

УДК 621.313.30

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

Г. Л. Арешян

Учет насыщения в однофазных индукторных генераторах с пульсирующим потоком

(Представлено академиком АН Армянской ССР А. Г. Носифьяном; 6/IV 1975)

Все индукторные машины с пульсирующим потоком обладают присущей только им особенностью, заключающейся в том, что при изменении мдс приложенной к зубцовой зоне, происходит изменение относительной (по отношению к постоянной составляющей) амплитуды первой гармоники пульсирующего магнитного потока. Известно (1,2), что с увеличением указанной мдс, величина относительной амплитуды уменьшается. Это обстоятельство обуславливает появление явно выраженных экстремумов в характеристиках холостого хода и короткого замыкания однофазных индукторных генераторов с пульсирующим потоком.

В настоящей статье ставится задача обосновать и разработать метод получения корректирующих коэффициентов применительно к теории, развитой в работе автора (3), в одном частном случае. А именно, получение корректирующих коэффициентов исходя из экспериментальных характеристик холостого хода и короткого замыкания.

В основу теории (3) положены дифференциальные уравнения электрических цепей и магнитные проводимости обмоток возбуждения, силовой и демпферной (соответствующие индексы „в“, „с“, „д“)

$$L_{\alpha\beta}(\gamma) = L_{\alpha\beta 0} + \sum_{m=1}^s L_{\alpha\beta m} \cos m\gamma \quad (\alpha, \beta = в, с, д) \quad (1)$$

В линейной постановке (без учета насыщения) проводимости $L_{\alpha\beta m}$ ($m=0, 1, \dots, s$) являются постоянными величинами, не зависящими от величины мдс обмоток.

Поэтому, если параметры $L_{\alpha\beta m}$ определены для какого-либо одного частного режима работы генератора (например для номинального), то величины этих параметров могут быть использованы для всех остальных режимов. Когда же рассматривается нелинейная задача, параметры $L_{\alpha\beta m}$ должны быть определены методом последовательных приближений для каждого конкретного режима работы генератора. Не останавливаясь подробно на этом общем методе, перейдем к рассмотрению част-

ного случая, когда для корректировки используются две экспериментальные характеристики холостого хода и короткого замыкания. Достоинства и недостатки этого метода обсудим в конце статьи.

Выпишем основную систему мдс для случая идеального короткого замыкания и при учете первых гармоник мдс и магнитных проводимостей (обозначения те же, что и в (3)). Для этих условий матрица поперечных мдс $F^d = 0$, матрица $G = 0$, а матрицы D_{α} и B_{α} вырождаются в скаляры, причем

$$D_{\alpha\beta} = d_{\alpha\beta 11} = \lambda_{\alpha\beta 0} + 0,5 \lambda_{\alpha\beta 2} = \lambda_{\alpha\beta 0}, \quad B_{\alpha} = \lambda_{\alpha n 1} \quad (\alpha, \beta = \text{в.с.д}) \quad (2)$$

В соответствии с уравнением (2) и уравнением (38) работы (3), получаем три скалярных уравнения:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{nn0} F_{n1}^d + \lambda_{nc0} F_{c1}^d + \lambda_{na0} F_{a1}^d &= -\lambda_{nn1} f_{n0} \\ \lambda_{cn0} F_{n1}^d + \lambda_{cc0} F_{c1}^d + \lambda_{ca0} F_{a1}^d &= -\lambda_{cn1} f_{n0} \\ \lambda_{an0} F_{n1}^d + \lambda_{ac0} F_{c1}^d + \lambda_{aa0} F_{a1}^d &= -\lambda_{an1} f_{p0} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Амплитуду первой гармоники эдс, которая индуцируется в силовой обмотке от постоянной составляющей мдс обмотки возбуждения получим из уравнения (44) работы (3)

$$E_{\text{остmax}}^d = \omega_1 \omega_c \lambda_{cn1} f_{n0}. \quad (4)$$

В режиме холостого хода генератора эта эдс равна напряжению на зажимах генератора и следовательно, уравнение (4) определяет характеристику холостого хода.

