

УДК 621.31.03

UDC 621.31.03

АСИНХРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ДЛЯ СИСТЕМ АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ. ЧАСТЬ 2. БАЗОВАЯ ТЕОРИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СТАТОРНЫХ ОБМОТОК АСИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ОБМОТОК

ASYNCHRONOUS GENERATORS FOR SYSTEMS OF INDEPENDENT ELECTROSUPPLY. PART 2. THE BASE THEORY OF STATOR WINDINGS FORMATION OF ASYNCHRONOUS GENERATORS AND METHODS OF CALCULATION OF WINDINGS

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 ВНИПТИМЭСХ, г. Зерноград, Россия

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

Системы автономного электроснабжения 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 асинхронных генераторов (АГ) в качестве преобразователей энергии, обусловлены необходимостью регулирования тока возбуждения, и в большей мере при наличии в токе нагрузки реактивной составляющей, размагничивающей генератор.

На внешнюю характеристику АГ оказывает влияние не только реакция магнитодвижущей силы (МДС) от тока нагрузки, но и степень насыщения их магнитной цепи, а также параметры статорной и роторной обмо-

ток. Увеличение насыщения магнитной цепи вызывает в большей степени рост намагничивающего тока, что отрицательно сказывается на мощностях АГ, особенно с многополюсной статорной обмоткой, целесообразность применения которой, например, в АГ повышенной частоты тока обусловлена приемлемой частотой вращения приводного двигателя без мультипликатора.

Степень влияния параметров статорной обмотки на внешнюю характеристику АГ определяют, прежде всего, конструктивные признаки её межфазных и внутрифазных соединений. Современные методы формирования схем статорных обмоток и их развитие применительно к АГ позволяет находить рациональные варианты схем обмоток, в том числе модулированные статорные обмотки с изменяющимися параметрами при нагрузке.

1 Базовая теория формирования статорных обмоток асинхронных генераторов и методы расчета

Пазы статора с q сторонами катушек катушечной группы образуют фазную зону. Чередование фазных зон и симметричную трёхфазную сеть ($a = e^{j2\pi/3}$) можно представить в виде матриц [1,2]:

$$\begin{pmatrix} A & B & C \\ A & B & C \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ A & B & C \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & a & 0 \\ 0 & 0 & a^2 \end{pmatrix}.$$

Транспонирование чередования фазных зон

$$\begin{pmatrix} A & A & \cdot & A \\ B & B & \cdot & B \\ C & C & \cdot & C \end{pmatrix}$$

преобразует любое число пар полюсов обмотки в $p = 1$.

Преобразование базовой транспонированной матрицы определяет цепной вариант чередования зон ($A \cdot a = B$; $A \cdot a^2 = C$ и т. д.) [1], рис. 1:

$$\begin{vmatrix} A & A & A \\ B & B & B \\ C & C & C \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & a & 0 \\ 0 & 0 & a^2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A & B & C \\ B & C & A \\ C & A & B \end{vmatrix};$$



Рис.1 - Варианты чередования фазных зон

Рисунки 2 и 3 иллюстрируют переход от цепного варианта чередования фазных зон к транспонированному варианту и порядок соединения частей двухполюсной обмотки в треугольник.

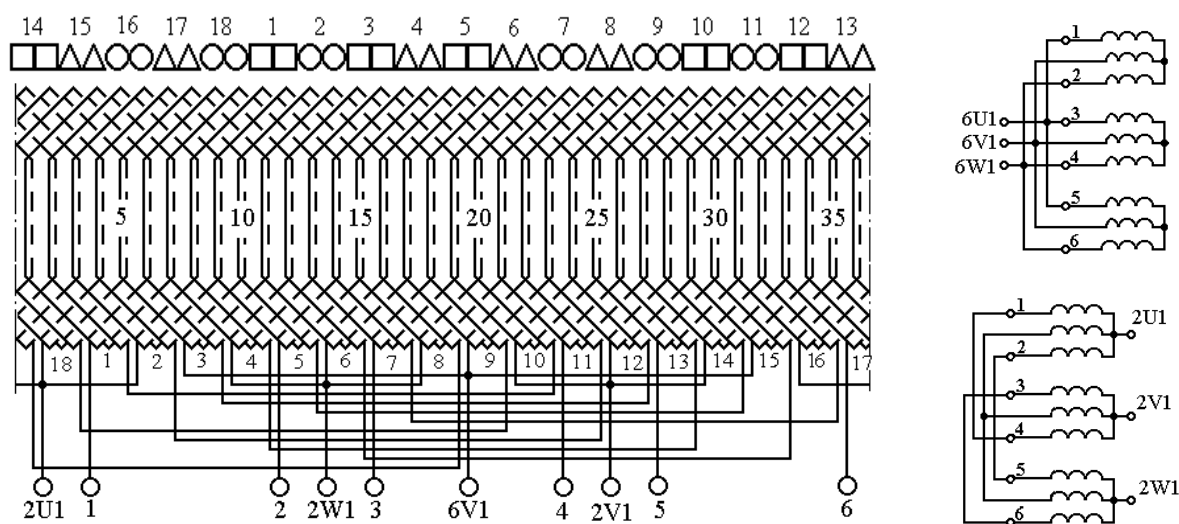


Рис. 2 – Схема обмотки на 6/2 полюса и схемы соединения фаз

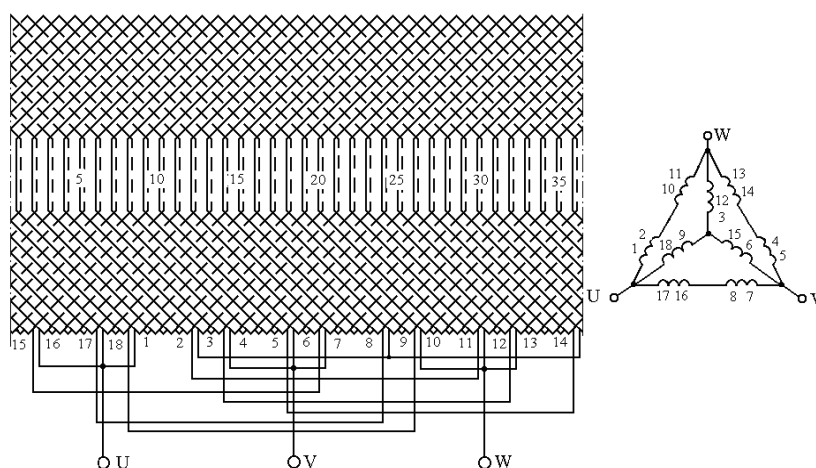


Рис. 3 – Схема двухполюсной обмотки и схема соединения фаз Y/Δ

С выведенной нулевой точкой схемы обмоток на рисунках 4 и 5 подходит асинхронному генератору на стандартное напряжение 400/230 В.

