

УДК 621.31.03

UDC 621.31.03

**Асинхронные генераторы для систем автономного электроснабжения.  
Часть 1. Обоснование параметров асинхронного генератора**

**ASYNCHRONOUS GENERATORS FOR SYSTEMS OF INDEPENDENT ELECTROSUPPLY.  
PART 1. THE SUBSTANTIATION OF PARAMETERS OF THE ASYNCHRONOUS GENERATOR**

Богатырев Николай Иванович  
к.т.н., профессор  
*Кубанский государственный аграрный университет, г. Краснодар, Россия*

Bogatyryov Nikolai Ivanovich  
Cand. Tech. Sci., Professor  
*Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia*

Ванурин Владимир Николаевич  
д.т.н., профессор  
*ГНУ ВНИИПТИМЭСХ, г. Зерноград*

Vanurin Vladimir Nikolaevich  
Dr.Sc.(Tech.), Professor  
*SSU VNIPTIMESH, Zernograd, Russia*

Креймер Алексей Семенович  
к.т.н., доцент

Kreimer Aleksei Semyonovich  
Cand. Tech. Sci., Assistant professor

Екименко Петр Павлович  
*Кубанский государственный аграрный университет, г. Краснодар, Россия*

Ekimenko Petr Pavlovich  
*Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia*

Рассмотрено влияние схемных и конструктивных признаков статорных и роторных обмоток на параметры и эксплуатационные свойства асинхронных генераторов

Influence of circuit and constructive signs of stator and rotor windings on parameters and operational properties of asynchronous generators is examined

Ключевые слова: СИСТЕМА АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ, ОБМОТКА СТАТОРА, МОДУЛЯЦИЯ, АСИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР, МДС

Keywords: AUTONOMOUS SYSTEM OF POWER SUPPLY, STATOR'S WINDING, MODULATION, ASYNCHRONOUS GENERATOR, MMF

### **Часть 1. Обоснование параметров асинхронного генератора**

Система автономного электроснабжения (САЭ), в нашем понимании, предусматривает задачу разработать: генераторы (с приводными двигателями внутреннего сгорания, ветро- гидро- или комбинированным приводом) для питания параллельно включённых электроприёмников; систему регулирования механических параметров приводных двигателей и электрических параметров генераторов, обеспечивающую требуемый уровень, частоту и постоянство напряжения у электроприёмников; защиту элементов системы электроснабжения от перегрузок и коротких замыканий; приборы учёта и контроля качества электроэнергии и технических параметров приводных двигателей [4].

Автономность системы обусловлена соизмеримостью мощностей источников питания и потребителей и их обособленностью от других систем. В этом одна из особенностей и отличие САЭ от больших энергетических систем. Но не только в этом. В результате взаимного влияния источника энергии и нагрузки нарушаются режимы работы САЭ вплоть до полной неработоспособности системы электрооборудования. Источник питания, например, в составе дизеля и синхронного генератора имеет нестабильную частоту вращения и частоту тока, усугубляющие режим работы системы. Вследствие нестабильности частоты и искажений формы кривой напряжения становятся неработоспособными некоторые системы автоматики, непосредственные преобразователи частоты и другие токоприемники. САЭ с экономической точки зрения должны быть простыми и надёжными в эксплуатации. Создание для них генераторов, адаптированных к различному роду потребителей, является актуальной задачей сельской электрификации. Факторы, сдерживающие широкое применение АГ в качестве преобразователей энергии, обусловлены необходимостью регулирования тока возбуждения, и в большей мере при наличии в токе нагрузки реактивной составляющей, размагничивающей генератор.

По принципу устройства АГ не может служить источником реактивной мощности, а поэтому важнейшие характеристики его являются крутопадающими, особенно при подключении активно - индуктивных двигательных нагрузок. Такие генераторы нуждаются в стабилизации напряжения. Стабилизация напряжения осуществляется компенсацией реактивной индуктивной мощности или разработкой специальных обмоток статора.

### ***1 Математическая модель и параметры асинхронных машин***

Влияние схемных и конструктивных признаков статорных и роторных обмоток на параметры и эксплуатационные свойства асинхронных машин обусловлено физическими явлениями при преобразовании в них

энергии. Изучение физических явлений в электромеханических преобразователях энергии, к числу которых относят и электрические машины, осуществляют преимущественно методами математического моделирования.

При моделировании асинхронной машины предварительно изучают её идеализированный вариант, который характеризуется электрической и магнитной симметрией, равномерным воздушным зазором, отсутствием насыщения, распределением магнитодвижущей силы (МДС) в воздушном зазоре по гармоническому закону. Процессы в многополюсной асинхронной машине идентичны процессам в двухполюсной машине, поэтому моделирование осуществляют для числа пар полюсов  $p = 1$  [2,3,5].

При математическом моделировании электрических машин электромагнитные величины представляют в виде обобщённых пространственных векторов. Синусоидальность распределения позволяет представить МДС и пропорциональные ей токи обобщённым пространственным вектором на плоскости, перпендикулярной оси ротора. Под обобщённым вектором понимают вектор, проекции которого на оси фазных обмоток в любой момент времени равны мгновенным значениям фазных величин, представляемых этим вектором.

Так, если ток в каждой фазной обмотке трёхфазной асинхронной машины представить вектором  $(\underline{i}_a, \underline{i}_b, \underline{i}_c)$  модуль которого равен мгновенному значению фазного тока  $(i_a, i_b, i_c)$ , а направление совпадает с осью обмотки, и сложить эти векторы, то получим пространственный вектор тока  $(3/2)\underline{i}$ . Его модуль будет в 3/2 раза больше модуля вектора тока  $\underline{i}$ , проекции которого на оси фазных обмоток равны мгновенным значениям токов  $i_a, i_b, i_c$  (рис. 1). Таким образом, для того, чтобы вектор, полученный сложением фазных векторов, соответствовал данному выше определению пространственного вектора, его необходимо умножить на 2/3. На комплексной плоскости обобщённый вектор тока ( $\underline{a} = e^{j2\pi/3}$  – оператор поворота на  $120^\circ$ ) [2,5]

$$\underline{i} = \frac{2}{3}j(i_a + ai_b + a^2i_c).$$

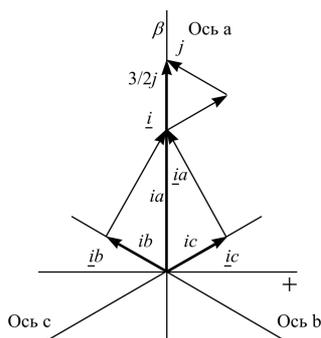


Рисунок 1 - К определению обобщенного вектора тока

Обобщённый вектор трёхфазных токов  $i_a = I_m \sin wt$ ,  $i_b = I_m \sin(wt - 120^0)$ ,  $i_c = I_m \sin(wt + 120^0)$

$$\begin{aligned} \underline{i} &= j \frac{2I_m}{3} [\sin wt + (\sin wt - 120^0)a + (\sin wt + 120^0)a^2] = \\ &= j \frac{2I_m}{3} [\sin wt + \sin wt \cos 120^0 \cdot a - \cos wt \sin 120^0 \cdot a + \sin wt \cos 120^0 \cdot a^2 + \cos wt \sin 120^0 a^2] = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= j \frac{2I_m}{3} (\sin wt - \frac{1}{2} \sin wt \cdot a - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos wt \cdot a - \frac{1}{2} \sin wt \cdot a^2 + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos wt \cdot a^2) = \\ &= j \frac{2I_m}{3} (\sin wt (1 - \frac{1}{2} \cdot (a + a^2)) - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos wt (a - a^2)) = \\ &= j \frac{2I_m}{3} (\frac{3}{2} \sin wt - j \frac{3}{2} \cos wt) = I_m (\sin wt - j \cos wt) = \\ &= jI_m \frac{1}{2} (\frac{1}{j} e^{j\omega t} - \frac{1}{j} e^{-j\omega t} - j e^{j\omega t} - j e^{-j\omega t}) = I_m e^{j\omega t}. \end{aligned}$$

Пропорциональные токам фазных обмоток определяется МДС:

$$\begin{aligned} F_a &= F_{am} \sin wt; \\ F_b &= F_{bm} \sin(wt - 120^0); \\ F_c &= F_{cm} \sin(wt + 120^0), \end{aligned}$$

где  $F_{am}$ ,  $F_{bm}$  и  $F_{cm}$  – амплитуды МДС на оси фазных обмоток.

Обобщённый вектор МДС трёхфазной статорной обмотки

$$\underline{F} = F_m e^{j\omega t},$$

как и обобщённый вектор тока, вращается с угловой скоростью  $\omega$ .