В уравнениях (3) и (4) значения магнитных проводимостей выразим через базовое значение $\frac{\lambda_{cp}}{4p_n}$ и относительные величины (снабжаются волнистой линией сверху):

$$\lambda_{\alpha\beta 0} = \frac{\lambda_{cp}}{4p_n} \bar{\lambda}_{\alpha\beta 0}, \quad \lambda_{\alpha\beta 1} = \frac{\lambda_{cp}}{4p_n} \bar{\lambda}_{\alpha\beta 1} \quad (5)$$

В уравнении (5) $\lambda_{cp} = l_l n_d \lambda_0$, где l_l — аксиальная длина пакета; n_d — число малых зубцов статора, охваченных одной катушкой силовой обмотки; λ_0 — среднее значение магнитной проводимости воздушного зазора на участке одного малого зубцового статора; p_n — число пар полюсов обмотки возбуждения. Относительные значения $\bar{\lambda}_{\alpha\beta 0}$ и $\bar{\lambda}_{\alpha\beta 1}$ могут быть представлены двумя составляющими

$$\bar{\lambda}_{\alpha\beta 0} = \lambda_{\alpha\beta 0}^0 + \rho_{\alpha\beta}, \quad \bar{\lambda}_{\alpha\beta 1} = \lambda_{\alpha\beta 1}^0 + \rho_{\alpha\beta 1}, \quad (6)$$

где $\lambda_{\alpha\beta 0}^0$ и $\lambda_{\alpha\beta 1}^0$ — определены для данного типа генератора в предположении, что стальные участки магнитопровода имеют $\mu = \infty$; $\rho_{\alpha\beta}$ и $\rho_{\alpha\beta 1}$ — определены как добавки с учетом того, что $\mu \neq \infty$.

В линейной постановке ($\mu = \text{const}$) $\rho_{\alpha\beta}$ и $\rho_{\alpha\beta 1}$ — оказываются постоянными, в нелинейной постановке ($\mu = \text{var} \neq \infty$) они являются слож-

ными функциями от мдс обмоток.

Можно показать, что при правильно выбранной зубцовой зоне для всех индукторных генераторов с пульсирующим потоком при $\mu = \infty$, $\lambda_{\text{вн1}} = \lambda_{\text{вн2}} = 0$. Сохраняя это условие для $\mu = \text{var}$, получаем

$$\lambda_{\text{вн1}}^0 = \lambda_{\text{вн2}}^0 = 0, \quad \rho_{\text{вн1}} = \rho_{\text{вн2}} = 0 \quad (7)$$

Тогда с учетом (5) + (7), система (3), описывающая режим идеального короткого замыкания, примет вид:

$$\begin{cases} (\lambda_{\text{вн0}}^0 + \rho_{\text{вн}}) F_{\text{вн}}^d + (\lambda_{\text{вс0}}^0 + \rho_{\text{вс}}) F_{\text{вс}}^d + (\lambda_{\text{вн20}}^0 + \rho_{\text{вн2}}) F_{\text{вн2}}^d = 0 \\ (\lambda_{\text{св0}}^0 + \rho_{\text{св}}) F_{\text{вн}}^d + (\lambda_{\text{св0}}^0 + \rho_{\text{св}}) F_{\text{вс}}^d + (\lambda_{\text{св2}}^0 + \rho_{\text{св2}}) F_{\text{вн2}}^d = -(\lambda_{\text{св1}}^0 + \rho_{\text{св1}}) f_{\text{в0}} \\ (\lambda_{\text{ав0}}^0 + \rho_{\text{ав}}) F_{\text{вн}}^d + (\lambda_{\text{ав0}}^0 + \rho_{\text{ав}}) F_{\text{вс}}^d + (\lambda_{\text{ав2}}^0 + \rho_{\text{ав2}}) F_{\text{вн2}}^d = 0 \end{cases} \quad (8)$$

Решая первое и третье уравнение системы (8), относительно $F_{\text{вн}}^d$ и $F_{\text{вн2}}^d$ находим

$$F_{\text{вн}}^d = -\varphi_{\text{в}} F_{\text{вс}}^d, \quad F_{\text{вн2}}^d = -\varphi_{\text{а}} F_{\text{вс}}^d, \quad (9)$$

