)}{dt}$$

где  $M = \sqrt{L_{\theta 0} \cdot L_{\kappa 0}}$ .

На магнитный поток электрической машины оказывают влияние все источники магнитодвижущей силы: обмотка возбуждения, компенсационная обмотка, добавочная обмотка, обмотка якоря. При этом

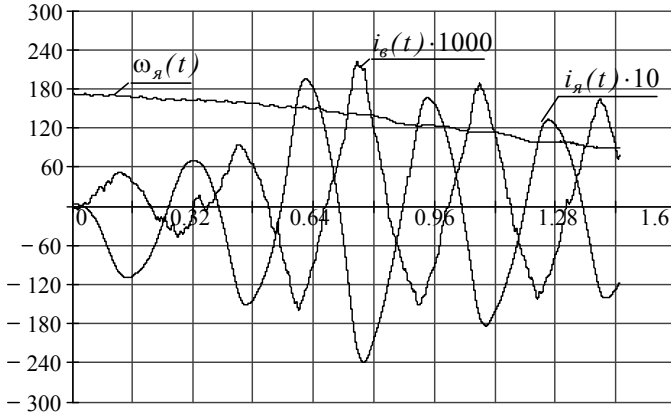


Рис. 2. Реализация эксперимента короткого замыкания в динамическом режиме для машины ПЗ1М

В режиме короткого замыкания на результирующую характеристику генератора оказывают влияние нелинейность характеристики магнитной системы, ее динамические свойства а так же явление реакции якоря [4]. Получения характеристик генератора необходимо в соответствии с техническими требованиями, однако при этом получаемая характеристика отражает поведение машины лишь в данном режиме. Следовательно если режим эксплуатации машины отличается от режима испытания, полученная характеристика оказывается непригодной. Таким образом необходимо определить параметры влияющие на вид характеристики и их показатели. Рассмотрим уравнения электромагнитного баланса генератора постоянного тока в режиме короткого замыкания

$$u_{\theta}(t) = \frac{d\Phi(t)}{dt} \cdot k_{\theta} + i_{\theta}(t) \cdot R_{\theta},$$

$$0 = \frac{d\Phi(t)}{dt} \cdot k_{\kappa} + i_{\kappa}(t) \cdot R_{\kappa},$$

$$\omega_{\text{я}}(t) \cdot k\Phi(t) = L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}(t)}{dt} + i_{\text{я}}(t) \cdot R_{\text{я}},$$

$$\Phi(t) = k_{\phi} \cdot \mu_a(t) \cdot (i_{\theta}(t) \cdot k_{\theta} - i_{\kappa}(t) \cdot k_{\kappa} \pm i_{\text{я}}(t) \cdot k_{\text{я.э}}),$$

где  $k_{\text{я.э}}$  - количество витков эквивалентной обмотки формирующей размагничивающий либо подмагничивающий поток реакции якоря [4]. При проведении опыта контролируются ток якоря, ток возбуждения, скорость вращения. Поток возбуждения непосредственно не контролируется, но в некотором масштабе может быть определен, как:

$$k\Phi(t) = \frac{L \frac{di_{\text{я}}(t)}{dt} + i_{\text{я}}(t) \cdot R_{\text{я}}}{\omega_{\text{я}}(t)}. \quad (16)$$

Параметры сопротивления и индуктивности

якорной цепи определяются в ходе диагностики машины, по этому в данном случае являются известными. Таким образом с учетом (16) выражение (10) приводится к виду:

$$\frac{\Phi(t)}{\mu_a^{\kappa}(t)} = i_{\theta}(t) \cdot k_{\theta} + \frac{d\Phi(t)}{dt} \cdot \frac{k_{\kappa}^2}{R_{\kappa}} - i_{\text{я}}(t) \cdot k_{\text{я.э}} \quad (17)$$

или с учетом того, что параметр  $k_{\theta}$  определяется из выражения (8):

$$\frac{\Phi(t)}{\mu_a^{\kappa}(t)} - \frac{d\Phi(t)}{dt} \cdot \frac{k_{\kappa}^2}{R_{\kappa}} + i_{\text{я}}(t) \cdot k_{\text{я.э}} = i_{\theta}(t) \cdot k_{\theta}.$$

Таким образом неизвестными подлежащими определению принимаются параметры  $\frac{1}{\mu_a^{\kappa}(t)}$ ,  $\frac{k_{\kappa}^2}{R_{\kappa}}$ ,  $k_{\text{я.э}}$ . Для этого представим периодические функции  $\Phi(t)$ ,  $i_{\theta}(t)$ ,  $i_{\text{я}}(t)$  (рис. 2.) в виде разложения в ряд Фурье. Результаты разложения - амплитуды квадратурных составляющих по соответствующим гармоникам представлены в табл. 2.