При смещении симметричных фазных обмоток на  $120^0$  и учитывая, что  $F_{am} = -(F_{bm} + F_{cm})$ , МДС трёхфазной статорной обмотки

$$\begin{aligned} F_{1m} &= F_{am} + F_{bm} \cos 120^0 + F_{cm} \cos 240^0 = -F_{bm} - F_{cm} + F_{bm} \cos 120^0 + F_{cm} \cos 240^0 = \\ &= -F_{bm} (1 - \cos 120^0) - F_{cm} (1 - \cos 240^0) = -F_{bm} \left(1 + \frac{1}{2}\right) - F_{cm} \left(1 + \frac{1}{2}\right) = \frac{3}{2} F_{am}. \end{aligned}$$

В векторной форме МДС трёхфазной обмотки  $\underline{F}_1 = 1,5 F_{1m} e^{j\omega t}$ .

Со статорной фазной обмоткой фазы «а» сцепляются магнитные потоки, создаваемые током самой обмоткой и магнитные потоки, создаваемые токами других фазных обмоток. Часть магнитного потока, создаваемого фазной обмоткой и сцепляющиеся с ее витками, называется потоком рассеяния. Индуктивность, связывающая поток рассеяния обмотки с протекающим в ней током, называется индуктивностью рассеяния  $L_{1\sigma}$ . Другая часть магнитного потока, помимо витков самой обмотки охватывает также витки других обмоток и называется основным магнитным потоком. Индуктивность, определяющая потокосцепление с основным потоком называется основной индуктивностью  $l_m$ .

При отсутствии токов в обмотках ротора потокосцепление статорной фазной обмотки «а»

$$\Psi_{11a} = L_{1\sigma} i_{1a} + l_m i_{1a} + M_{ab} i_{1b} + M_{ac} i_{1c},$$

где  $M_{ab}$  и  $M_{ac}$  – взаимные индуктивности фазных статорных обмоток.

При двух одинаковых фазных обмотках, совпадении их осей и равенстве токов магнитный поток, создаваемый током второй обмотки и сцепляющийся с витками первой обмотки, будет идентичен потоку, создаваемому первой обмоткой и сцепляющейся с витками второй обмотки. При этих условиях картина магнитного поля будет одинаковой независимо от того, по какой из обмоток протекает ток, то есть основная индуктивность  $l_m$  будет равна взаимной индуктивности  $M_0$ .

Смещение фазных обмоток на угол  $\delta$  вызовет изменение их взаимной индуктивности  $M = M_0 \cos \delta = l_m \cos \delta$ . Для симметричных трёхфазных токов

$i_a + i_b + i_c = 0$  или  $i_b + i_c = -i_a$ , и учитывая, что  $\delta_b = 2\pi/3$  и  $\delta_c = -2\pi/3$ , выражение для потокосцепления фазной статорной обмотки «а» (аналогично и для потокосцеплений других фазных обмоток) можно представить в виде

$$\begin{aligned} \Psi_{11a} &= L_{s1}i_a + l_m i_a + l_m (\cos \frac{2p}{3})i_b + l_m (\cos \frac{4p}{3})i_c = \\ &= L_{s1}i_a - l_m i_b - l_m i_c + l_m (\cos \frac{2p}{3})i_b + l_m (\cos \frac{4p}{3})i_c = \\ &= L_{s1}i_a - l_m i_b (1 + \frac{1}{2}) - l_m i_c (1 + \frac{1}{2}) = L_{s1}i_a - \frac{3}{2} l_m (i_b + i_c) = \\ &= L_{s1}i_a + \frac{3}{2} l_m i_a = i_a (L_{s1} + \frac{3}{2} l_m) = i_a (L_{s1} + M) = i_a L_1; \end{aligned}$$

$$\Psi_{11b} = i_b L_1;$$

$$\Psi_{11c} = i_c L_1.$$

Индуктивность  $L_1$  включает индуктивность от потока рассеяния  $L_{\sigma 1}$ , индуктивность от части основного потока, созданного самой обмоткой  $l_m$ , и индуктивность от части основного потока, созданной двумя другими обмотками  $l_m/2$ . Таким образом, полная взаимная индуктивность  $M$  статорной обмотки от основного магнитного потока в  $3/2$  раза больше ее основной индуктивности  $l_m$  ( $M = 1,5 l_m$ ).

Обобщённый вектор потокосцепления статора при сложении фазных проекций и при отсутствии токов ротора

$$\underline{\Psi}_{11} = \frac{2}{3} (\Psi_{11a} + \Psi_{11b} \mathbf{a} + \Psi_{11c} \mathbf{a}^2) = \frac{2}{3} (L_1 i_a + L_1 i_b \mathbf{a} + L_1 i_c \mathbf{a}^2) = L_1 i_1.$$

Наличие токов в обмотках ротора приводит к появлению дополнительных потокосцеплений. Если ось обмотки ротора фазы «а» смещена на угол  $\gamma$  относительно оси обмотки статора фазы «а» (рис. 2), то взаимные индуктивности обмоток ротора и фазы «а» статора:

$$M_{aa} = M_{0a} \cos \gamma;$$

$$M_{ba} = M_{0b} \cos(\gamma + \cos 120^0);$$

$$M_{ca} = M_{0c} \cos(\gamma - 120^0),$$

где  $M_{0a}$ ,  $M_{0b}$ ,  $M_{0c}$  – взаимные индуктивности при  $\gamma = 0$ .

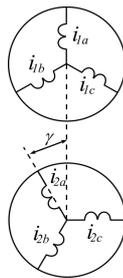


Рисунок 2 - Положение осей обмоток статора и ротора

Взаимная индуктивность обмоток статора и ротора при совпадении их осей равна  $l_m$ , и картина магнитного поля будет той же, что и при совпадении осей статорных обмоток. Поэтому:

$$M_{0a} = M_{0b} = M_{0c} = M_0 = l_m;$$

$$M_{aa} = l_m \cos \gamma, M_{ba} = l_m \cos(\gamma + 2\pi/3);$$

$$M_{ca} = l_m \cos(\gamma - 2\pi/3).$$

Полное потокосцепление статорной обмотки фазы «a» при наличии токов ротора (и по аналогии для других фаз):

$$y_{12a} = M_{aa}i_{2a} + M_{ba}i_{2b} + M_{ca}i_{2c} = 3/2 l_m i_{2a} \cos g = M i_{2a} \cos g ;$$

$$y_{12b} = M_{ab}i_{2a} + M_{bb}i_{2b} + M_{cb}i_{2c} = M i_{2b} \cos(g + 2p / 3);$$

$$y_{12c} = M_{ac}i_{2a} + M_{bc}i_{2b} + M_{cc}i_{2c} = M i_{2c} \cos(g - 2p / 3).$$

Вектор потокосцепления статора с ротором

$$\underline{y}_{12} = \frac{2}{3}(y_{12a} + y_{12b} \mathbf{a} + y_{12c} \mathbf{a}^2) =$$

$$= \frac{2}{3} M (i_{2a} \cos g + i_{2b} \cos(g+120^0) \mathbf{a} + i_{2c} \cos(g-120^0) \mathbf{a}^2) = M i_{2e}^{jg}.$$

Общее потокосцепление статора и ротора, соответствующее режиму протекания токов по обмоткам статора и ротора:

$$\underline{y}_{11} = \underline{y}_{11} + \underline{y}_{12} = L_1 i_1 + M i_{2e}^{jg}.$$

Аналогичное выражение справедливо и для потокосцепления ротора. Для ротора угол  $\gamma$  будет отрицательным, так как по отношению к статору этот угол отсчитывается в обратном направлении,

$$\underline{y}_{22} = \underline{y}_{22} + \underline{y}_{21} = L_2 i_2 + M i_{1e}^{-jg}.$$

Вектор тока статора записан в неподвижной системе координат  $\alpha\beta$ , связанной со статором, а вектор тока ротора записан во вращающейся (смещенной на текущий угол  $\gamma$ ) системе координат  $xу$ , связанной с ротором. В записи с индексами систем координат

$$\underline{y}_1^{(a,b)} = L_1 \dot{i}_1^{(ab)} + L_m \dot{i}_2^{(xy)} e^{jg} = L_1 \dot{i}_1^{(ab)} + L_m \dot{i}_2^{(ab)}$$

или, если обе части умножить на  $e^{-j\gamma}$ , то

$$\underline{y}_1^{(a,b)} e^{-jg} = \underline{y}_1^{(xy)} = L_1 \dot{i}_1^{(ab)} e^{-jg} + L_m \dot{i}_2^{(xy)} e^{jg} e^{-jg} = L_1 \dot{i}_1^{(xy)} + L_m \dot{i}_2^{(xy)}$$

Таким образом, форма записи уравнений обобщённых векторов потокоцеплений не зависит от выбора системы координат. В одинаковых системах координат выражения для потокоцепления имеют одинаковую форму и индексы систем в них можно опустить. Потокоцепления статора и ротора с учетом всех токов и независимо от выбранной системы координат запишутся в виде:

$$\begin{aligned} \underline{y}_1 &= L_1 \dot{i}_1 + M \dot{i}_2 = \underline{y}_{11} + \underline{y}_{12}; \\ \underline{y}_2 &= M \dot{i}_1 + L_2 \dot{i}_2 = \underline{y}_{21} + \underline{y}_{22}. \end{aligned}$$

Согласно последним выражениям потокоцепления статора и ротора раскладываются на составляющие, обусловленные собственным током ( $\psi_{11}$  и  $\psi_{22}$ ) и током другой части двигателя ( $\psi_{12}$  и  $\psi_{21}$ ).