где

$$\varphi_{\text{в}} = \varphi_{\text{в}}(\lambda_{\text{вн}}^0, \rho_{\text{вн}}); \quad \varphi_{\text{а}} = \varphi_{\text{а}}(\lambda_{\text{вн}}^0, \rho_{\text{вн}}).$$

Подставляя (9) во второе уравнение системы (8), находим зависимость между мдс силовой обмотки $F_{\text{вс}}^d$ и мдс $f_{\text{в0}}$ для режима короткого замыкания

$$F_{\text{вс}}^d = -\frac{(\lambda_{\text{св1}}^0 + \rho_{\text{св1}})}{\varphi_{\text{с}}} f_{\text{в0}}, \quad (10)$$

где

$$\varphi_{\text{с}} = -(\lambda_{\text{св0}}^0 + \rho_{\text{св}}) \varphi_{\text{в}} + (\lambda_{\text{св0}}^0 + \rho_{\text{св}}) - (\lambda_{\text{св2}}^0 + \rho_{\text{св2}}) \varphi_{\text{а}}$$

Переходя к эффективным токам $F_{\text{вс}}^d = \sqrt{2} \omega_{\text{с}} I_{\text{с}}^d$, $f_{\text{в0}} = \omega_{\text{в}} I_{\text{в0}}$ и не учитывая знака в уравнении (10) (продольная мдс направлена в режиме короткого замыкания по отрицательной оси „d“) получаем

$$I_{\text{с}}^d = \frac{(\lambda_{\text{св1}}^0 + \rho_{\text{св1}}) \omega_{\text{в}}}{\sqrt{2} \varphi_{\text{с}} \omega_{\text{с}}} I_{\text{в0}}. \quad (11)$$

Интегральное влияние эффектов насыщения в режиме короткого замыкания будем учитывать одним коэффициентом $k_{\text{м}}$. В этом случае уравнение (11) можно представить в виде:

$$I_{\text{с}}^d = c_1 k_{\text{м}} I_{\text{в0}}. \quad (12)$$

где величина c_1 равна тангенсу угла наклона прямолинейной части характеристики короткого замыкания $c_1 = \text{tg} \alpha$ (см. рис. 1.)

Таким образом c_1 может быть определена экспериментально. С другой стороны c_1 определим расчетно при условии, что все $\rho_{\text{ав}} = 0$ и $\rho_{\text{св1}} = 0$, тогда

$$c_1 = \frac{\lambda_{\text{сн1}}^0 \omega_n}{\sqrt{2} \varphi_c^0 \omega_c}, \quad (13)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \varphi_c^0 &= -\lambda_{\text{св0}}^0 \varphi_n^0 + \lambda_{\text{сс0}}^0 - \lambda_{\text{сд0}}^0 \varphi_{\text{д}}^0; & \varphi_n^0 &= \frac{\lambda_{\text{вс0}}^0 \lambda_{\text{длс}}^0 - \lambda_{\text{вл0}}^0 \lambda_{\text{дс0}}^0}{\Delta}; \\ \varphi_{\text{д}}^0 &= \frac{\lambda_{\text{дс0}}^0 \lambda_{\text{вл0}}^0 - \lambda_{\text{дл0}}^0 \lambda_{\text{вс0}}^0}{\Delta}; & \Delta &= \lambda_{\text{ов0}}^0 \lambda_{\text{дл0}}^0 - \lambda_{\text{вл0}}^0 \lambda_{\text{дл0}}^0 \end{aligned} \right\} (14)$$