Таблица 2

$\Omega_i, \text{с}^{-1}$	$i_{\text{я.с.}}, \text{A}$	$i_{\text{я.с.}}, \text{A}$	$i_{\text{в.с.}}, \text{A}$	$i_{\text{в.с.}}, \text{A}$	$k\Phi_s, \text{В} \cdot \text{с}$	$k\Phi_c, \text{В} \cdot \text{с}$
0	0	0	0	0	0	0
16.19	-1.881	-16.15	-0.1161	-0.1467	0.2253	0.6526
32.39	1.733	-0.1669	-0.0017	0.0002	-0.0156	0.0081
48.58	1.25	0.8294	0.0244	0.0229	-0.0436	0.0061
64.78	0.2086	-0.1631	-0.0072	-0.0033	0.0126	0.0173
80.97	0.1149	-0.1849	-0.0111	-0.0052	0.0164	0.0117

Проводя ряд рассуждений подобно (5)-(12) записываются уравнения баланса ортогональных составляющих в соответствии с (17), к примеру для 3ей косинусной составляющей:

$$\begin{aligned} & \Phi_{s3} \cdot \Omega_3 \cdot \frac{k_k^2}{R_k} + i_{я.c3} \cdot k_{экв} + \Phi_0 \cdot \mu_{c3}^* + \Phi_{c3} \cdot \mu_0^* + \frac{\Phi_{c2} + \Phi_{c4}}{2} \cdot \mu_{c1}^* + \\ & + \frac{\Phi_{s4} - \Phi_{s2}}{2} \cdot \mu_{s1}^* + \frac{\Phi_{c1} + \Phi_{c5}}{2} \cdot \mu_{c2}^* + \frac{\Phi_{s5} - \Phi_{s1}}{2} \cdot \mu_{s2}^* + \\ & + \frac{\Phi_{c1}}{2} \cdot \mu_{c4}^* + \frac{\Phi_{s1}}{2} \cdot \mu_{s4}^* + \frac{\Phi_{c2}}{2} \cdot \mu_{c5}^* + \frac{\Phi_{s2}}{2} \cdot \mu_{s5}^* = i_{c3} \cdot k_k \end{aligned}$$

$$A = \begin{pmatrix} \Phi_0, & \frac{\Phi_{c1}}{2}, & \frac{\Phi_{s1}}{2}, & \frac{\Phi_{c2}}{2}, & \frac{\Phi_{s2}}{2}, & \frac{\Phi_{c3}}{2}, & \frac{\Phi_{s3}}{2}, & i_{я0}, & 0 \\ \Phi_{c1}, & \Phi_0 + \frac{\Phi_{c1}}{2}, & \frac{\Phi_{s2}}{2}, & \frac{\Phi_{c1} + \Phi_{c3}}{2}, & \frac{\Phi_{s1} + \Phi_{s3}}{2}, & \frac{\Phi_{c2} + \Phi_{c4}}{2}, & \frac{\Phi_{s2} + \Phi_{s4}}{2}, & i_{яc1}, & \Omega_1 \cdot \Phi_{s1} \\ \Phi_{s1}, & \frac{\Phi_{s2}}{2}, & \Phi_0 - \frac{\Phi_{c2}}{2}, & \frac{\Phi_{s3} - \Phi_{s1}}{2}, & \frac{\Phi_{c1} - \Phi_{c3}}{2}, & \frac{\Phi_{s4} - \Phi_{s2}}{2}, & \frac{\Phi_{c2} - \Phi_{c4}}{2}, & i_{яс1}, & -\Omega_1 \cdot \Phi_{c1} \\ \Phi_{c2}, & \frac{\Phi_{c1} + \Phi_{c3}}{2}, & \frac{\Phi_{s3} - \Phi_{s1}}{2}, & \Phi_0 + \frac{\Phi_{c4}}{2}, & \frac{\Phi_{s4}}{2}, & \frac{\Phi_{c1} + \Phi_{c5}}{2}, & \frac{\Phi_{s1} + \Phi_{s5}}{2}, & i_{яc2}, & \Omega_2 \cdot \Phi_{s2} \\ \Phi_{s2}, & \frac{\Phi_{s1} + \Phi_{s3}}{2}, & \frac{\Phi_{c1} - \Phi_{c3}}{2}, & \frac{\Phi_{s4}}{2}, & \Phi_0 - \frac{\Phi_{c4}}{2}, & \frac{\Phi_{s5} - \Phi_{s1}}{2}, & \frac{\Phi_{c1} - \Phi_{c5}}{2}, & i_{яс2}, & -\Omega_2 \cdot \Phi_{c2} \\ \Phi_{c3}, & \frac{\Phi_{c2} + \Phi_{c4}}{2}, & \frac{\Phi_{s4} - \Phi_{s2}}{2}, & \frac{\Phi_{c1} + \Phi_{c5}}{2}, & \frac{\Phi_{s5} - \Phi_{s1}}{2}, & \Phi_0, & 0, & i_{яc3}, & \Omega_3 \cdot \Phi_{s3} \\ \Phi_{s3}, & \frac{\Phi_{s2} + \Phi_{s4}}{2}, & \frac{\Phi_{c2} - \Phi_{c4}}{2}, & \frac{\Phi_{s1} + \Phi_{s5}}{2}, & \frac{\Phi_{c1} - \Phi_{c5}}{2}, & 0, & \Phi_0, & i_{яс3}, & -\Omega_3 \cdot \Phi_{c3} \\ \Phi_{c4}, & \frac{\Phi_{c3} + \Phi_{c5}}{2}, & \frac{\Phi_{s5} - \Phi_{s3}}{2}, & \frac{\Phi_{c2}}{2}, & -\frac{\Phi_{s2}}{2}, & \frac{\Phi_{c1}}{2}, & -\frac{\Phi_{s1}}{2}, & i_{яc4}, & \Omega_4 \cdot \Phi_{s4} \\ \Phi_{s4}, & \frac{\Phi_{s3} + \Phi_{s5}}{2}, & \frac{\Phi_{c3} - \Phi_{c5}}{2}, & \frac{\Phi_{s2}}{2}, & \frac{\Phi_{c2}}{2}, & \frac{\Phi_{s1}}{2}, & \frac{\Phi_{c1}}{2}, & i_{яс4}, & -\Omega_4 \cdot \Phi_{c4} \end{pmatrix}$$