Векторную сумму токов статора и ротора образует результирующий ток - ток намагничивания  $\dot{i}_\mu$ , и потокоцепления статора и ротора можно представить через основной магнитный поток и через потоки рассеяния:

$$\underline{y}_m = M(\dot{i}_1 + \dot{i}_2) = M \dot{i}_m;$$

$$\underline{y}_{1s} = L_{1s} \dot{i}_1;$$

$$\underline{y}_{2s} = L_{2s} \dot{i}_2$$

в виде:

$$\underline{y}_1 = L_1 \dot{i}_1 + M \dot{i}_2 = (L_{1s} + M) \dot{i}_1 + M \dot{i}_2 = L_{1s} \dot{i}_1 + M \dot{i}_m = \underline{y}_{1s} + \underline{y}_m;$$

$$\underline{y}_2 = M \dot{i}_1 + L_2 \dot{i}_2 = (L_{2s} + M) \dot{i}_2 + M \dot{i}_1 = L_{2s} \dot{i}_2 + M \dot{i}_m = \underline{y}_{2s} + \underline{y}_m.$$

Для фазных напряжений статорной обмотки справедливы выражения:

$$u_{1a} = i_{1a}R_1 + \frac{dy_{1a}}{dt};$$

$$u_{1b} = i_{1b}R_1 + \frac{dy_{1b}}{dt};$$

$$u_{1c} = i_{1c}R_1 + \frac{dy_{1c}}{dt},$$

где  $R_1$  - активное сопротивление статорной обмотки.

Умножив второе уравнение на  $a$ , третье уравнение на  $a^2$ , затем складывая все три уравнения и умножая их правую и левую части на  $2/3$

$$\frac{2}{3}(u_{1a} + u_{1b}a + u_{1c}a^2) = \frac{2}{3}(i_{1a} + i_{1b}a + i_{1c}a^2)R_1 + \frac{2}{3} \frac{d}{dt}(y_{1a} + y_{1b}a + y_{1c}a^2),$$

получим в векторной форме

$$\underline{u}_1 = i_1R_1 + \frac{dy_1}{dt}.$$

Аналогичное выражение для ротора в системе координат  $xu$

$$\underline{u}_2 = i_2R_2 + \frac{dy_2}{dt}.$$

Для перевода уравнения ротора в неподвижную систему координат  $\alpha\beta$  умножим обе части уравнения ротора на  $e^{j\theta}$  при текущем угле поворота системы координат  $\theta$  (рис. 3) и представим в производной вектор потокосцепления ротора в новой системе координат как

$$y_2^{(xy)} = y_2^{(ab)}e^{-jq}.$$

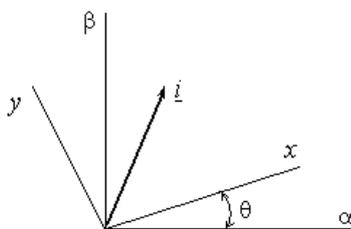


Рисунок 3 - Вектор тока в разных системах координат

После преобразований

$$e^{jq} \underline{u}_2^{(xy)} = e^{jq} i_2^{(xy)} R_2 + e^{jq} \frac{dy_2^{(xy)}}{dt} = e^{jq} i_2^{(xy)} R_2 + e^{jq} \frac{d(e^{-jq} \underline{y}_2^{(ab)})}{dt},$$

опуская индексы координатной системы, получим уравнение напряжения для ротора в неподвижной системе координат

$$\underline{u}_2 = i_2 R_2 + \frac{dy_2}{dt} - j \frac{dq}{dt} \underline{y}_2 = i_2 R_2 + \frac{dy_2}{dt} - j \omega_2 \underline{y}_2,$$

где  $\omega_2 = d\theta/dt$  – текущая угловая скорость ротора.

Переход от системы координат  $xу$  к системе координат  $\alpha\beta$  привел к разложению ЭДС в уравнении ротора на две составляющие. Первая составляющая  $d\psi_2/dt$  связана с изменением потокосцепления вследствие изменения во времени токов и называется ЭДС трансформации. Вторая составляющая  $\omega\psi_2$  связана с изменением потокосцепления вследствие вращения ротора и называется ЭДС вращения:

$$\begin{aligned} \underline{u}_1 &= i_1 R_1 + \frac{dy_1}{dt} = i_1 R_1 + L_{s1} \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_m}{dt}; \\ \underline{u}_2 &= i_2 R_2 + \frac{dy_2}{dt} - j \omega_2 \underline{y}_2 = i_2 R_2 + L_{s2} \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_m}{dt} - j \omega_2 L_{s2} i_2 - j \omega_2 M i_m. \end{aligned}$$

Эти же уравнения в виде комплексных амплитуд:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{1m} e^{j\omega t} &= R_1 \underline{I}_{1m} e^{j\omega t} + L_{s1} \frac{d}{dt} \underline{I}_{1m} e^{j\omega t} + M \frac{d}{dt} \underline{I}_{mm} e^{j\omega t}; \\ \underline{U}_{2m} e^{j\omega t} &= R_2 \underline{I}_{2m} e^{j\omega t} + L_{s2} \frac{d}{dt} \underline{I}_{2m} e^{j\omega t} + M \frac{d}{dt} \underline{I}_{mm} e^{j\omega t} - \\ &- j \omega_2 L_{s2} \underline{I}_{2m} e^{j\omega t} - j \omega_2 M \underline{I}_{mm} e^{j\omega t}. \end{aligned}$$

Производная от  $e^{j\omega t}$  составляет  $j\omega e^{j\omega t}$  и при замене оператора дифференцирования  $d/dt$  на  $j\omega$ :

$$\begin{aligned} \underline{U}_{1m} e^{j\omega t} &= R_1 \underline{I}_{1m} e^{j\omega t} + j\omega L_{s1} \underline{I}_{1m} e^{j\omega t} + j\omega M \underline{I}_{mm} e^{j\omega t}; \\ \underline{U}_{2m} e^{j\omega t} &= R_2 \underline{I}_{2m} e^{j\omega t} + j\omega L_{s2} \underline{I}_{2m} e^{j\omega t} + j\omega M \underline{I}_{mm} e^{j\omega t} - \\ &- j \omega_2 L_{s2} \underline{I}_{2m} e^{j\omega t} - j \omega_2 M \underline{I}_{mm} e^{j\omega t}, \end{aligned}$$

или, сокращая все части уравнений на  $e^{j\omega t}$ :

$$\begin{aligned} \underline{U}_{1m} &= R_1 \underline{I}_{1m} + j\omega L_{s1} \underline{I}_{1m} + j\omega M \underline{I}_{mm}; \\ \underline{U}_{2m} &= R_2 \underline{I}_{2m} + j\omega L_{s2} \underline{I}_{2m} + j\omega M \underline{I}_{mm} - j \omega_2 L_{s2} \underline{I}_{2m} - j \omega_2 M \underline{I}_{mm}. \end{aligned}$$

Пометив со штрихом приведённые к статору ток и параметры короткозамкнутого ротора ( $U_2 = 0$ ), получаем:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{I}_1 R_1 + j\omega L_{s1} \underline{I}_1 + j\omega M \underline{I}_m; \\ 0 &= \underline{I}'_2 R'_2 + j\omega L_{s2} \underline{I}'_2 + j\omega M \underline{I}_m - j\omega_2 L_{s2} \underline{I}'_2 - j\omega_2 M \underline{I}_m. \end{aligned}$$