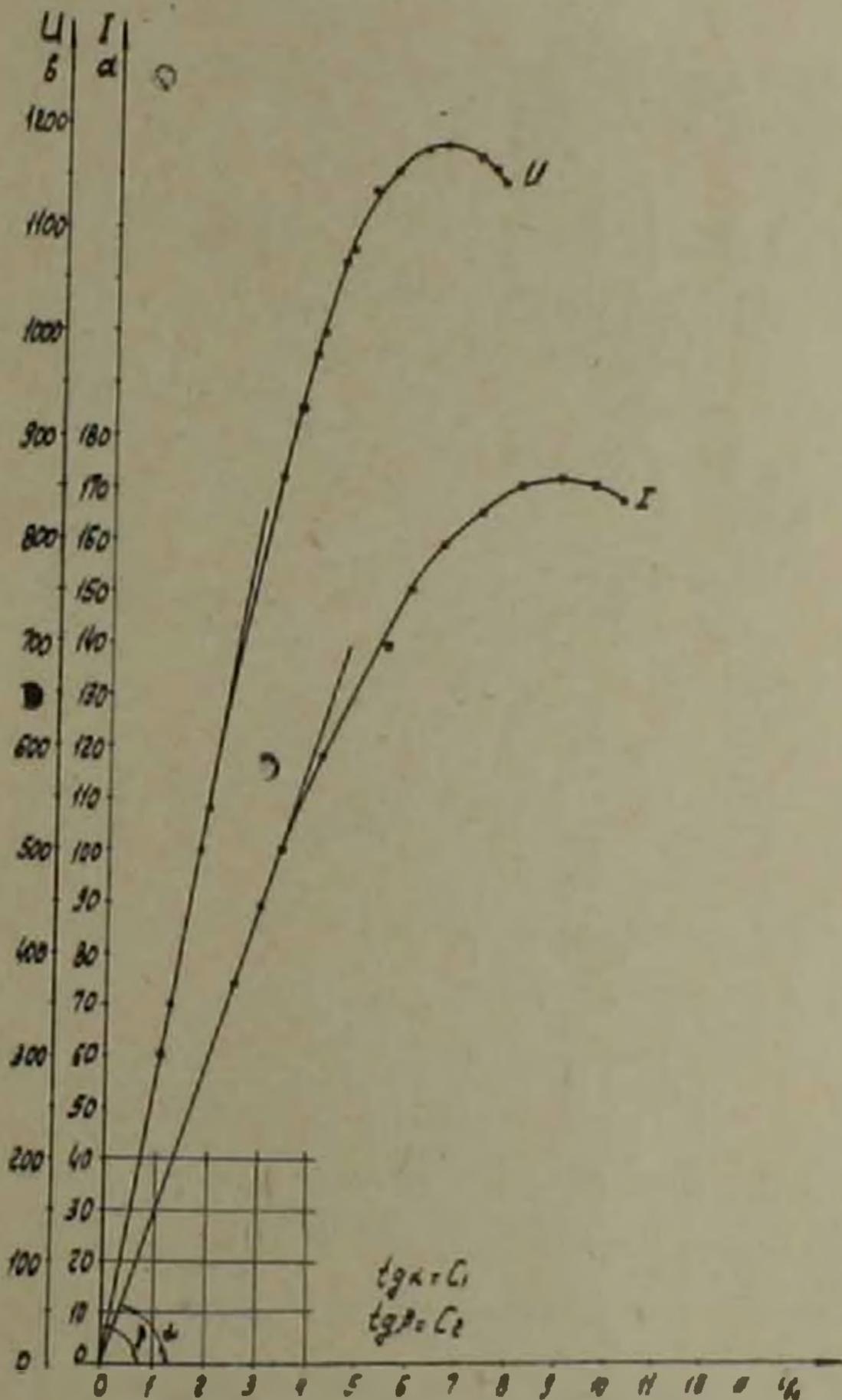


Рис. 1 Характеристики холостого хода и короткого замыкания генератора 100 кват 6000 гц серии ВПЧ. Обмотка возбуждения включена на 120 в. Силовая обмотка включена на 800 в

Величина $\lambda_{\text{сн1}}^0$ для индукторных генераторов (автор проанализировал 13 различных типов) выражается через первый коэффициент мо-

дуляции магнитной проводимости m_1 и для всех типов (кроме генератора типа Гюн) равен

$$\lambda_{\text{св1}}^0 = 2m_1. \quad (15)$$

Для генератора Гюн $\lambda_{\text{св1}}^0 = 4m_1$.