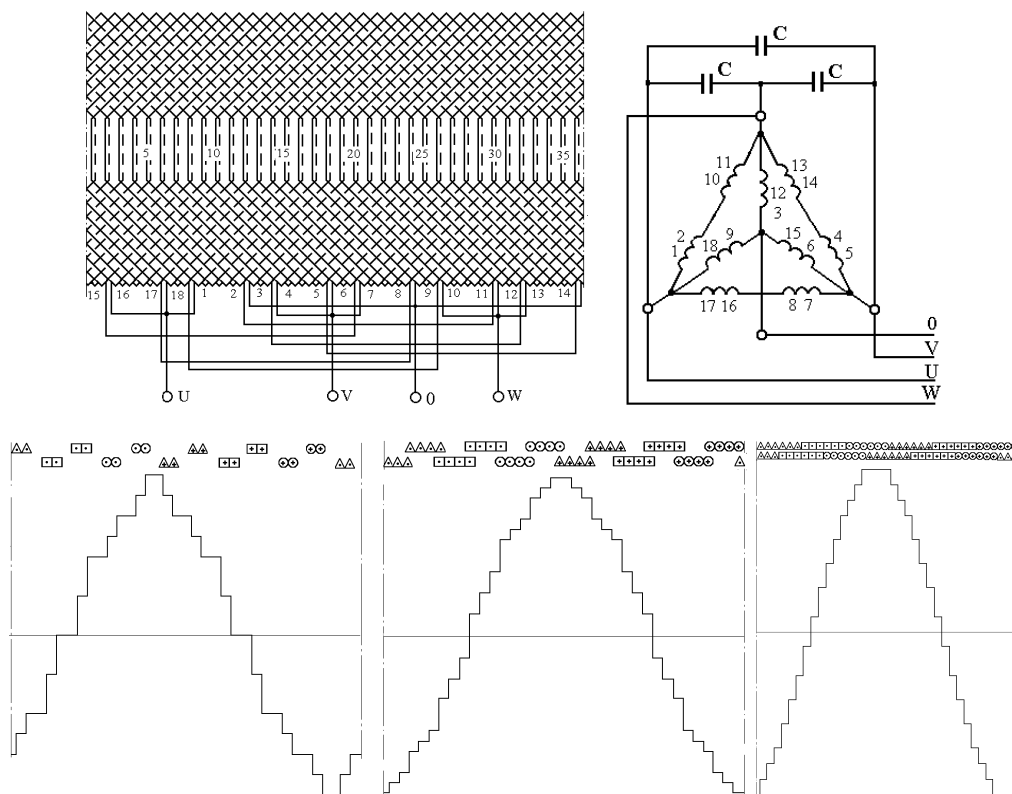


Рис. 4 – Схема обмотки, МДС частей обмотки и результирующая МДС

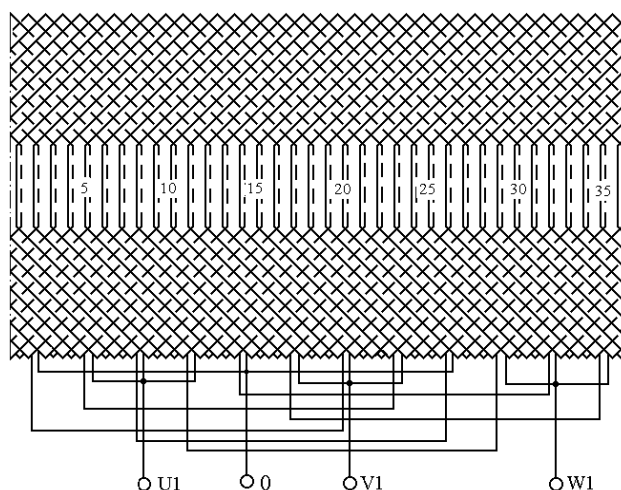


Рис. 5 – Схема обмотки с одинаковым числом катушек в группах

При чередовании катушек 3 – 3 и шаге $y = 15$ проводники частей обмотки разного сечения располагаются в одних и тех же пазах.

Пример расчёта обмотки генератора на базе асинхронного двигателя АИР112М2 (сопротивление и обмоточный коэффициент обмотки ротора

$R_2 = 1,02 \cdot 10^{-4}$ Ом и $k_{об2} = 0,999$). При расчёте обмоток генератора на базе АИР112М2 базовыми величинами являются: индукция в воздушном зазоре - $B_\delta = 0,80$ Тл; магнитный поток - $\Phi = 10,8 \cdot 10^{-3}$ Вб; коэффициент насыщения магнитопровода статора - $k_\mu = 2,3$; номинальное скольжение - $s_n = |0,023|$, индуктивное сопротивление обмотки ротора - $x_2 = 1,04 \cdot 10^{-4}$ Ом.

Число витков на фазу

$$w = E / (222 k_{об} \Phi) = 400 / (222 \cdot 0,9235 \cdot 10,8 \cdot 10^{-3}) = 180.$$

В катушке в части треугольника 30 витков, а в звезде 15 витков.

Намагничивающий ток

$$I_m = \frac{B_d p p d k_d k_m}{\sqrt{2} m w k_{об} m_0} = \frac{0,8 \cdot 3,1416 \cdot 1 \cdot 0,6 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2 \cdot 2,3}{1,414 \cdot 3 \cdot 180 \cdot 0,9235 \cdot 4 \cdot 3,1416 \cdot 10^{-7}} = 4,7 \text{ А.}$$

При одинаковой площади паза для проводников в части звезды и в части треугольника диаметры изолированных проводов

$$d_{уз} = \sqrt{(Q / 2) / 30} = \sqrt{32 / 30} = 1,03 \text{ мм};$$

$$d_{уз} = \sqrt{(Q / 2) / 15} = \sqrt{32 / 15} = 1,46 \text{ мм.}$$

Принимаем $d/d_{уз} = 0,95/1,015$ мм и $d/d_{уз} = 1,32/1,405$ мм.

Сечение проводов $S = 0,708$ мм² и $S = 1,37$ мм².

Активное сопротивление частей обмотки при длине витка $l_g = 0,66$ м

$$R_\Delta = 0,0223 \cdot 180 l_g / S = 0,0223 \cdot 0,66 \cdot 180 / 0,708 = 3,74 \text{ Ом.}$$

$$R_Y = 0,0223 \cdot 90 l_g / S = 0,0223 \cdot 0,66 \cdot 90 / 1,37 = 0,97 \text{ Ом.}$$

Намагничивающий ток при холостом ходе генератора

$$I_{m0} = I_m + I_{2p}' \approx 1,035 I_m = 1,035 \cdot 4,7 = 4,86 \text{ А.}$$

Радиус основной гармоники МДС, полярный момент инерции пазовых точек диаграммы Гёргеса и значение коэффициента дифференциального рассеяния от тока возбуждения [2] (рис. 6):

$$R_p = \frac{Z k_{об}}{2 p p} = \frac{72 \cdot 0,9235}{2 \cdot 3,1416 \cdot 1} = 10,5825;$$

$$R_d^2 = [2(7^2 + 5^2 - 2 \cdot 7 \cdot 5 \cdot \cos 120^\circ) + 2(9^2 + 3^2 - 2 \cdot 9 \cdot 3 \cdot \cos 120^\circ) + 2(10^2 + 1^2 - 2 \cdot 10 \cdot 1 \cdot \cos 120^\circ)] / 6 = 112,3333;$$

$$t_{\partial 0} = \frac{R_{\partial}^2}{R_p^2} - 1 = \frac{112,3333}{10,5825^2} - 1 = 0,00307.$$

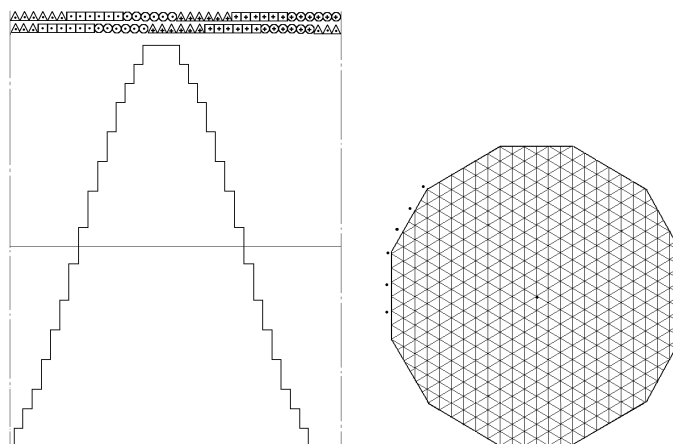


Рис. 6 – МДС и диаграммы Гёргеса от токов возбуждения

Сопротивление взаимоиндукции и индуктивное сопротивление статорной обмотки при холостом ходе генератора:

$$x_{m0} = \frac{E}{(I_m + I_{2p})} = \frac{400}{4,86} = 82,3 \text{ Ом};$$

$$\begin{aligned} x_{10} &= 4p f m_0 w^2 \left(\frac{l}{q} \cdot \frac{3b+1}{4} + 0,57 \frac{3b-1}{2} \cdot \frac{pD}{2} \right) + t_{\partial 0} \cdot x_{m0} = \\ &= 0,79 \cdot 10^{-3} \cdot 180^2 \left(\frac{0,125}{6} \cdot \frac{3 \cdot 0,833+1}{4} + 0,57 \frac{3 \cdot 0,833-1}{2} \cdot \frac{3,14 \cdot 0,108}{2} \right) + \\ &+ 0,00307 \cdot 82,3 = 2,33 + 0,25 = 2,58 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Из выражения

$$I_{m0} = \frac{E}{x_c - x_{10}} = \frac{400}{x_c - 2,58}$$

определяется сопротивление конденсаторов $x_c = 84,9$ Ом и их ёмкость

$$C = 10^6 / w x_c = 1000000 / (314 \cdot 84,9) \approx 38 \text{ мкФ}.$$

Напряжение на конденсаторах при холостом ходе генератора и рабочее напряжение конденсаторов при соединении в треугольник:

$$U_c = I_{m0} x_c = 4,86 \cdot 84,9 = 412 \text{ В};$$

$$U_{cp} \geq 1,414 \cdot 412 \geq 583 \text{ В}.$$

Если из катушек в части звезды схемы обмотки на рисунке 5 образовать последовательную ветвь, то получим автотрансформаторный вариант двухполюсной обмотки (рисунки 7 и 8).