Для двухполюсной машины  $\omega_1 = \omega = 2\pi f$ , следовательно:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{I}_1 R_1 + j\omega L_{s1} \underline{I}_1 + j\omega M \underline{I}_m; \\ 0 &= \underline{I}'_2 R'_2 + j\omega L_{s2} \underline{I}'_2 + j\omega M \underline{I}_m - j\omega L_{s2} \underline{I}'_2 \frac{\omega_2}{\omega} - j\omega M \underline{I}_m \frac{\omega_2}{\omega}, \end{aligned}$$

или:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{I}_1 R_1 + j\omega L_{s1} \underline{I}_1 + j\omega M \underline{I}_m; \\ 0 &= \underline{I}'_2 R'_2 + j\omega L_{s2} \underline{I}'_2 \left(1 - \frac{\omega_2}{\omega}\right) + j\omega M \underline{I}_m \left(1 - \frac{\omega_2}{\omega}\right). \end{aligned}$$

Имея в виду, что  $1 - \omega_2/\omega = s$  - скольжение ротора, получаем:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{I}_1 R_1 + j\omega L_{s1} \underline{I}_1 + j\omega M \underline{I}_m; \\ 0 &= \underline{I}'_2 R'_2 + j\omega L_{s2} \underline{I}'_2 s + j\omega M \underline{I}_m s, \end{aligned}$$

и математическую модель асинхронного двигателя имеет вид:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{I}_1 R_1 + jx_1 \underline{I}_1 + jx_m \underline{I}_m; \\ 0 &= \underline{I}'_2 \frac{R'_2}{s} + jx'_2 \underline{I}'_2 + jx_m \underline{I}_m. \end{aligned}$$

Математической модели отвечает электрическая схема замещения асинхронной машины (рис. 4,  $U = U_1$ ). По расположению параметров её называют Т образной схемой замещения.

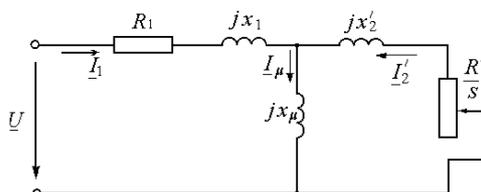


Рисунок 4 - Т - образная схема замещения асинхронной ашины

Без существенной погрешности ветвь намагничивания можно вынести на вход схемы замещения (рис. 5). Эту схему замещения по расположению параметров называют Г образной.

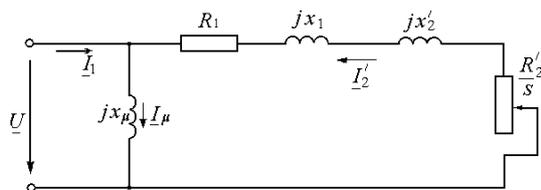


Рисунок 5 - Г - образная схема замещения асинхронной машины

Для реальной  $m$  фазной асинхронной машины с  $wk_{об}$  эффективными витками на фазу статорной обмотки ( $k_{об}$  – обмоточный коэффициент) и  $w_2k_{об2}$  эффективными витками на фазу  $m_2 = Z_2$  фазной роторной обмотки ( $Z_2$  - число пазов ротора,  $k_{об2}$  обмоточный коэффициент) приведённые к статору ток и сопротивления ротора:

$$I_2' = I_2/k_i; R_2' = R_2k; x_2' = x_2/k,$$

где  $k_i = mwk_{об}/m_2w_2k_{об2}$  - коэффициент приведения тока;  $k = mw^2k_{об}^2/m_2w_2^2k_{об2}^2$  - коэффициент приведения сопротивлений.

Согласно схемам замещения ток ротора ( $x_k = x_1 + x_2'$ )

$$I_2' = \frac{U}{\sqrt{(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + x_k^2}}.$$

Электромагнитной мощности

$$P_{эм} = m(I_2')^2 \frac{R_2'}{s} = \frac{mU^2 \frac{R_2'}{s}}{(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + x_k^2}$$

отвечает электромагнитный момент (в общем случае  $\omega_1 = \omega/p$ )

$$M = \frac{P_{эм}}{\omega_1} = \frac{mU^2 \frac{R_2'}{s}}{w_1 \left[ (R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + x_k^2 \right]} = \frac{mU^2 R_2' s}{w_1 \left[ (sR_1 + R_2')^2 + s^2 x_k^2 \right]}.$$

Приравнивая нулю производную

$$\begin{aligned} \frac{dM}{ds} &= \frac{mU^2 R_2'}{w_1} \cdot \frac{s^2 R_1^2 + 2sR_1 R_2' + R_2'^2 + s^2 x_k^2 - 2s^2 R_1^2 - s2R_1 R_2' - 2s^2 x_k^2}{\left[ \left( R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + x_k^2 \right]^2} = \\ &= \frac{mU^2 R_2'}{w_1} \cdot \frac{-s^2 R_1^2 + R_2'^2 - s^2 x_k^2}{\left[ (sR_1 + R_2')^2 + s^2 x_k^2 \right]^2} = 0, \end{aligned}$$

находим критическое скольжение  $s_k = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + x_k^2}}$ ,

а по нему и максимальный электромагнитный момент:

$$M_m = \pm \frac{mU^2 \sqrt{R_1^2 + x_k^2}}{w_1 \left[ \left( R_1 + (\pm \sqrt{R_1^2 + x_k^2}) \right)^2 + x_k^2 \right]} = \pm \frac{mU^2}{2w_1 \left[ \pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + x_k^2} \right]},$$

где знак «+» относится к двигательному режиму работы асинхронной машины, а знак «-» - к генераторному режиму её работы (рис. 6).

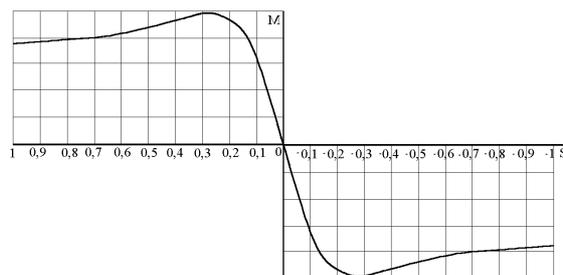


Рисунок 6 - Зависимость  $M_{эм} = f(s)$  асинхронной машины

В генераторном режиме работы асинхронной машины со скольжением  $s < 0$  активная составляющая тока ротора меняет знак

$$I_{2a} = I_2 \cos \gamma_2 = I_2 \frac{R_2 / s}{\sqrt{(R_2 / s)^2 + x_2^2}}$$

и тормозной момент генератора уравнивает момент приводного двигателя.

Реактивная составляющая тока ротора не зависит от знака скольжения

$$I_{2p} = I_2 \sin \gamma_2 = I_2 \frac{x_2}{\sqrt{(R_2 / s)^2 + x_2^2}},$$

и асинхронный генератор, как и асинхронный двигатель, является потребителем реактивной мощности.

В автономных электростанциях источником реактивной мощности для асинхронного генератора служат конденсаторы. Процесс самовозбуждения генератора при наличии остаточного магнитного поля подобен физическому процессу в последовательном колебательном контуре из индуктивности  $L$ , конденсатора  $C$  и сопротивления  $R$

$$L \frac{d^2 q_t}{dt^2} + R \frac{dq_t}{dt} + \frac{q_t}{C} = -e_t,$$

где  $q_t$  и  $e_t$  – заряд на обкладках конденсатора и ЭДС контура.

Установившееся значение ЭДС определяет пересечение характеристики намагничивания генератора с вольтамперной характеристикой конденсатора (рис. 7). Ток возбуждения генератора  $I_\mu = E/x_\mu$ .

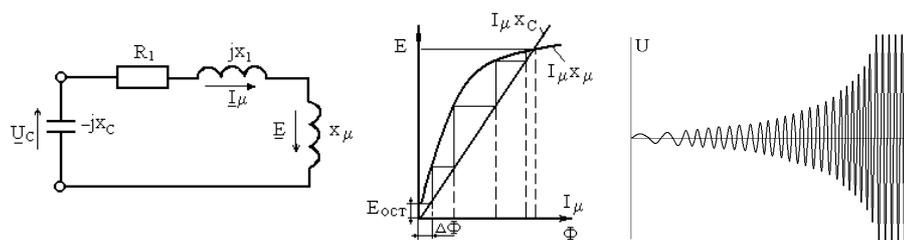


Рисунок 7 - К процессу самовозбуждения асинхронного генератора ( $s \approx 0$ )

В установившемся режиме работы балансу энергий электрического поля конденсатора и магнитного поля асинхронного генератора отвечает частота электромагнитных колебаний

$$f = \frac{1}{2p} \sqrt{\frac{1}{LC}}.$$

## 2 Параметры асинхронных генераторов

Статорные обмотки асинхронных генераторов, как любых асинхронных машин состоят из катушечных групп с числом катушек  $q = Z/2pt$ , а их МДС можно представить в виде множества гармоник  $n$  с амплитудами  $F_{vm}$ .