При принятых условиях учета эффектов насыщения, вполне естественно, их интегральное влияние отнести за счет изменения величины коэффициента модуляции. Тогда необходимо считать.

$$i_{\text{св1}}^0 = 2m_1^0, \quad m_1 = k_m m_1^0. \quad (16)$$

Коэффициент k_m легко определяется из характеристики короткого замыкания с учетом уравнения (12) и условия

$$c_1 = ig^2. \quad (17)$$

Полученные численные значения k_m в функции $i_{\text{н0}}$ для генератора серии ВПЧ 100 квт 8000 гц даны на рис. 2

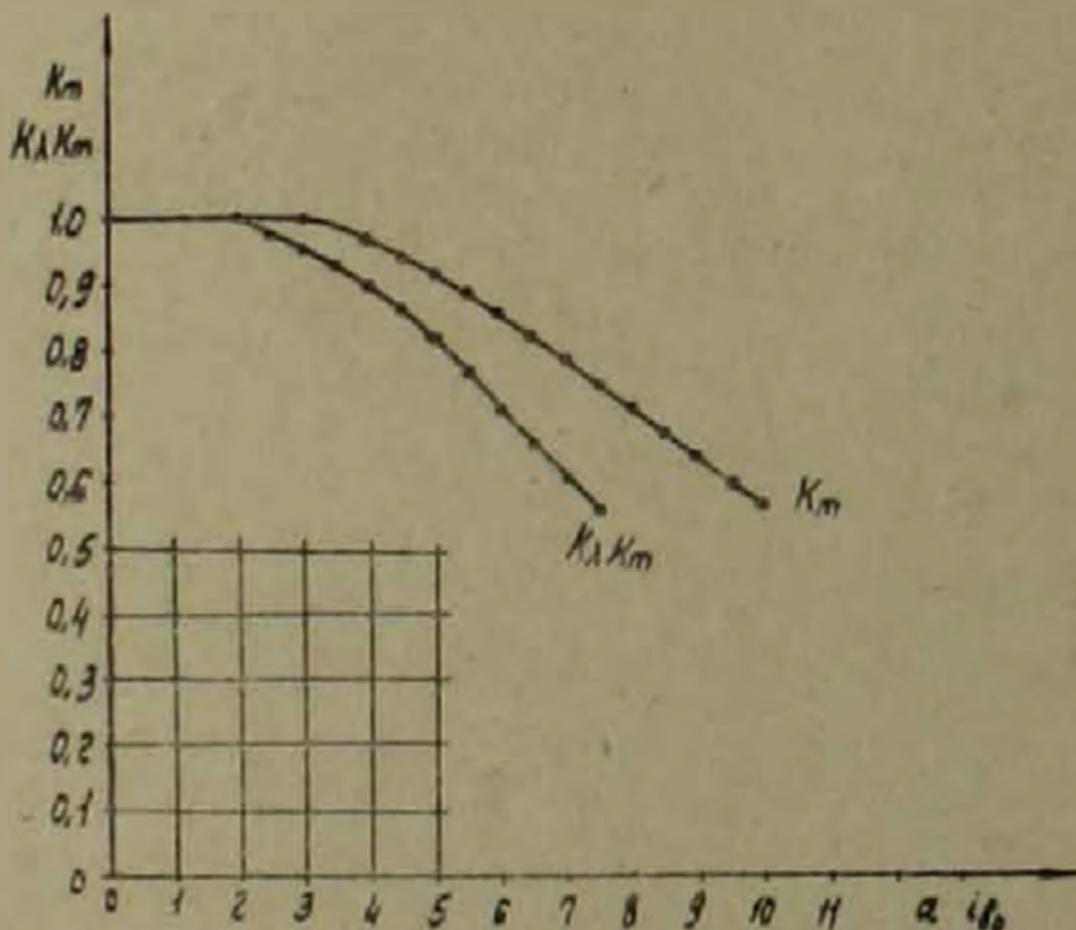


Рис. 2 Коэффициенты корректирующие эффекты насыщения, полученные по характеристикам рис. 1

Из уравнения (4), получаем для характеристики холостого хода, с учетом уравнений (5) и (6):

$$U_0 = \sqrt{2} E_{\text{вс}} = \sqrt{2} \omega_1 \omega_c \omega_b \frac{\lambda_{\text{ср}}}{4p_0} (\lambda_{\text{св1}}^0 + p_{\text{св1}}) i_{\text{н0}} \quad (18)$$

Изменение трех параметров $\lambda_{\text{ср}}$ (или λ^0), $\lambda_{\text{св1}}^0$ (или m_1) и $p_{\text{св1}}$ определяют отклонение характеристики холостого хода от прямолинейной