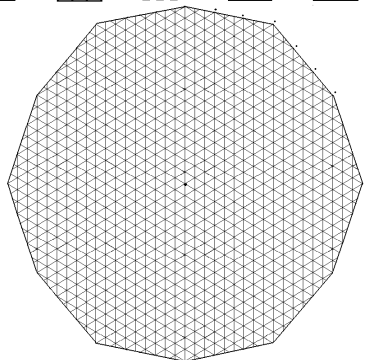
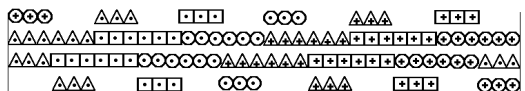
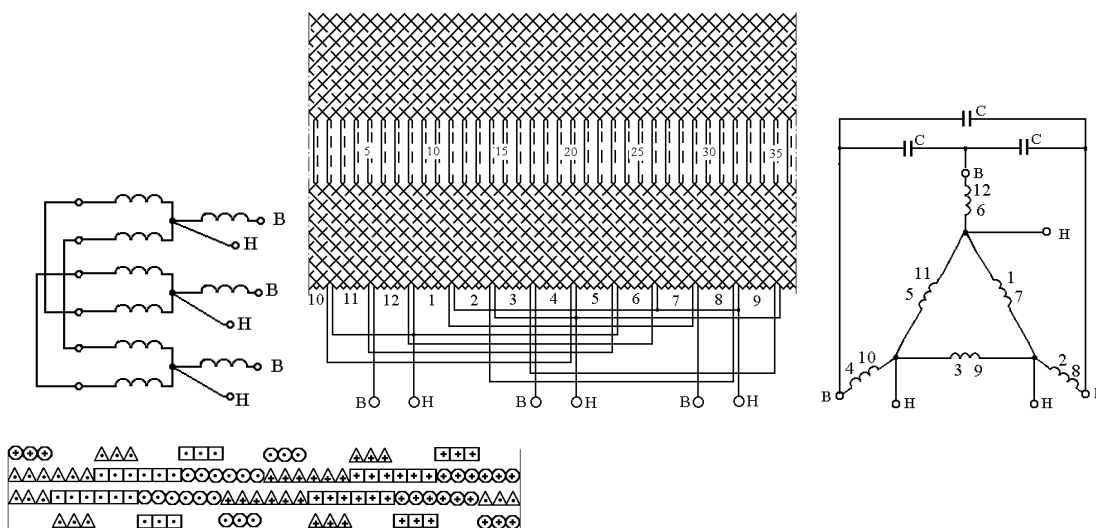


Рис. 7 - Схема соединения фаз, схема автотрансформаторной обмотки и диаграмма Гёрреса от тока возбуждения

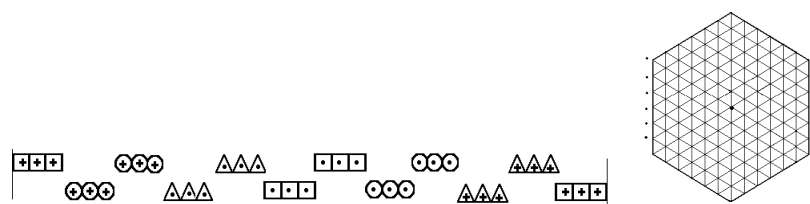


Рис. 8 – Диаграмма Гёрреса для этой обмотки от тока нагрузки

Обмоточный коэффициент от тока возбуждения для условного числа катушек в группе $q = 9$

$$k_{обв} = k_p \cdot k_y = \frac{\sin q \cdot \frac{a}{2}}{q \sin \frac{a}{2}} \cdot \sin y \frac{a}{2} = \frac{\sin 9 \cdot 5^0}{9 \sin 5^0} \cdot \sin 75^0 = 0,8707.$$

Обмоточный коэффициент от тока нагрузки для $q = 3$

$$k_{обн} = k_p \cdot k_y = \frac{\sin 3 \cdot 5^0}{3 \sin 5^0} \cdot \sin 75^0 = \frac{0,2588}{3 \cdot 0,087156} \cdot 0,9659 = 0,9561.$$

Радиус основной гармоники МДС, полярный момент инерции пазовых точек диаграммы Гёргеса при условных 108 пазах статора и значение коэффициента дифференциального рассеяния от тока возбуждения:

$$R_p = \frac{Zk_{обс}}{2pp} = \frac{108 \cdot 0,8707}{2 \cdot 3,1416 \cdot 1} = 14,9664;$$

$$R_d^2 = [2(13^2 + 3^2 - 2 \cdot 13 \cdot 3 \cdot \cos 120^0) + 2(11^2 + 6^2 - 2 \cdot 11 \cdot 6 \cdot \cos 120^0) + 15^2 + (9^2 + 9^2 - 2 \cdot 9 \cdot 9 \cdot \cos 120^0)] / 6 = (434 + 446 + 225 + 243) / 6 = 224,6666;$$

$$t_{обс} = \frac{R_d^2}{R_p^2} - 1 = \frac{224,6666}{14,9664^2} - 1 = 0,003.$$

Соответственно от тока нагрузки:

$$R_p = \frac{Zk_{обн}}{2pp} = \frac{36 \cdot 0,9561}{2 \cdot 3,1416 \cdot 1} = 5,478;$$

$$R_d^2 = [2(5^2 + 1^2 - 2 \cdot 5 \cdot 1 \cdot \cos 120^0) + 2(4^2 + 2^2 - 2 \cdot 4 \cdot 2 \cdot \cos 120^0) + 6^2 + (3^2 + 3^2 - 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot \cos 120^0)] / 6 = (62 + 56 + 36 + 27) / 6 = 30,1666;$$

$$t_{обн} = \frac{R_d^2}{R_p^2} - 1 = \frac{30,1666}{5,478^2} - 1 = 0,00527.$$

Амплитуды высших гармоник МДС при включении в сеть выводов «В» незначительны (таблица 1)

$$\frac{F_{nm}}{F_m} = \frac{p}{n} \cdot \frac{k_{обн}}{k_{обс}} = \frac{1}{n} \cdot \frac{q \sin n \frac{a}{2} \cdot \sin n y \frac{a}{2}}{\sin q \frac{a}{2} \cdot \sin y \frac{a}{2} \cdot q \sin \frac{a}{2}} = \frac{1}{n} \cdot \frac{\sin n 45^0 \cdot \sin n 75^0}{\sin 45^0 \cdot \sin 75^0}.$$

Таблица 1 – Относительные амплитуды гармоник МДС

n	1	5	7	11	13
F_{mv}/F_m	1	0,011	0,006	0,01	0,0075

С учётом катушек обмотки относительно выводов «В», и «Н» и значений обмоточных коэффициентов соотношение ЭДС на выводах

$$E_g / E_n = 9k_{обв} / 3k_{обн} = (9 \cdot 0,8707) / (3 \cdot 0,9561) = 2,732 / 1.$$

Изменить соотношение ЭДС на выводах можно соотношением витков в катушках последовательной части и в части треугольника.

Так, если соотношение витков принять близком к 4/1, то коэффициент распределения от тока возбуждения составляет $k_p = 23,54/27 = 0,87185$, а обмоточный коэффициент равен $k_{обв} = 0,842$ (рис. 9).

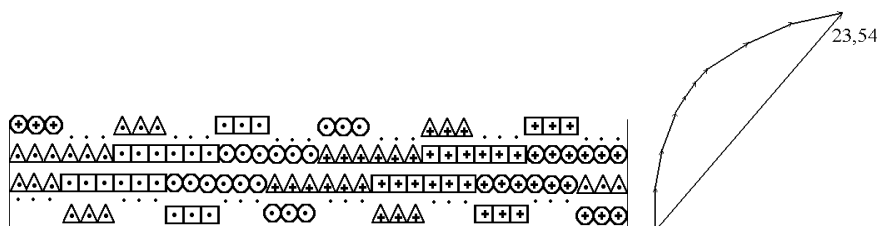


Рис. 9 – Векторная диаграмма к определению коэффициента распределения относительно выводов «В»