Качество МДС оценивают по минимальной величине коэффициента дифференциального рассеяния [1]

$$t_{\delta} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} F_{nm}^2}{F_m^2} - 1,$$

где  $F_m$  - амплитуда основной гармоники  $n = p$ .

Распределение ампер-проводников  $A_x$  обмотки по пазам статора вполне определено, и, принимая радиус статора за единицу, МДС можно представить в виде

$$F_x e^{j(wt+jx)} = \int_x A_x e^{j(wt+jx)} dx = e^{jw t} \int_x A_x e^{jx} dx,$$

где  $j_{(x)}$  - фаза  $I_{1m} N$  проводников в пазу с координатой  $x$ .

Суммирование векторов  $A_x e^{jwx}$  на периоде МДС образует замкнутую фигуру – диаграмму Гёргеса, по которой определяют значение  $\tau_{\delta}$ . Для основной гармоники МДС обмотки с  $N = 2mw/Z$  проводниками в пазу диаграмма Гёргеса является окружностью радиусом

$$R_p = F_m = \frac{ZNI_{1m}k_{o\delta}}{2pp}.$$

Принимая  $I_{1m}N = 1$ ,

$$R_p = \frac{Zk_{o\delta}}{2pp}$$

и коэффициент дифференциального рассеяния  $t_{\delta} = \frac{R_{\delta}^2}{R_p^2} - 1$ ,

где  $R_{\delta}^2$  - полярный момент инерции пазовых точек диаграммы Гёргеса.

Результирующей амплитуде основной гармоники МДС обмоток статора и ротора  $F_{0m}$  отвечает индукция в воздушном зазоре

$$B_d = \frac{m_0}{k_d d k_m} F_{0m},$$

а индукции – намагничивающий ток

$$I_m = \frac{B_d p p k_d d k_m}{m \sqrt{2 k_{об}} w m_0},$$

где  $k_d$  - коэффициент воздушного зазора;  $k_m$  - коэффициент насыщения магнитной цепи;  $m_0$  - магнитная постоянная.

Магнитный поток основной гармоники  $\Phi = B_d D l / p$ , перемещаясь с линейной скоростью  $2 t f$  ( $D$  и  $l$  – внутренний диаметр и длина статора;  $t = p D / 2 p$  - полюсное деление статора) относительно  $2 w k_{об}$  эффективных проводников статорной обмотки наводит в них ЭДС

$$E = \frac{B_d}{\sqrt{2}} l 2 t f 2 w k_{об} = \frac{\Phi p}{\sqrt{2}} f 2 w k_{об} = 4,44 f w k_{об} \Phi.$$

По ЭДС рассчитывают число витков обмотки на номинальное фазное напряжение  $U_n$

$$w = \frac{E}{4,44 f k_{об} \Phi} = \frac{k_e U_n}{4,44 f k_{об} \Phi},$$

где  $k_e \approx 1 - 75 p^2 d / Z D$  - эмпирический коэффициент, учитывающий падение напряжения на обмотке при номинальной нагрузке.

Наряду с основным потоком токи обмоток статора и ротора создают потоки рассеяния, определяющие индуктивные сопротивления обмоток. Индуктивное сопротивление однослойной и двухслойной статорной обмотки:

$$x_1 = 4 p f m_0 \frac{w^2}{p} \left[ \frac{l}{q} + (0,67 l_n - 0,43 \frac{p D}{2 p}) \right] + t_\sigma x_m;$$

$$x_1 = 4 p f m_0 \frac{w^2}{p} \left( \frac{l}{q} \cdot \frac{3 b + 1}{4} + 0,57 \frac{3 b - 1}{2} \frac{p D}{2 p} \right) + t_\sigma x_m,$$

где:  $l_n$  - длина лобовой части витка;  $b$  - степень укорочения шага;

$$x_m = \frac{E}{I_m} = 2 f \frac{m m_0 D l w^2 k_{об}^2}{p^2 d k_d k_m} - \text{сопротивление взаимоиндукции.}$$

Омическое сопротивление статорной обмотки с  $a$  параллельными ветвями определяет средняя длина витка  $l_v$  (м), сечение провода  $S$  (мм<sup>2</sup>),

удельное сопротивление меди ( $\rho = 0,0174 \text{ Ом}\cdot\text{м}/\text{мм}^2$  при  $20^\circ\text{C}$ ) и температурный коэффициент сопротивления (для меди  $\alpha = 0,0041/^\circ\text{C}$ ).

Активное сопротивление статорной обмотки для расчётной температуры  $75^\circ\text{C}$  и частоты тока  $f = 50 \text{ Гц}$   $R_1 = 0,0223 I_{\text{св}}/anS$ .

Фазную обмотку ротора составляют стержень и два элемента замыкающих колец (рис. 8,  $I_{c1} = I_{c2} = \dots = I_2$  и  $I_{12} = I_{23} = \dots = I_{\text{кл}}$ ).

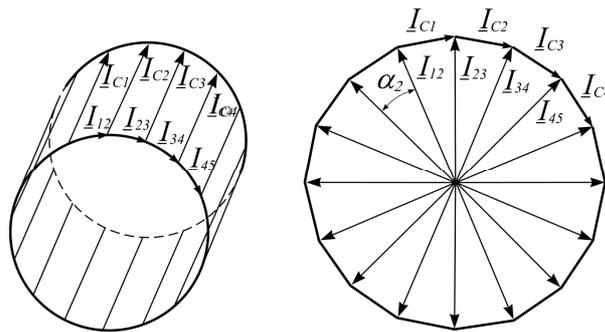


Рисунок 8 - Схема токов в стержнях и в элементах замыкающих колец

При расчёте активного сопротивления роторной обмотки  $R_2$  сопротивление элементов замыкающих колец  $2R_{\text{кл}}$  приводят к сопротивлению стержня  $R_c$ .

При фазовом сдвиге токов в стержнях  $\varphi_2 = 2\pi p/Z_2$  ток в элементе замыкающего кольца  $I_{\text{кл}} = I_2 / 2 \sin(p p/Z_2)$  и

$$R_2 = R_c + \frac{R_{\text{кл}}}{2(\sin \frac{p p}{Z_2})^2}.$$

Индуктивное сопротивление роторной обмотки:

$$x_2 = 2p f m_0 (l + 2l_{\text{л2}} \frac{2,3D_{\text{к}}}{Z_2 l (2 \sin \frac{p p}{Z_2})^2} \lg \frac{4,7D_{\text{к}}}{2h_{\text{к}} + b_{\text{к}}} + t_{2\sigma} \frac{DlZ_2 k_{\text{об2}}^2}{4pd k_d k_m p^2}),$$

где  $D_{\text{к}}$ ,  $h_{\text{к}}$ ,  $b_{\text{к}}$  и  $l_{\text{л2}}$  – средний диаметр, высота, ширина и длина элемента замыкающих колец;

$$t_{2\sigma} = \frac{(p p)^2}{(k_{\text{об2}} Z_2 \sin \frac{p p}{Z_2})^2} - 1$$

- коэффициент дифференциального рассеяния.

Соответственно для гармоники  $n$ :

$$R_{2n} = R_c + \frac{R_{кл}}{2(\sin \frac{pn}{Z_2})^2};$$

$$x_{2n} \approx 2pfm_0(l + t_{2on} \frac{DlZ_2k_{об2n}^2}{4pdk_dk_m n^2});$$

$$t_{2on} = \frac{(pn)^2}{(k_{об2n}Z_2 \sin \frac{pn}{Z_2})^2} - 1.$$

Для высших гармоник  $R_{2v} \approx R_c$ .

Действие гармоники  $n$  оценивают по параметрам, приведённым к роторной обмотке (рис. 9).

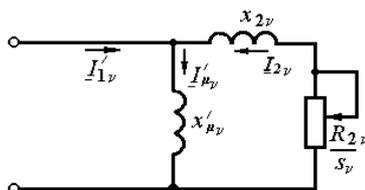


Рисунок 9 - Схема замещения для  $n$ -й гармоники

На схеме замещения:

$$x'_{mm} = 2pf \frac{Z_2 D l k_{об2n}^2}{k_d d k_m n^2} \cdot 10^{-7}; \quad I'_{1n} = I_1 k_{in}; \quad I'_{mn} = I'_{1n} + I_{2n};$$

$$(R_{2n} + js_n x_{2n}) I_{2n} + js_n x'_{mn} I'_{mn} = 0;$$

$$I_{2n} = \frac{k_{in} x'_{mn} s_n}{\sqrt{R_{2n}^2 + s_n^2 (x'_{mn} + x_{2n})^2}} I_1,$$

где  $k_{in} = 2mwk_{обn} / Z_2 k_{об2n}$  - коэффициент приведения тока статора к току ротора  $n$ -й гармоники.