$$B = \left| \begin{matrix} \mu_0^* \\ \mu_{c1}^* \\ \mu_{s1}^* \\ \mu_{c2}^* \\ \mu_{s2}^* \\ \mu_{c3}^* \\ \mu_{s3}^* \\ \mu_{c4}^* \\ \mu_{s4}^* \\ \mu_{c5}^* \\ \mu_{s5}^* \\ k_{экв} \\ \frac{k_k^2}{R_k} \end{matrix} \right|^T$$

$$C = \left| i_0 \cdot k_\theta, i_{c1} \cdot k_\theta, i_{s1} \cdot k_\theta, i_{c2} \cdot k_\theta, i_{s2} \cdot k_\theta, i_{c3} \cdot k_\theta, i_{s3} \cdot k_\theta, i_{c4} \cdot k_\theta, i_{s4} \cdot k_\theta \right|^T$$

определению подлежат коэффициенты матрицы-столбца В.

В результате решения восстанавливается временная зависимость изменения магнитной проницаемости и коэффициент эквивалентной обмотки реакции якоря.

Таким образом:

— динамические характеристики холостого хода и короткого замыкания отражают все многообразие электромагнитных процессов в электромагнитной системе машины;

— сложность процессов преобразования энергии магнитного поля в индукторе генератора отражается аналитически, путем введения зависимостей электромагнитных параметров индуктора во времени;

— диагностика параметров индуктора на основании предположения постоянства индуктивности обмотки возбуждения, даже с учетом влияния вихревых токов, является недостоверной;

— в результате получения характеристик генератора адекватно диагностируются параметры индуктора, при этом магнитные свойства стали отражаются закономерностью изменения магнитной проницаемости  $\mu_a^\phi(t)$  и некоторым эквивалентным контуром вихревых токов.

Аналогичным образом формируются уравнения для нескольких ортогональных составляющих различных гармоник, с целью определения составляющих магнитной проницаемости и коэффициента реакции якоря. Полученная система уравнений представляется в матричной форме:  $A \times B = C$ , где

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники М.: Высш. школа, 1973. – 752с.
- [2] Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Теоретические основы электротехники, Л.:Энергоиздат, 1981. – 536с
- [3] Родькин Д.И. Системы динамического нагружения и диагностики электродвигателей при послеремонтных испытаниях М.:Недра, 1980г, - 243с.
- [4] Пиотровский Л.М. Испытание электрических машин постоянного тока М.-Л. ОГИЗ, 1934г, 218с
- [5] Ломонос А. И., Бялобржеский А. В., Кривонос С. А. Закономерности частотных преобразований мощности полигармонических сигналов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. - Кременчук: КДПУ, 2002. - Вип.1/2002 (12). - с.99-103.
- [6] Бялобржеский А.В. Экспериментальное определение характеристик генератора постоянного тока при динамическом нагружении // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. - Кременчук: КДПУ, 2001. - Вип.1/2001 (10). - с.253-256.

Поступила 30.08.2003