При таком соотношении витков в катушках и при условных 324 пазах статора (рис. 10):

$$R_p = \frac{Zk_{обв}}{2p} = \frac{324 \cdot 0,842}{2 \cdot 3,1416 \cdot 1} = 43,4186;$$

$$R_d^2 = [2(37^2 + 9^2 - 2 \cdot 37 \cdot 9 \cdot \cos 120^\circ) + 2(32^2 + 18^2 - 2 \cdot 32 \cdot 18 \cdot \cos 120^\circ) + 42^2 + (27^2 + 27^2 - 2 \cdot 27 \cdot 27 \cdot \cos 120^\circ)] / 6 = 1894,1666;$$

$$t_{об} = \frac{R_d^2}{R_p^2} - 1 = \frac{1894,1666}{43,4186^2} - 1 = 0,0048.$$

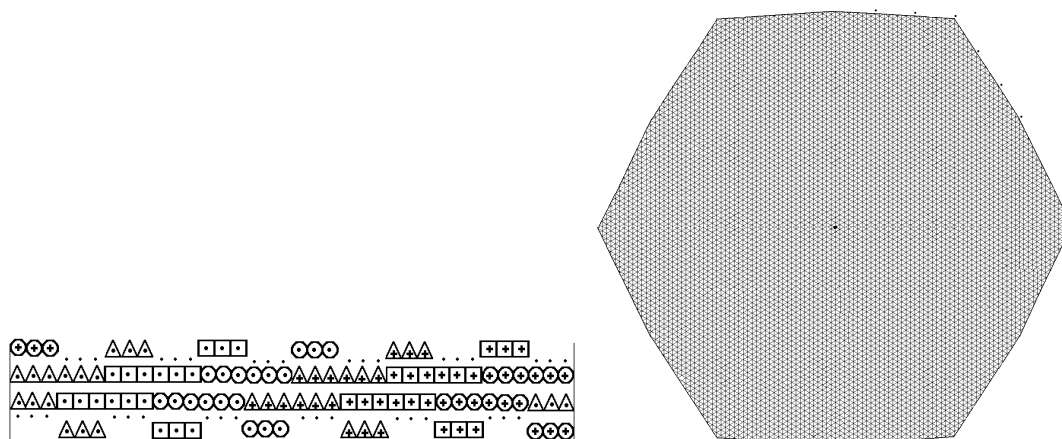


Рис. 10 – Диаграмма Гёргеса от тока возбуждения

Обмотка может быть применена и в сварочном асинхронном генераторе автономной электростанции.

Пример расчёта обмотки сварочного генератора на базе асинхронного двигателя АИР112М2 для автономной электростанции.

Индукции в воздушном зазоре $B_\delta = 0,82$ Тл отвечает поток $\Phi = 11,07 \cdot 10^{-3}$ и число витков на фазу

$$w = E / (222k_{об}\Phi) = 400 / (222 \cdot 0,85 \cdot 11,07 \cdot 10^{-3}) = 191.$$

В катушке в части треугольника принимаем 4 витка, а в катушке последовательной части звезды 14 витков. При таком соотношении витков в катушках $k_{об\delta} = 0,85$ и соотношение ЭДС на выводах обмотки составляет

$$E_e / E_n = wk_{об\delta} / w_n k_{обн} = (192 \cdot 0,85) / (24 \cdot 0,9561) = 7,1/1 \text{ или}$$

$$E_e / E_n = 400 / 56 \text{ В.}$$

Намагничивающий ток

$$I_m = \frac{B_d p d k_d k_m}{\sqrt{2} m w k_{об} m_0} = \frac{0,82 \cdot 3,1416 \cdot 0,6 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2 \cdot 2,4}{1,414 \cdot 3 \cdot 192 \cdot 0,85 \cdot 4 \cdot 3,1416 \cdot 10^{-7}} = 5,1 \text{ А.}$$

По намагничивающему току принимаем диаметр провода последовательной части обмотки $d/d_{уз} = 1,18/1,26$ мм. Сечение провода $S = 1,09$ мм². Площадь паза, занимаемая 14 проводниками последовательной части обмотки составляет $14 \cdot 1,26^2 = 22,2$ мм².

Четыре проводника катушки в части треугольника занимают $64 - 22,2 = 41,8$ мм² площади паза. При 4 параллельных проводниках в витке диаметр провода $d/d_{уз} = 1,50/1,61$ мм. Сечение провода $S = 1,77$ мм². Активное сопротивление части обмотки в треугольнике

$$R_{12} = 0,0223 \cdot 0,66 \cdot 24 / (4 \cdot 1,77) = 0,05 \text{ Ом.}$$

Намагничивающий ток при холостом ходе генератора

$$I_{m0} = I_m + I'_{2p} \approx 1,035 I_m = 1,035 \cdot 5,1 = 5,28 \text{ А.}$$

Сопротивление взаимной индукции и индуктивное сопротивление статорной обмотки при холостом ходе генератора:

$$x_{10} = 4pfm_0w^2 \left(\frac{l}{q} \cdot \frac{3b+1}{4} + 0,57 \frac{3b-1}{2} \cdot \frac{pD}{2} \right) + t_{o0}x_{m0} =$$

$$= 0,79 \cdot 10^{-3} \cdot 192^2 \left(\frac{0,125}{6} \cdot \frac{3 \cdot 0,833 + 1}{4} + 0,57 \frac{3 \cdot 0,833 - 1}{2} \cdot \frac{3,14 \cdot 0,108}{2} \right) +$$

$$+ 0,0044 \cdot 75,8 = 2,65 + 0,33 = 2,98 \text{ Ом.}$$

$$x_{m0} = \frac{E}{(I_m + I_{2p})} = \frac{400}{5,28} = 75,8 \text{ Ом;}$$

Из выражения

$$I_{m0} = \frac{E}{x_c - x_{10}} = \frac{400}{x_c - 2,98} = 5,28 \text{ А}$$

определяется сопротивление конденсаторов $x_c = 78,73 \text{ Ом}$ и их ёмкость

$$C = 10^6 / \omega x_c = 1000000 / (314 \cdot 78,73) \approx 40 \text{ мкФ.}$$

Напряжение на конденсаторах при холостом ходе генератора и рабочее напряжение конденсаторов при соединении в треугольник:

$$U_c = I_{m0}x_c = 4,86 \cdot 78,73 = 416 \text{ В; } U_{cp} \geq 1,414 \cdot 416 \geq 588 \text{ В.}$$

Индуктивное сопротивление обмотки в части треугольника пропорционально виткам в этой части обмотки и составляет 0,37 Ом.

Пример расчёта обмотки генератора на базе АИР112М2 автономной электростанции с соотношением ЭДС 303/233 В.

Этому соотношению ЭДС отвечает соотношение витков в катушках последовательной части и в части треугольника 3/17 и соотношение обмоточных коэффициентов $k_{обв}/k_{обн} = 0,92/0,9561$.

Для расчётных величин индукции в воздушном зазоре $B_\delta = 0,80 \text{ Тл}$ и потока $\Phi = 10,8 \cdot 10^{-3}$ число витков на фазу

$$w = E / (222k_{об}\Phi) = 303 / (222 \cdot 0,92 \cdot 10,8 \cdot 10^{-3}) = 138.$$

При соотношении витков в катушках последовательной части и в части треугольника 3/17 соотношение ЭДС на выводах обмотки

$$E_s / E_n = wk_{обс} / w_n k_{обн} = (138 \cdot 0,92) / (102 \cdot 0,956) = 1,3/1 \text{ или}$$

$$E_s / E_n = 303 / 233 \text{ В.}$$

Намагничивающий ток

$$I_m = \frac{B_d p d k_d k_m}{\sqrt{2} m w k_{oc} m_0} = \frac{0,8 \cdot 3,1416 \cdot 0,6 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2 \cdot 2,3}{1,414 \cdot 3 \cdot 138 \cdot 0,92 \cdot 4 \cdot 3,1416 \cdot 10^{-7}} = 6,15 \text{ А.}$$

По линейному намагничивающему току 10,6 А принимаем диаметр провода $d/d_{uz} = 1,40/1,485$ мм. Сечение провода $S = 1,54$ мм². Площадь паза, занимаемая 3 проводниками последовательной части обмотки составляет $3 \cdot 1,485^2 = 6,6$ мм². Активное сопротивление последовательной части обмотки $R_{11} = 0,172$ Ом и потери в ней $P_{эл11} = 58$ Вт.

17 проводников катушки в части треугольника занимают $64 - 6,6 = 57,4$ мм² площади паза. При 2 параллельных проводниках в витке диаметр провода $d/d_{uz} = 1,18/1,26$ мм. Сечение провода $S = 1,09$ мм². Активное сопротивление части обмотки в треугольнике $R_{12} = 0,69$ Ом.

Разнице потерь в статорной обмотке базового двигателя и потерь от линейного намагничивающего тока генератора $402 - 58 = 344$ Вт отвечает номинальный активный ток нагрузки 11,3 А.