Поскольку изменение $\lambda_{\text{св1}}^0$ и $\rho_{\text{св1}}$ в режиме короткого замыкания было учтено коэффициентом k_m , причем считалось, что $\rho_{\text{св1}} = 0$, то уравнение (18) представим в виде

$$U_0 = c_2 k_m k_\lambda i_{\text{н0}}, \quad (19)$$

где

$$\left. \begin{aligned} c_2 &= \sqrt{2} \omega_1 \omega_c \omega_n \frac{i_{\text{ср}}^0}{4\rho_n} i_{\text{св1}}^0, & i_{\text{св1}}^0 &= 2m_1^0 \\ \lambda_{\text{ср}} &= k_\lambda i_{\text{ср}}^0, & \lambda_0 &= k_\lambda i_0^0 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

С другой стороны из характеристики холостого хода (см. рис. 1)

$$c_2 = \text{tg} \beta, \quad (21)$$

Тогда величина $k_m k_\lambda$ как функция $i_{\text{н0}}$ легко определяется экспериментально (см. рис. 2).

Имея $k_m = k_m(i_{\text{св}})$ из характеристики короткого замыкания и $k_m k_\lambda = k_m k_\lambda(i_{\text{н0}})$ из характеристики холостого хода, легко определяется $k_\lambda = k_\lambda(i_{\text{н0}})$. Распространяя полученные изменения магнитных проводимостей на остальные режимы работы генератора (что конечно не совсем корректно), получаем для использования линейной теории с учетом коррекции

$$\lambda_{\text{ср}} = k_\lambda \lambda_{\text{ср}}^0, \quad m_1 = k_m m_1^0, \quad (22)$$

причем

$$\rho_{\alpha\beta} = 0 \quad \rho_{\alpha\alpha} = 0 \quad (\alpha, \beta = \text{в, с, д}). \quad (23)$$

Кратко остановимся на вопросе влияния насыщения на индуктивные сопротивления.

Умножим второе уравнение системы (8) на $\omega_1 \omega_c \frac{i_{\text{ср}}}{4\rho_n}$ и заменим амплитуды мдс эффективными токами $F_{\alpha 1}^d = \sqrt{2} \omega_n I_{\alpha 1}^d$, $F_{\alpha 2}^d = \sqrt{2} \omega_c I_{\alpha 2}^d$, $F_{\alpha 3}^d = \sqrt{2} \omega_n I_{\alpha 3}^d$ тогда с учетом (4) и (5) получим

$$\left(x_{\alpha 1}^d \frac{I_{\alpha 1}^d}{I_c^d} + x_{\alpha 2}^d + x_{\alpha 3}^d \frac{I_{\alpha 3}^d}{I_c^d} \right) I_{\alpha 1}^d = -E_{0\alpha}^d, \quad (24)$$

где $E_{0\alpha}^d = \sqrt{2} E_{0\alpha}^q$, $x_{\alpha\beta}^d$ — индуктивные машинные сопротивления для первых гармоник токов и эдс силовой обмотки (см. уравнения (49) и (50) работы (2)).

В уравнении (24) выражение в скобках представляет собой машинное экасопротивление силовой обмотки по продольной оси (4).

$$x_c^d = x_{\text{св}}^d \frac{I_{\text{св}}^d}{I_c^d} + x_{\text{сс}}^d + x_{\text{сз}}^d \frac{I_{\text{з}}^d}{I_c^d}. \quad (25)$$

С учетом (25) получаем из (24) (знак минус опускаем из тех же соображений, что и при получении уравнения (12) из уравнения (10))

$$x_c^d I_c^d = E_0^q. \quad (26)$$

Считая, что в режиме короткого замыкания величина эдс E_{0c}^q при данном токе $i_{\text{в0}}$ такая же, как и в режиме холостого хода, можем использовать уравнение (19). Подставляя в (26) выражение I_c^d по (12), с учетом (19), получаем $x_c^d c_1 k_m i_{\text{в0}} = c_2 k_m k_1 i_{\text{в0}}$ откуда

$$x_c^d = \frac{c_2}{c_1} k_1. \quad (27)$$

Ненасыщенное значение x_c^d равно отношению $\frac{c_2}{c_1}$. Зависимость x_c^d от тока возбуждения, с учетом эффектов насыщения, находится из характеристик короткого замыкания и холостого хода

$$x_c^d = \frac{E_0^q}{I_c^d}, \quad (28)$$

где $E_0^q = E_0^q(i_{\text{в0}})$ — характеристика холостого хода; $I_c^d = I_c^d(i_{\text{в0}})$ — характеристика короткого замыкания.