Электромагнитный момент от гармоники  $n$

$$M_n = \frac{Z_2 R_{2n} n (k_{in} x'_{mn})^2 s_n}{w R_{2n}^2 + w s_n^2 (x'_{mn} + x_{2n})^2} I_1^2.$$

Электромагнитный момент от основной гармоники

$$M = \frac{Z_2 I_2^2 R_2 p}{s w} = \frac{Z_2 R_2 p (k_i x_m')^2 s}{w R_2^2 + w s^2 (x_m' + x_2)^2} I_1^2,$$

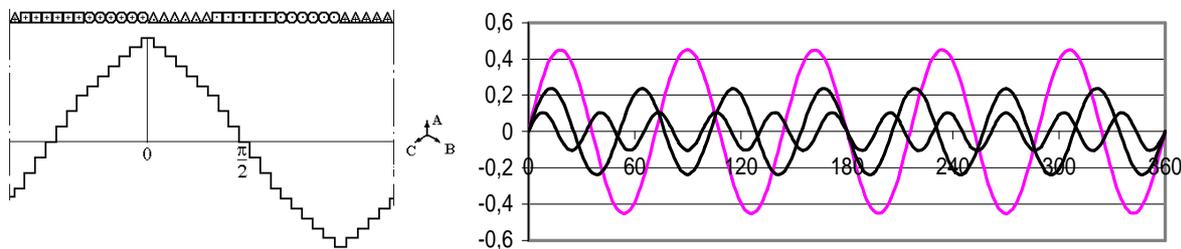
где  $x_m' = 2 p f \frac{Z_2 D l k_{об2}^2}{k_d d k_m p^2} \cdot 10^{-7}$

- приведённое к ротору сопротивление взаимной индукции.

**Анализ параметров.** Оценим действие выраженной высшей обратной гармонической гармоники  $\nu = 5$  для генератора на базе асинхронного двигателя АИР112М2. Данные АИР112М2:  $D = 108$  мм;  $l = 125$  мм;  $I_{1н} = 14,7$  А;  $\cos \phi_n = 0,88$ ;  $w = 108$ ;  $R_1 = 0,70$  Ом;  $B_d = 0,71$  Тл;  $k_m = 1,75$ ;  $\delta = 0,6$  мм;  $k_d = 1,2$ ;  $Z_2 = 28$ ;  $b_{ск} = 9,4$  мм;  $\beta = 10^0$ ;  $D_k = 0,097$  м;  $h_k = 0,022$  м;  $b_k = 0,019$  м;  $l_{л2} = 0,011$  м;  $P_{эл1} = 402$  Вт – потери в статорной обмотке;  $P_{эл2} = 208$  Вт - потери в роторной обмотке;  $P_c = 274$  Вт – потери в стали;  $P_m = 121$  Вт - потери механические.

Амплитуды гармоник в долях малых ступенек МДС (рис. 10, стороны катушек фазы А обозначены квадратами, фазы В - треугольниками и фазы С - кругами)

$$F_{nm} = \frac{4}{p} \int_0^{p/2} F_x \cos n x dx = \frac{4}{pn} (\sin n 5^0 + \sin n 15^0 + \sin n 25^0 + \sin n 35^0 + \sin n 45^0 + \sin n 55^0 + 2 \sin n 65^0 + 2 \sin n 75^0 + 2 \sin n 85^0).$$



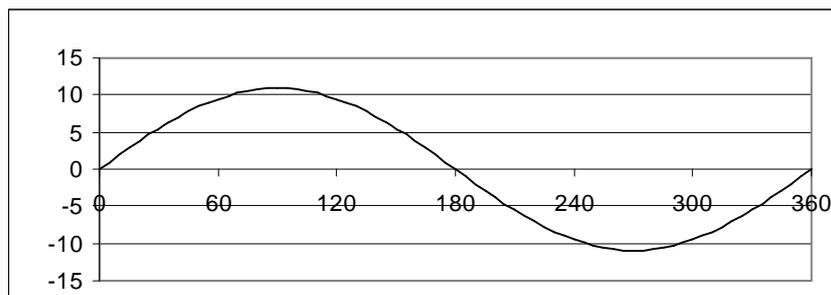


Рисунок 10 - Основная гармоника и первые высшие гармоники МДС

Потери холостого хода и активная составляющая тока холостого хода базового двигателя ( $U_n = 220$  В):

$$P_0 \approx mI_{\mu}^2 R_1 + P_c + P_m = 3 \cdot 5,1^2 \cdot 0,70 + 274 + 121 = 450 \text{ Вт};$$

$$I_{0a} = P_0/mU_n = 450/(3 \cdot 220) = 0,68 \text{ А.}$$

Ток холостого хода базового двигателя

$$I_0 \approx \sqrt{I_m^2 + I_{0a}^2} = \sqrt{5,1^2 + 0,68^2} = 5,15 \text{ А.}$$

Приведённое активное сопротивление и активное сопротивление роторной обмотки:

$$R_2' = \frac{P_{эл2}}{m(I_{1a} - I_{0a})^2} = \frac{208}{3(12,94 - 0,68)^2} = 0,47 \text{ Ом};$$

$$R_2 = R_2' / k = 0,47 / 4578 = 1,02 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$$

$$\text{где } k = mw^2 k_{o\sigma}^2 / m_2 w_2^2 k_{o\sigma 2}^2 = 3 \cdot 108^2 \cdot 0,956^2 / (28 \cdot 0,5^2 \cdot 0,999^2) = 4578.$$

Углу скоса пазов ротора  $\beta = 10^0$  соответствуют значения коэффициентов роторной обмотки и индуктивных сопротивлений:

$$k_{o\sigma 2} = \frac{\sin \frac{pb}{2}}{\frac{pb}{2}} = \frac{\sin \frac{1 \cdot 10}{2}}{1 \cdot 0,1744} = 0,999;$$

$$t_{2\sigma} = \frac{(pp)^2}{(k_{o\sigma 2} Z_2 \sin \frac{pp}{Z_2})^2} - 1 = \frac{(3,1416 \cdot 1)^2}{(0,999 \cdot 28 \sin \frac{180 \cdot 1}{28})^2} - 1 = 0,0063;$$

$$x_m' = 2pf \frac{Z_2 Dlk_{o\sigma 2}^2}{dk_d k_m p^2} = 314 \frac{28 \cdot 0,108 \cdot 0,125 \cdot 0,999^2}{0,6 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2 \cdot 1,75 \cdot 1^2} 10^{-7} = 94,3 \cdot 10^{-4} \text{ Ом};$$

$$\begin{aligned}
 x_2 &= 2pf m_0 \left( l + 2l_{n2} \frac{2,3D_\kappa}{Z_2 l (2 \sin \frac{p p}{Z_2})^2} \lg \frac{4,7D_\kappa}{2h_\kappa + b_\kappa} + t_{2\sigma} \frac{DlZ_2 k_{\sigma 2}^2}{4pd k_d k_m p^2} \right) = \\
 &= 3,94 \cdot 10^{-4} \left( 0,125 + 2 \cdot 0,011 \frac{2,3 \cdot 0,097}{28 \cdot 0,125 (2 \sin \frac{180 \cdot 1}{28})^2} \cdot \lg \frac{4,7 \cdot 0,097}{0,044 + 0,019} + \right. \\
 &\left. + 0,0063 \frac{0,108 \cdot 0,125 \cdot 28 \cdot 0,999^2}{4 \cdot 3,14 \cdot 0,6 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2 \cdot 1,75 \cdot 1^2} \right) = 1,18 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}
 \end{aligned}$$