Намагничивающий ток при холостом ходе генератора

$$I_{m0} = I_m + I_{2p}' \approx 1,035 I_m = 1,035 \cdot 6,15 = 6,36 \text{ А.}$$

Сопротивление взаимной индукции и индуктивное сопротивление статорной обмотки при холостом ходе генератора:

$$x_{m0} = \frac{E}{(I_m + I_{2p}')'} = \frac{303}{6,36} = 47,64 \text{ Ом;}$$

$$\begin{aligned} x_{10} &= 4 p f m_0 w^2 \left(\frac{l}{q} \cdot \frac{3b+1}{4} + 0,57 \frac{3b-1}{2} \cdot \frac{pD}{2} \right) + t_{oc} x_{m0} = \\ &= 0,79 \cdot 10^{-3} \cdot 138^2 \left(\frac{0,125}{6} \cdot \frac{3 \cdot 0,833 + 1}{4} + 0,57 \frac{3 \cdot 0,833 - 1}{2} \cdot \frac{3,14 \cdot 0,108}{2} \right) + \\ &+ 0,0032 \cdot 47,64 = 1,37 + 0,15 = 1,52 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Из выражения

$$I_{m0} = \frac{E}{x_c - x_{10}} = \frac{303}{x_c - 1,52} = 6,36 \text{ А}$$

определяется сопротивление конденсаторов $x_c = 49,2$ Ом и их ёмкость

$$C = 10^6 / w x_c = 1000000 / (314 \cdot 49,2) \approx 65 \text{ мкФ.}$$

Напряжение на конденсаторах при холостом ходе генератора и рабо-

чее напряжение конденсаторов при соединении в треугольник:

$$U_c = I_m x_c = 6,36 \cdot 49,2 = 313 \text{ В};$$

$$U_{cp} \geq 1,414 \cdot 313 \geq 443 \text{ В}.$$

2 Асинхронные генераторы с модулированными обмотками статора на частоту тока 200 Гц и методика их расчета

Чередование катушечных групп в цепном варианте совпадает с их чередованием при преобразовании МДС фазных обмоток по методу симметричной полюсно - амплитудной модуляции [2], согласно которому число катушек фазных обмоток, приходящееся на фазную зону пропорционально синусу угла расположения фазных зон (рис. 11, *а, б*). Реализация метода осуществляется реверсированием тока в катушках, охватываемых полупериодом условной модулирующей волны.

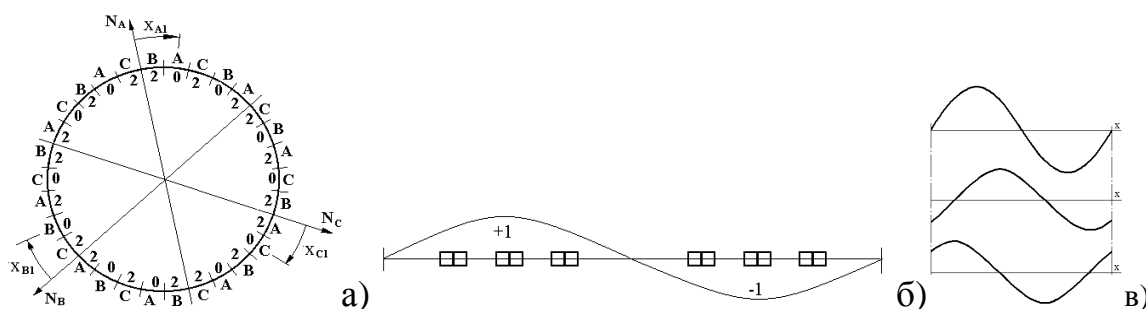


Рис. 11 – Распределение катушек *а*), представление модулирующей волны *б*), представление двухполюсной модулирующей волны *в*)

Развитием метода симметричной модуляции послужило представление модулирующей волны её составляющими (рис. 11, *в*).

Если при модуляции МДС половин фазных обмоток волнами с *k* периодами изменять и фазу токов во вторых половинах по принципу кругового перемещения трёхфазных токов, то такого рода модуляция запишется в виде (*a* - смещение частей фазных обмоток):

$$F = F_m [\cos p x \cdot \sin k x \cdot \sin(\omega t - 2\pi/3) + \cos p(x - \alpha) \cdot \sin k(x - \alpha) \cdot \sin \omega t + \cos p(x - \beta) \cdot \sin k(x - \beta) \cdot \sin(\omega t - 4\pi/3) + \cos p(x - \beta - \alpha) \cdot \sin k(x - \beta - \alpha) \cdot \sin(\omega t - 2\pi/3) + \cos p(x - 2\beta) \cdot \sin k(x - 2\beta) \cdot \sin \omega t + \cos p(x - 2\beta - \alpha) \cdot \sin k(x - 2\beta - \alpha) \cdot \sin(\omega t - 4\pi/3)].$$

При $b = 2\pi/3$

$$F = -F_m/4\{\cos[\omega t - (p - k)(x - \alpha)] + \cos[\omega t - (p - k)x + (p - k)4\pi/3] + \cos[\omega t - (p - k)(x - \alpha) + (p - k - 1)2\pi/3] + \cos[\omega t - (p - k)x - 2\pi/3] + \cos[\omega t - (p - k)(x - \alpha) + (p - k - 1)4\pi/3] + \cos[\omega t - (p - k)x + (p - k - 2)2\pi/3]\} + F_m/4\{\cos[\omega t + (p - k)(x - \alpha)] + \cos[\omega t + (p - k)x - (p - k)4\pi/3] + \cos[\omega t + (p - k)(x - \alpha) - (p - k + 1)2\pi/3] + \cos[\omega t + (p - k)x - 2\pi/3] + \cos[\omega t + (p - k)(x - \alpha) - (p - k + 1)4\pi/3] + \cos[\omega t + (p - k)x - (p - k + 2)2\pi/3]\} + F_m/4\{\cos[\omega t - (p + k)(x - \alpha)] + \cos[\omega t - (p + k)x + (p + k)4\pi/3] + \cos[\omega t - (p + k)(x - \alpha) + (p + k - 1)2\pi/3] + \cos[\omega t - (p + k)x - 2\pi/3] + \cos[\omega t - (p + k)(x - \alpha) + (p + k - 1)4\pi/3] + \cos[\omega t - (p + k)x + (p + k - 2)2\pi/3]\} - F_m/4\{\cos[\omega t + (p + k)(x - \alpha)] + \cos[\omega t + (p + k)x - (p + k)4\pi/3] + \cos[\omega t + (p + k)(x - \alpha) - (p + k + 1)2\pi/3] + \cos[\omega t + (p + k)x - 2\pi/3] + \cos[\omega t + (p + k)(x - \alpha) - (p + k + 1)4\pi/3] + \cos[\omega t + (p + k)x - (p + k + 2)2\pi/3]\}.$$

При $b = 4\pi/3$

$$F = -F_m/4\{\cos[\omega t - (p - k)(x - \alpha)] + \cos[\omega t - (p - k)x + (p - k)2\pi/3] + \cos[\omega t - (p - k)(x - \alpha) + (2p - 2k - 1)2\pi/3] + \cos[\omega t - (p - k)x - 2\pi/3] + \cos[\omega t - (p - k)(x - \alpha) + (p - k - 2)2\pi/3] + \cos[\omega t - (p - k)x + (p - k - 1)4\pi/3]\} + F_m/4\{\cos[\omega t + (p - k)(x - \alpha)] + \cos[\omega t + (p - k)x - (p - k)2\pi/3] + \cos[\omega t + (p - k)(x - \alpha) - (2p - 2k + 1)2\pi/3] + \cos[\omega t + (p - k)x - 2\pi/3] + \cos[\omega t + (p - k)(x - \alpha) - (p - k + 2)2\pi/3] + \cos[\omega t + (p - k)x - (p - k + 1)4\pi/3]\} + F_m/4\{\cos[\omega t - (p + k)(x - \alpha)] + \cos[\omega t - (p + k)x + (p + k)2\pi/3] + \cos[\omega t - (p + k)(x - \alpha) + (2p + 2k - 1)2\pi/3] + \cos[\omega t - (p + k)x - 2\pi/3] + \cos[\omega t - (p + k)(x - \alpha) + (p + k - 2)2\pi/3] + \cos[\omega t - (p + k)x + (p + k + 1)4\pi/3]\} - F_m/4\{\cos[\omega t + (p + k)(x - \alpha)] + \cos[\omega t + (p + k)x - (p + k)2\pi/3] + \cos[\omega t + (p + k)(x - \alpha) - (2p + 2k + 1)2\pi/3] + \cos[\omega t + (p + k)x - 2\pi/3] + \cos[\omega t + (p + k)(x - \alpha) - (p + k + 2)2\pi/3] + \cos[\omega t + (p + k)x - (p + k + 1)4\pi/3]\}.$$

Результат модуляции:

для $b = 2\pi/3$ и $p = 3m + 1$ ($= 1, 2, \dots$)

$$F = \frac{3}{2} F_m \cos \left[\omega t + (p - k)x - \frac{(p - k)a + 2p/3}{2} \right] \cos \frac{(p - k)a - 2p/3}{2};$$

для $b = 4\pi/3$ и $p = 3m + 1$

$$F = -\frac{3}{2} F_m \cos \left[\omega t - (p-k)x + \frac{(p-k)a - 2p/3}{2} \right] \cos \frac{(p-k)a + 2p/3}{2}.$$

Метод позволяет создавать обмотки с соединением фаз Y-Δ/Δ и Δ/Δ.