Таким образом, для принятой методики коррекции эффектов насыщения, коэффициент k_m корректирует первый коэффициент модуляции m_1 , коэффициент k_1 корректирует среднее значение магнитной проводимости $i_{\text{ср}}$ (см. уравнение (20)) и одновременно корректирует индуктивное машинное экасопротивление силовой обмотки по продольной оси x_c^d . Основным достоинством предлагаемого метода коррекции является возможность учитывать изменение средней величины магнитной проводимости $i_{\text{ср}}$ и первого коэффициента модуляции m_1 через один независимый параметр $i_{\text{в0}}$ — постоянную составляющую тока возбуждения. Так как при этом используются экспериментальные характеристики холостого хода и короткого замыкания, то при коррекции одновременно учитываются эффекты насыщения стальных участков магнитопровода не только в зоне малых зубцов, но и во всех остальных участках (если таковые имеют место).

Отмеченная возможность корректировки по одному независимому параметру $i_{\text{в0}}$ в свою очередь, дает возможность рассчитывать конкретный установившийся режим работы генератора сразу, не прибегая к методу последовательных приближений.

К недостаткам предлагаемого метода относятся:

а) необходимость наличия экспериментальных характеристик холостого хода и короткого замыкания;

б) использование корректирующих коэффициентов k_m и k_1 в ограниченной области множества установившихся режимов, таких, в которых величина продольной составляющей мдс силовой обмотки изменяется мало, при изменении нагрузки и фиксированной постоянной составляющей тока возбуждения $i_{\text{в0}}$. Практически, однако, эта область достаточно велика и включает нагрузки с изменением $\cos\varphi$ от $\cos\varphi = 0$

через $\cos\varphi=1$, до $\cos\varphi=0,8$ емкостной. Такой широкий диапазон изменения $\cos\varphi$ объясняется большими (по сравнению с величиной полного сопротивления внешней нагрузки) машинными индуктивными экасопротивлениями по продольной и поперечной осям однофазных индукторных генераторов с пульсирующим потоком. Это обстоятельство обуславливает сравнительно малые изменения продольной составляющей мдс силовой обмотки, а следовательно и относительные малые изменения размагничивающего влияния этой мдс при фиксированных значениях постоянной составляющей тока возбуждения.

Ереванский политехнический институт им. К. Маркса

Գ. Լ. ԱՐԵՇՅԱՆ

Մարախող հոսքով միաֆազ ինդուկտորային գեներատորներում հազեցման հաշվառումը

Ցույց է արվում, որ երկու կորեկտոր գործակիցներ մտցնելով կարելի է հաշվի առնել հազեցումը: Այդ գործակիցներն որոշվում են պարասյ ընթացքի և կարճ միացման բնութագրերից: Նրանք կախված են գրգռման հոսանքից: Գործակիցներից մեկը կորեկտում է մոդուլյացիայի առաջին գործակիցը իսկ մյուսը՝ մագնիսական հաղորդականության միջին արժեքը: Այդ գործակիցների ավելացումը տեսության⁽¹⁾ բանաձևերի մեջ թույլ է տալիս շրջանցել հազեցման էֆեկտները հաշվի առնող աստիճանական մոտեցումների մեթոդով հաշվարկները:

Առաջարկված մեթոդը խիստ շի համարվում:

ЛИТЕРАТУРА — ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

- ¹ М. М. Алексеева, Машинные генераторы повышенной частоты, изд. Энергия, 1967.
² Н. Я. Альпер, А. А. Терзян, Индукторные генераторы, изд. «Энергия», 1970. ³ Г. Л. Арешян, ДАН Арм. ССР, т. 58, № 5 (1974). ⁴ Г. Л. Арешян, «Известия АН Арм. ССР» (серия технических наук) т. 27, № 5 (1974).