Значения параметров и коэффициентов для гармоники  $n = 5$ :

$$R_{2v} \approx R_c = 0,9 \cdot 10^{-4} \text{ Ом;}$$

$$k_{\sigma 2v} = 0,969;$$

$$\tau_{2v} = 0,184;$$

$$x_{2v} = 1,15 \cdot 10^{-4} \text{ Ом;}$$

$$x'_{\mu v} = 3,55 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$$

При работе асинхронной машины в режиме генератора с тем же номинальным скольжением  $s_H = 0,0365$ , что и у базового двигателя, скольжение ротора генератора относительно гармоники  $n = 5$

$$|s_n| = 1 + (1 + s) \frac{n}{p} = 1 + (1 + 0,035) \frac{5}{1} = 6,175$$

Моменты от основной гармоники и от гармоники  $n = 5$ :

$$\begin{aligned}
 M &= \frac{Z_2 R_2 p \left( k_i x'_m \right)^2 s}{w R_2^2 + w s^2 \left( x'_m + x_2 \right)^2} I_{1H}^2 = \\
 &= \frac{28 \cdot 1,02 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \left( 22,15 \cdot 94,3 \cdot 10^{-4} \right)^2 \cdot 0,0365}{314 \left( 1,02 \cdot 10^{-4} \right)^2 + 314 \cdot 0,0365^2 \left( 94,3 \cdot 10^{-4} + 1,18 \cdot 10^{-4} \right)^2} 14,7^2 = 24 \text{ Нм;}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_n &= \frac{Z_2 R_{2n} n \left( k_{in} x'_{mn} \right)^2 s_n}{w R_{2n}^2 + w s_n^2 \left( x'_{mn} + x_{2n} \right)^2} I_{1H}^2 = \\
 &= \frac{28 \cdot 0,9 \cdot 10^{-4} \cdot 5 \left( 4,7 \cdot 3,55 \cdot 10^{-4} \right)^2 \cdot 6,175}{314 \cdot 0,81 \cdot 10^{-8} + 314 \cdot 6,175^2 \left( 3,55 \cdot 10^{-4} + 1,15 \cdot 10^{-4} \right)^2} 14,7^2 = \\
 &= 0,021 \text{ Нм.}
 \end{aligned}$$

где  $k_i = 2mwk_{\sigma\sigma} / Z_2 k_{\sigma\sigma 2} = 2 \cdot 3 \cdot 108 \cdot 0,956 / (28 \cdot 0,999) = 22,15$ ;

$$k_{in} = 2mwk_{обн} / Z_2k_{об2n} = 2 \cdot 3 \cdot 108 \cdot 0,197 / (28 \cdot 0,969) = 4,7.$$

- коэффициенты приведения тока для основной и для  $n$ -й гармоники.

Таким образом, дополнительное тормозное действие моментов от высших гармоник в генераторах практически не проявляется.

Дополнительные потери в роторной обмотке от гармоники  $n = 5$

$$\Delta P_{n=5} = M_n \cdot (w/n) \cdot s_n = 0,0211 \cdot (314/5) \cdot 6,175 = 8,2 \text{ Вт.}$$

### ***3 Выбор базовых асинхронных машин для проектирования асинхронных генераторов***

Ориентиром для выбора базы асинхронного генератора служит индуктивное сопротивление роторной обмотки, оказывающее размагничивающее действие на генератор при нагрузке. Сравним этот параметр для стандартных асинхронных двигателей АИР100L2 и АИР112М2 [1].

#### ***Генератор на базе асинхронного двигателя АИР112М2***

Данные АИР112М2 и расчётные значения его роторной обмотки  $R_2 = 1,02 \cdot 10^{-4}$  Ом,  $\tau_{2v} = 0,0063$ ,  $k_{об2} = 0,999$  приведены выше.

Номинальный ток ротора базового двигателя

$$I_{2н} = \sqrt{\frac{P_{эл2}}{Z_2 \cdot R_2}} = \sqrt{\frac{208}{28 \cdot 1,02 \cdot 10^{-4}}} = 270 \text{ А.}$$

Расчётным величинам ЭДС  $E = 233$  В и индукции  $B_\delta = 0,80$  Тл соответствует поток и число витков на фазу статорной обмотки:

$$\Phi = B_\delta D l / p = 0,8 \cdot 108 \cdot 125 \cdot 10^{-6} / 1 = 10,8 \cdot 10^{-3} \text{ Вб};$$

$$w = E / (222 k_{об} \Phi) = 233 / (222 \cdot 0,956 \cdot 10,8 \cdot 10^{-3}) = 102.$$

При практически квадратичной зависимости коэффициента насыщения магнитной цепи двухполюсной машины от индукции принимаем для генератора  $k_\mu \approx 2,3$ . Индуктивное сопротивление роторной обмотки и намагничивающий ток генератора:

$$x_2 = 2pfm_0(l + 2l_{\text{л2}} \frac{2,3D_{\kappa}}{Z_2 l (2 \sin \frac{pP}{Z_2})^2} \lg \frac{4,7D_{\kappa}}{2h_{\kappa} + b_{\kappa}} + t_{2\sigma} \frac{DIZ_2 k_{\sigma 2}^2}{4pd k_d k_m p^2}) =$$

$$= 3,94 \cdot 10^{-4} (0,125 + 2 \cdot 0,011 \frac{2,3 \cdot 0,097}{28 \cdot 0,125 (2 \sin \frac{180 \cdot 1}{28})^2} \cdot \lg \frac{4,7 \cdot 0,097}{0,044 + 0,019} +$$

$$+ 0,0063 \frac{0,108 \cdot 0,125 \cdot 28 \cdot 0,999^2}{4 \cdot 3,14 \cdot 0,6 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2 \cdot 2,3 \cdot 1^2}) = 1,04 \cdot 10^{-4} \text{ Ом};$$

$$I_m = \frac{B_d p p d k_d k_m}{\sqrt{2m w k_{\sigma 0} m_0}} = \frac{0,8 \cdot 3,1416 \cdot 1 \cdot 0,6 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2 \cdot 2,3}{1,414 \cdot 3 \cdot w k_{\sigma 0} \cdot 4 \cdot 3,1416 \cdot 10^{-7}} = \frac{780,8}{w k_{\sigma 0}} = \frac{1565}{k_e} =$$

$$= \frac{1565}{195,2} \approx 8 \text{ А},$$

где  $k_e = w k_{\sigma 0} / w_2 k_{\sigma 0 2} = 102 \cdot 0,956 / (0,5 \cdot 0,999) = 195,2$ .

Из выражения

$$I_{2H} \approx \frac{s_H \cdot E}{k_e \cdot R_2} = 270 \text{ А}$$

находим номинальное скольжение ( $E = 222 w k_{\sigma 0} \Phi$  и  $f = 50$  Гц)

$$s_H = \frac{275,4 \cdot 10^{-4} w k_{\sigma 0}}{E \cdot w_2 k_{\sigma 0 2}} = \frac{275,4 \cdot 10^{-4} w k_{\sigma 0}}{E \cdot 0,5 \cdot 0,999} = \frac{551,4 \cdot 10^{-4} w k_{\sigma 0}}{222 w k_{\sigma 0} \Phi} = \frac{551,4 \cdot 10^{-4}}{222 \cdot \Phi} =$$

$$= \frac{551,4 \cdot 10^{-4}}{222 \cdot 10,8 \cdot 10^{-3}} = 0,023.$$

Из следующих выражений:

$$I_{2p} = \frac{(E/k_e) \cdot x_2 \cdot s_H^2}{R_2^2 + x_2^2 s_H^2} \approx \frac{E \cdot x_2 \cdot s_H^2}{k_e \cdot R_2^2} = \frac{E \cdot 1,04 \cdot 10^{-4} \cdot s_H^2}{1565 \cdot (1,02 \cdot 10^{-4})^2} \cdot I_m = 6,39 E \cdot I_m \cdot s_H^2 =$$

$$= 6,39 E \cdot I_m \cdot 0,023^2 = 0,00338 E \cdot I_m;$$

$$\frac{I_{2p}}{I_m} = 0,00338 E; \quad \frac{I_{2p} \cdot w k_{\sigma 0}}{780,8} = 0,00338 E;$$

$$I_{2p} \cdot w k_{\sigma 0} = 2,64 E = 2,64 \cdot 222 \cdot w k_{\sigma 0} \Phi = 2,64 \cdot 222 \cdot w k_{\sigma 0} \cdot 10,8 \cdot 10^{-3}$$

находим реактивный ток ротора и его приведённое значение:

$$I_{2p} = 2,64 \cdot 222 \cdot 10,8 \cdot 10^{-3} = 6,33 \text{ А};$$

$$I'_{2p} = \frac{I_{2p}}{k_i} = \frac{6,33}{20,91} = 0,3 \text{ А},$$

где  $k_i = mwk_{о6}/m_2w_2k_{о62} = 3 \cdot 102 \cdot 0,956/(28 \cdot 0,5 \cdot 0,999) = 20,91$ .