Рациональной является величина $b = 2\pi/3$ (рис. 12).

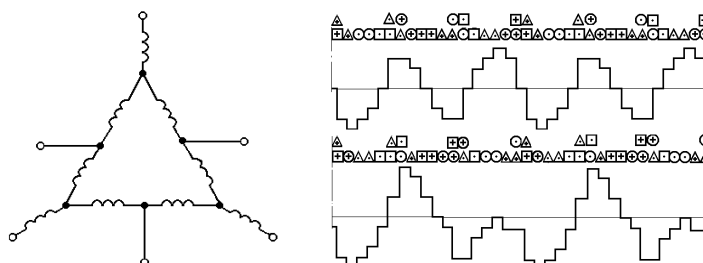


Рис. 12 – Схема соединения фаз, МДС до модуляции при $b = 2\pi/3$ и при $b = 4\pi/3$

Для АГ амплитуда гармоники $p - k$ МДС после модуляции должна быть наименьшей, что имеет место при $\alpha = -50^\circ$ (рис. 13).

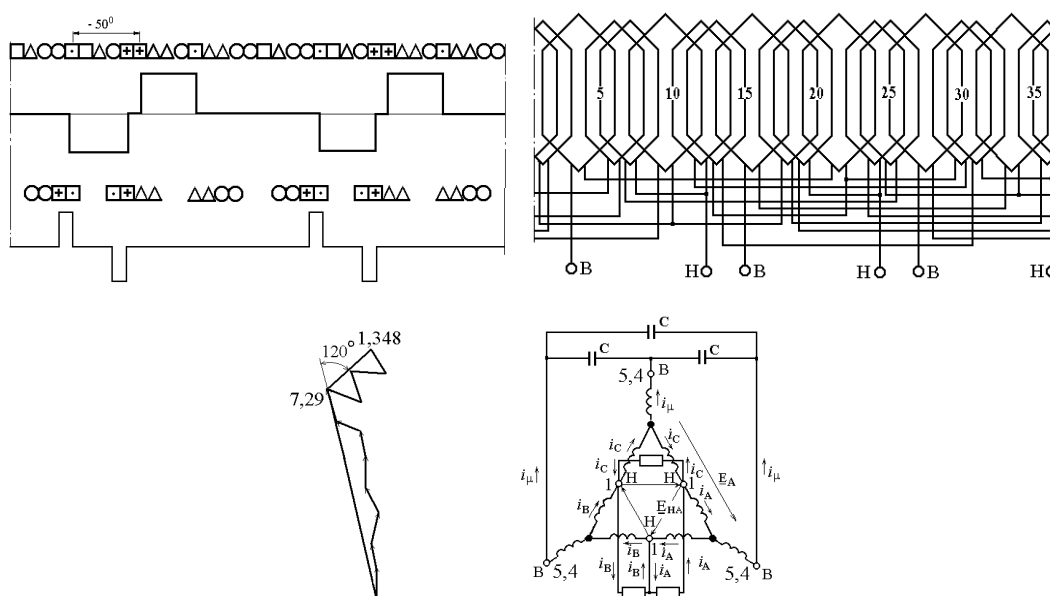


Рис. 13 – МДС фазной обмотки до и после модуляции ($\alpha = -50^\circ$), схема обмотки, соотношение ЭДС, схема токов в частях обмотки

Полярный момент инерции пазовых вершин диаграммы Гёргеса восьмиполюсной обмотки от тока возбуждения, амплитуда основной гармоники МДС ($k_{об} = 0,911$) и значение коэффициента дифференциального рассеяния при условных 48 пазах статора (рис. 14):

$$R_d^2 = [2 \cdot 2^2 + 4(1^2 + 1^2 - 2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \cos 120^\circ)] / 6 = 3,333;$$

$$R_p = 48k_{o\sigma} / (2pp) = 48 \cdot 0,911 / (2 \cdot 3,14 \cdot 4) = 1,74;$$

$$t_o = \frac{3,333}{1,74^2} - 1 = 0,1.$$

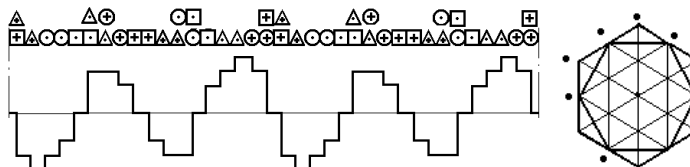


Рис. 14 – МДС и диаграмма Гёргеса от тока возбуждения

От тока возбуждения и от равного ему активного тока нагрузки ($k_{o\sigma} = 0,6186$) при условных 72 пазах статора (рис. 15):

$$R_d^2 = [4 \cdot 2^2 + 2(1^2 + 1^2 - 2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \cos 120^\circ)] / 6 = 3,666;$$

$$R_p = 72k_{o\sigma} / (2pp) = 72 \cdot 0,6178 / (2 \cdot 3,1416 \cdot 4) = 1,77; \quad t_o = \frac{3,666}{1,77^2} - 1 = 0,17.$$

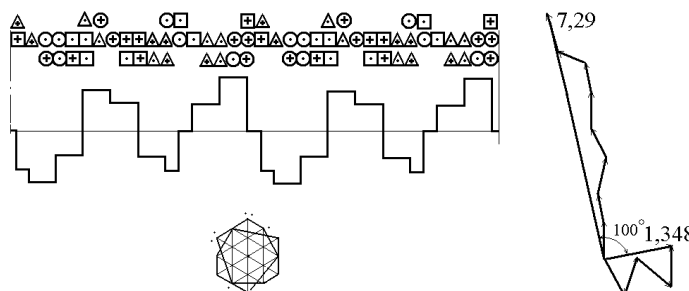


Рис. 15 – МДС и диаграммы Гёргеса от тока возбуждения и при активной нагрузке, векторная диаграмма к расчёту обмоточных коэффициентов

Соотношением витков в катушках последовательной части и в части треугольника можно подобрать вариант с наименьшей величиной коэффициента дифференциального рассеяния (рис. 16).

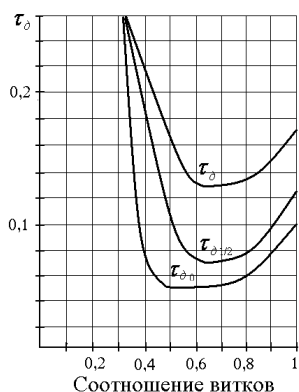


Рис. 16 – Зависимость коэффициентов дифференциального рассеяния от тока возбуждения, при соотношении тока нагрузки ($j = 10^0$) к току возбуждения 1/2 и при равенстве токов возбуждения и нагрузки

Рациональному отношению витков в последовательной части обмотки и в части треугольника 2/3 отвечает двухслойная обмотка с чередованием катушек в группах 2-3-3-2-3-3 при 48 пазах статора (рис. 17).

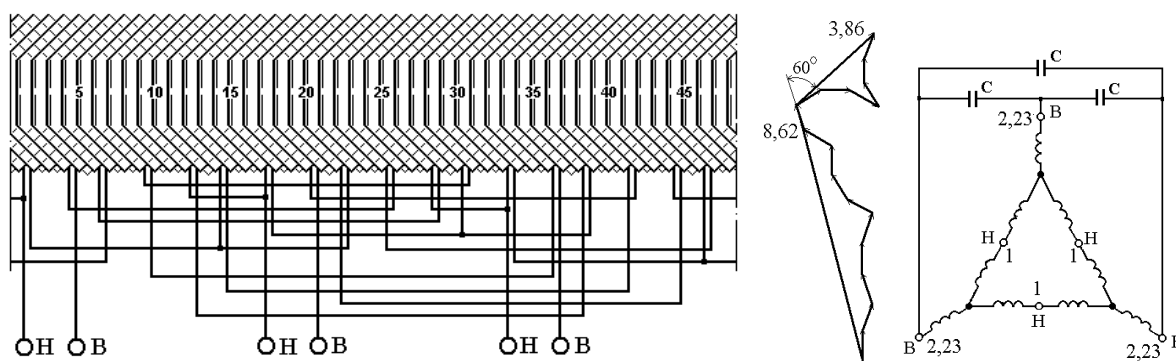


Рис. 17 – Схема двухслойной обмотки и соотношение ЭДС

Полярный момент инерции пазовых вершин диаграммы Гёргеса, амплитуда основной гармоники при 120 условных пазах статора и значение коэффициента дифференциального рассеяния от тока возбуждения ($k_{об} = 8,62/10$), рисунок 18:

$$R_d^2 = [(2(3^2 + 2^2 - 2 \cdot 3 \cdot 2 \cdot \cos 120^\circ) + 4 \cdot 4^2 + (3^2 + 3^2 - 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot \cos 120^\circ) + (2^2 + 2^2 - 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot \cos 120^\circ)] / 8 = 17,625;$$

$$R_p = 120k_{об}/2pp = 120 \cdot 0,862 / (2 \cdot 3,1416 \cdot 4) = 4,1157;$$

$$t_{\delta 0} = \frac{17,625}{4,1157^2} - 1 = 0,04.$$

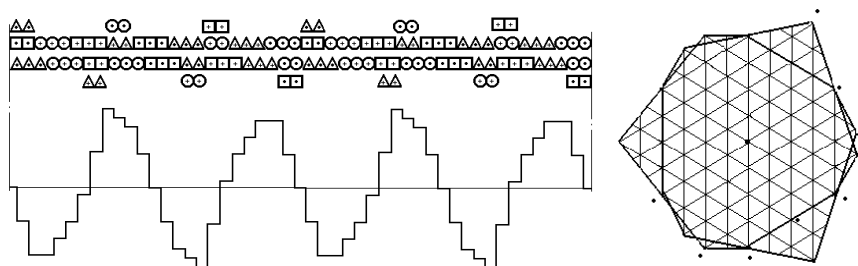


Рис. 18 – МДС и диаграмма Гёргеса от тока возбуждения

Для совпадающих по величине активного тока нагрузки и тока возбуждения ($k_{об} = 0,59$) при 196 условных пазах статора (рис. 19):

$$R_d^2 = [(3^2 + 3^2 - 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot \cos 120^\circ) + 3(4^2 + 2^2 - 2 \cdot 4 \cdot 2 \cdot \cos 120^\circ) + 4^2 + (5^2 + 1^2 - 2 \cdot 5 \cdot 1 \cdot \cos 120^\circ) + (2^2 + 2^2 - 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot \cos 120^\circ) + (3^2 + 2^2 - 2 \cdot 3 \cdot 2 \cdot \cos 120^\circ)] / 8 = 23,625;$$

$$R_p = 196k_{об}/2pp = 196 \cdot 0,59 / (2 \cdot 3,1416 \cdot 4) = 4,6; \quad t_\delta = \frac{23,625}{4,6^2} - 1 = 0,116.$$

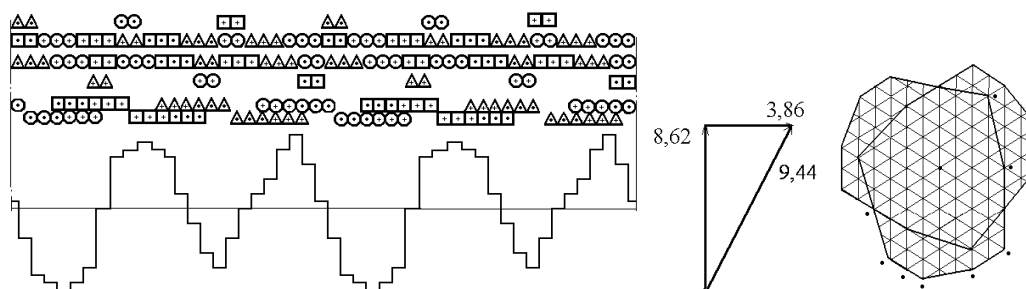


Рис. 19 – МДС и диаграмма Гёргеса при нагрузке

По данным рисунков 19 и 20 можно оценить значение коэффициента дифференциального рассеяния при другом токе нагрузки.

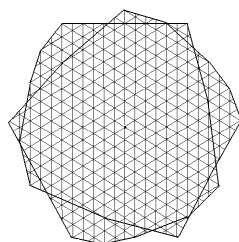


Рис. 20 – Диаграмма Гёргеса при соотношении активного тока нагрузки к току возбуждения 1/2 ($\tau_\delta = 0,076$)

Асинхронные генераторы с двухслойной обмоткой пониженного рабочего напряжения подходит для питания ручного электроинструмента.

На расчёт модулированных обмоток на частоту тока 200 Гц большое влияние оказывают потери в стали. Потери в зубцах статора (при индукции

в зубцах $B_{з1}$ и массе $G_{з1}$) и в спинке статора (при индукции в спинке $B_{с1}$ и массе $G_{с1}$): $P_{з1} = 1,7 p_{1,0/50} \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} B_{з1}^2 G_{з1}$ Вт; $P_{с1} = 1,7 p_{1,0/50} \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} B_{с1}^2 G_{с1}$ Вт,

где коэффициент 1,7 учитывает влияние технологического процесса изготовления сердечника статора, а также неравномерности распределения магнитной индукции; $p_{1,0/50}$ – удельные потери в стали при частоте перемагничивания 50 Гц и магнитной индукции 1,0 Тл.

Например, при толщине листов 0,5 мм и марки стали 2411:

$$P_{з1} = 17,3 B_{з1}^2 G_{з1} \text{ Вт}; \quad P_{с1} = 17,3 B_{с1}^2 G_{с1} \text{ Вт}.$$

Суммарные магнитные потери в сердечнике статора при холостом ходе, включающие добавочные потери, вызванные пульсацией магнитного поля из-за зубчатости поверхностей статора и ротора,

$$\sum P_c = P_{з1} \left[1 + 2 \sqrt{\frac{t_1}{10} (k_d - 1)^3} \right] + P_{с1} \text{ Вт},$$

где t_1 – зубцовое деление статора; k_d – коэффициент воздушного зазора.

Например, для генераторов на базе АИР100L8 и АИР112МА8:

$$\sum P_c = P_{з1} \left[1 + 2 \sqrt{\frac{7,4}{10} (1,35 - 1)^3} \right] + P_{с1} = 1,36 P_{з1} + P_{с1} \text{ Вт};$$

$$\sum P_c = P_{з1} \left[1 + 2 \sqrt{\frac{9,4}{10} (1,41 - 1)^3} \right] + P_{с1} = 1,51 P_{з1} + P_{с1} \text{ Вт},$$

или: $\sum P_c = 23,5 B_{з1}^2 G_{з1} + 17,3 B_{с1}^2 G_{с1}$ Вт; $\sum P_c = 26,1 B_{з1}^2 G_{з1} + 17,3 B_{с1}^2 G_{с1}$ Вт.

Масса стали спинки и зубцов статора

$$G_{с1} = 7,8 p (D_a - h) h_a l \cdot 10^{-6};$$

$$G_{з1} = 7,8 Z h_{з1} h l \cdot 10^{-6},$$

где $h_{з1}$ – ширина зубца статора.

Для базовых двигателей АИР100L8 и АИР112МА8:

$$G_{с1} = 7,8 \cdot 3,14 (168 - 17) 10,8 \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 3,7 \text{ кг};$$

$$G_{з1} = 7,8 \cdot 48 \cdot 4,2 \cdot 17 \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 2,65 \text{ кг};$$

$$G_{c1} = 7,8 \cdot 3,14(191 - 18)11,8 \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 5 \text{ кг};$$

$$G_{s1} = 7,8 \cdot 48 \cdot 5,35 \cdot 18 \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 3,6 \text{ кг}.$$

Потери в стали генератора на базе АИР100L8 и АИР112МА8:

$$\sum P_c = 63B_{s1}^2 + 64B_{c1}^2 \text{ Вт};$$

$$\sum P_c = 94B_{s1}^2 + 86,5B_{c1}^2 \text{ Вт}.$$

Так, при индукции $B_\delta = 0,90$ Тл, индукция в зубцах статора генератора на базе АИР100L8 составляет 1,55 Тл и на базе АИР112МА8 - 1,46 Тл. Индукция в спинке статора равна соответственно 1,225 и 1,31 Тл. С учётом значений индукции потери в стали генераторов:

$$\sum P_c = 63 \cdot 1,55^2 + 64 \cdot 1,225^2 = 247 \text{ Вт};$$

$$\sum P_c = 94 \cdot 1,46^2 + 86,5 \cdot 1,31^2 = 348 \text{ Вт}.$$

3 Асинхронные генераторы с модулированными обмотками статора на частоту тока 50 Гц и методика их расчета