Степень размагничивания тока ротора

$$I'_{2p} / (I_m + I'_{2p}) = 0,3 / 8,3 = 0,0365.$$

**Генератор на базе асинхронного двигателя АИР100L2.**

Данные АИР100L2:  $I_{1н} = 10,7$  А;  $\cos j_n = 0,89$ ;  $D = 89$  мм;  $l = 136$  мм;  $w = 120$ ;  $k_{о6} = 0,956$ ;  $R_1 = 0,91$  Ом;  $B_d = 0,71$  Тл;  $k_m = 1,53$ ;  $\delta = 0,35$  мм;  $k_d = 1,23$ ;  $Z/Z_2 = 24/17$ ;  $b_{ск} = 9,9$  мм;  $k_{о62} = 0,998$ ;  $\tau_{о2} = 0,0155$ ;  $D_k = 0,08$  м,  $h_k = 0,023$  м,  $b_k = 0,022$  м,  $l_{л2} = 0,014$  м;  $P_{эл1} = 300$  Вт;  $P_{эл2} = 178$  Вт;  $P_c = 180$  Вт;  $P_m = 79$  Вт.

Потери холостого хода и активная составляющая тока холостого хода базового двигателя ( $U_n = 220$  В):

$$P_0 = mI_0^2 R_1 + P_c + P_m \approx 3(I_{1н} \sin j_n)^2 R_1 + P_c + P_m = \\ = 3(10,7 \cdot 0,456)^2 0,91 + 180 + 79 = 324 \text{ Вт};$$

$$I_{0a} = P_0 / (mU_n) = 324 / (3 \cdot 220) = 0,49 \text{ А}.$$

Приведённое активное сопротивление и активное сопротивление роторной обмотки:

$$R'_2 = \frac{P_{эл2}}{m(I_{1a} - I_{0a})^2} = \frac{178}{3(9,52 - 0,49)^2} = 0,73 \text{ Ом};$$

$$R_2 = R'_2 / k = 0,73 / 9327 = 0,78 \cdot 10^{-4} \text{ Ом};$$

где  $k = mw^2 k_{о6}^2 / m_2 w_2^2 k_{о62}^2 = 3 \cdot 120^2 \cdot 0,956^2 / (17 \cdot 0,5^2 \cdot 0,998^2) = 9327$ .

Номинальный ток ротора

$$I_{2н} = \sqrt{\frac{P_{эл2}}{Z_2 \cdot R_2}} = \sqrt{\frac{178 \cdot 10^4}{17 \cdot 0,78}} = 366 \text{ А}.$$

Расчётным величинам ЭДС  $E = 233$  В и  $B_\delta = 0,80$  Тл соответствует  $k_\mu \approx 2,0$ , поток и число витков на фазу обмотки генератора:

$$\Phi = B_\delta D l / p = 0,8 \cdot 89 \cdot 136 \cdot 10^{-6} / 1 = 9,68 \cdot 10^{-3} \text{ Вб};$$

$$w = E / (222 k_{о6} \Phi) = 233 / (222 \cdot 0,956 \cdot 9,68 \cdot 10^{-3}) = 112.$$

Индуктивное сопротивление роторной обмотки генератора

$$\begin{aligned}
 x_2 &= 2pf m_0 \left( l + 2l_{n2} \frac{2,3D_\kappa}{Z_2 l (2 \sin \frac{P P}{Z_2})^2} \lg \frac{4,7D_\kappa}{2h_\kappa + b_\kappa} + t_{2\sigma} \frac{Dl Z_2 k_{o\sigma 2}^2}{4pd k_d k_m p^2} \right) = \\
 &= 3,94 \cdot 10^{-4} \cdot (0,136 + 2 \cdot 0,014 \cdot \frac{2,3 \cdot 0,08}{17 \cdot 0,136 (2 \sin \frac{180 \cdot 1}{17})^2} \cdot \lg \frac{4,7 \cdot 0,08}{0,046 + 0,022} + \\
 &+ 0,0155 \cdot \frac{17 \cdot 0,089 \cdot 0,136 \cdot 0,998^2}{4 \cdot 3,1416 \cdot 0,35 \cdot 10^{-3} \cdot 1,23 \cdot 2 \cdot 1^2} = (0,536 + 0,056 + 1,163) \cdot 10^{-4} = \\
 &= 1,76 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}
 \end{aligned}$$

Намагничивающий ток генератора

$$\begin{aligned}
 I_m &= \frac{B_d p p d k_d k_m}{\sqrt{2 m w k_{o\sigma} m_0}} = \frac{0,8 \cdot 3,1416 \cdot 1 \cdot 0,35 \cdot 10^{-3} \cdot 1,23 \cdot 2}{1,414 \cdot 3 \cdot w k_{o\sigma} \cdot 4 \cdot 3,1416 \cdot 10^{-7}} = \frac{406}{w k_{o\sigma}} = \frac{813,6}{k_e} = \\
 &= \frac{813,6}{214,6} \approx 3,8 \text{ А,}
 \end{aligned}$$

где  $k_e = w k_{o\sigma} / w_2 k_{o\sigma 2} = 112 \cdot 0,956 / (0,5 \cdot 0,998) = 214,6$ .

Из выражения

$$I_{2H} \approx \frac{s_H \cdot E}{k_e \cdot R_2} = 366 \text{ А}$$

находим номинальное скольжение ротора генератора

$$\begin{aligned}
 s_H &= \frac{285,5 \cdot 10^{-4} k_e}{E} = \frac{285,5 w k_{o\sigma}}{E \cdot w_2 k_{o\sigma 2} \cdot 10^4} = \frac{285,5 w k_{o\sigma}}{E \cdot 0,5 \cdot 0,998 \cdot 10^4} = \frac{0,0572 w k_{o\sigma}}{222 w k_{o\sigma} \Phi} = \\
 &= \frac{0,0572}{222 \cdot \Phi} = \frac{0,0572}{222 \cdot 10,8 \cdot 10^{-3}} = \frac{57,2}{222 \cdot 10,8} = 0,0239.
 \end{aligned}$$

Из следующих выражений:

$$\begin{aligned}
 I_{2p} &= \frac{(E/k_e) \cdot x_2 \cdot s_H^2}{R_2^2 + x_2^2 s_H^2} \approx \frac{E \cdot x_2 \cdot s_H^2}{k_e \cdot R_2^2} = \frac{E \cdot 1,76 \cdot 10^{-4} \cdot s_H^2}{813,5 \cdot (0,78 \cdot 10^{-4})^2} \cdot I_m = \\
 &= 35,6 E \cdot I_m \cdot s_H^2 = 35,6 E \cdot I_m \cdot 0,0239^2 = 0,0203 E \cdot I_m;
 \end{aligned}$$

$$\frac{I_{2p}}{I_m} = 0,0203 E; \quad \frac{I_{2p} \cdot w k_{o\sigma}}{406} = 0,0203 E;$$

$$I_{2p} \cdot w k_{o\sigma} = 8,46 E = 8,46 \cdot 222 \cdot w k_{o\sigma} \Phi = 8,46 \cdot 222 \cdot w k_{o\sigma} \cdot 9,7 \cdot 10^{-3}$$

находим реактивный ток ротора и его приведённое значение:

$$I_{2p} = 8,46 \cdot 222 \cdot 9,7 \cdot 10^{-3} = 18,2 \text{ А;}$$

$$I'_{2p} = \frac{I_{2p}}{k_i} = \frac{18,2}{35,75} = 0,51 \text{ А,}$$

где  $k_i = mwk_{о6}/m_2w_2k_{о62} = 3 \cdot 112 \cdot 0,956/(17 \cdot 0,5 \cdot 0,998) = 35,75$ .

Степень размагничивания тока ротора

$$I'_{2p} / (I_m + I'_{2p}) = 0,51 / 4,31 = 0,118.$$

**Таким образом**, степень размагничивания тока ротора генератора на базе АИР112М2 в 3,24 раза меньше, чем на базе АИР100L2. Практически на такую величину будет изменяться и падение напряжения при загрузке асинхронного генератора.

Большое влияние на параметры асинхронных генераторов оказывают конструктивные особенности обмоток статора.

Разработке рациональных схем статорных обмоток асинхронных генераторов с новыми внутрифазными и межфазными соединениями способствуют современные методы их формирования, которые будут рассмотрены в следующей публикации.

### Литература

1. Богатырёв Н.И. Схемы статорных обмоток, параметры и характеристики электрических машин переменного тока / Н.И. Богатырёв, В.Н. Ванурин, О.В. Вронский – Краснодар: 2007. - 301 с.
2. Ковач К.П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К.П. Ковач, И. Рац. - М. - Л.: ГЭИ, 1963 - 744 с.
3. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: Учебник для вузов, 3-е издание / И.П. Копылов – М.: Высшая школа, 2001. – 327 с.
4. Системы автономного электроснабжения: моногр. / О.В. Григораш, Н.И. Богатырев, Н.Н. Курзин и др.; под ред. Н.И. Богатырева. – Краснодар, 2001. – 333 с.
5. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями. Учебное пособие по дисциплинам электромеханического цикла / А.А. Усольцев - «ИТМО» Санкт - Петербург. 2006. - 95 с.