Что касается модуляции МДС частей фазных двухполюсных обмоток со смещением на угол a , то в виду диаметрального расположения статорных катушек речь может идти лишь о фазной модуляции:

$$F = F_m [\cos x \cdot \sin(\omega t - 2\pi/3) + \cos(x - \alpha) \cdot \sin \omega t + \cos(x - \beta) \cdot \sin(\omega t - 4\pi/3) + \cos(x - \beta - \alpha) \cdot \sin(\omega t - 2\pi/3) + \cos(x - 2\beta) \cdot \sin \omega t + \cos(x - 2\beta - \alpha) \cdot \sin(\omega t - 4\pi/3)] = F_m/2 [\sin(\omega t - 2\pi/3 - x) + \sin(\omega t - 2\pi/3 + x) + \sin(\omega t - x + \alpha) + \sin(\omega t + x - \alpha) + \sin(\omega t - 4\pi/3 - x + \beta) + \sin(\omega t - 4\pi/3 + x - \beta) + \sin(\omega t - 2\pi/3 - x + \beta + \alpha) + \sin(\omega t - 2\pi/3 + x - \beta - \alpha) + \sin(\omega t - x + 2\beta) + \sin(\omega t + x - 2\beta) + \sin(\omega t - 4\pi/3 - x + 2\beta + \alpha) + \sin(\omega t - 4\pi/3 + x - 2\beta - \alpha)].$$

Результат модуляции при $b = 2\pi/3$ (рис. 21)

$$F = F_m/2 [\sin(\omega t - 2\pi/3 - x) + \sin(\omega t - 2\pi/3 + x) + \sin(\omega t - x + \alpha) + \sin(\omega t + x - \alpha) + \sin(\omega t - 4\pi/3 - x + 2\pi/3) + \sin(\omega t - 4\pi/3 + x - 2\pi/3) + \sin(\omega t - 2\pi/3 - x + 2\pi/3 + \alpha) + \sin(\omega t - 2\pi/3 + x - 2\pi/3 - \alpha) + \sin(\omega t - x + 4\pi/3) + \sin(\omega t + x - 4\pi/3) + \sin(\omega t - 4\pi/3 - x + 4\pi/3 + \alpha) + \sin(\omega t - 4\pi/3 + x - 4\pi/3 - \alpha)],$$

$$F = F_m/2 [\sin(\omega t - 2\pi/3 - x) + \sin(\omega t - 2\pi/3 + x) + \sin(\omega t - x + \alpha) + \sin(\omega t + x - \alpha) + \sin(\omega t - 2\pi/3 - x) + \sin(\omega t + x) + \sin(\omega t - x + \alpha) + \sin(\omega t - 4\pi/3 + x - \alpha) + \sin(\omega t - x + 4\pi/3) + \sin(\omega t + x - 4\pi/3) + \sin(\omega t - x + \alpha) + \sin(\omega t - 2\pi/3 + x - \alpha)],$$

$$F = F_m/2 [3\sin(\omega t - x - 2\pi/3) + 3\sin(\omega t - x + \alpha)],$$

$$F = 3/2 F_m [\sin(\omega t - x - 2\pi/3) + \sin(\omega t - x + \alpha)],$$

$$F = 3/4 F_m [\sin(\omega t - x - \pi/3 + \alpha/2) \cdot \cos(-\pi/3 - \alpha/2)],$$

$$F = 3/4 F_m [\sin(\omega t - x - \pi/3 + \alpha/2) \cdot \cos(\pi/3 + \alpha/2)].$$



Рис. 21 - Схема токов в слое катушек до и после модуляции и векторная диаграмма ЭДС, $b = 2\pi/3$ (последовательность соединения фаз А, В, С)

Результат модуляции при $b = 4\pi/3$ (рис. 22)

$$F = F_m/2 [\sin(\omega t - 2\pi/3 - x) + \sin(\omega t - 2\pi/3 + x) + \sin(\omega t - x + \alpha) + \sin(\omega t + x - \alpha) + \sin(\omega t - 4\pi/3 - x + 4\pi/3) + \sin(\omega t - 4\pi/3 + x - 4\pi/3) + \sin(\omega t - 2\pi/3 - x + 4\pi/3 + \alpha) + \sin(\omega t - 2\pi/3 + x - 4\pi/3 - \alpha) + \sin(\omega t - x + 8\pi/3) + \sin(\omega t + x - 8\pi/3) + \sin(\omega t - 4\pi/3 - x + 8\pi/3 + \alpha) + \sin(\omega t - 4\pi/3 + x - 8\pi/3 - \alpha)],$$

$$F = F_m/2 [3\sin(\omega t - 2\pi/3 + x) + 3\sin(\omega t + x - \alpha)],$$

$$F = 3/2 F_m [\sin(\omega t - 2\pi/3 + x) + \sin(\omega t + x - \alpha)],$$

$$F = 3/4 F_m [\sin(\omega t - \pi/3 + x - \alpha/2) \cdot \cos(-\pi/3 + \alpha/2)],$$

$$F = 3/4 F_m [\sin(\omega t - \pi/3 + x - \alpha/2) \cdot \cos(\pi/3 - \alpha/2)].$$

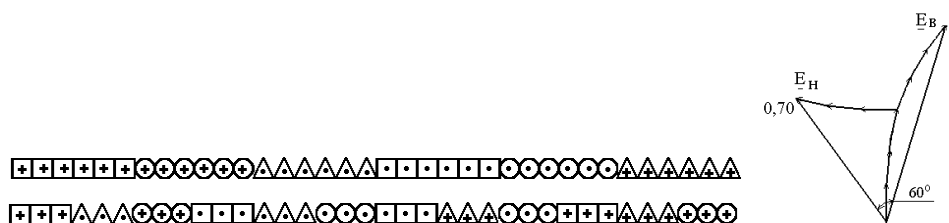


Рис. 22 – Схема токов в слое катушек до и после модуляции и векторная диаграмма ЭДС, $b = 4\pi/3$ (последовательность соединения фаз А, С, В)

Результаты модуляции МДС эквивалентных схем соединений катушечных групп половин фазных обмоток:

$$F = 3/4 F_m [\sin(\omega t - \pi/3 + \alpha/2) \cdot \cos(\pi/3 + \alpha/2)] \text{ (рис. 23);}$$

$$F = 3/4 F_m [\sin(\omega t - \alpha - \pi/3 - \alpha/2) \cdot \cos(\pi/3 - \alpha/2)] \text{ (рис. 24).}$$

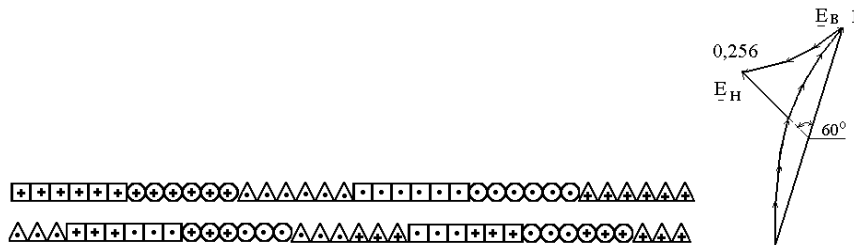


Рис. 23 – Схема токов в слое катушек до и после модуляции и векторная диаграмма ЭДС, $b = 4\pi/3$ (последовательность соединения фаз А, С, В)

При $\cos(p/3 - a/2)$ МДС основной гармоники после модуляции больше, чем при $\cos(p/3 + a/2)$.

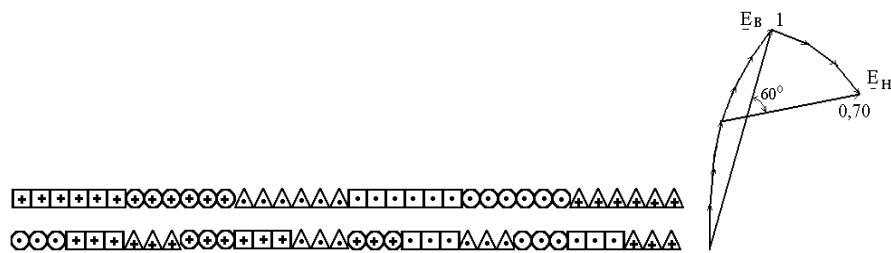


Рис. 24 – Схема токов в слое катушек до и после модуляции и векторная диаграмма ЭДС, $b = 2\pi/3$ (последовательность соединения фаз А, В, С)

Варианты схем соединения фаз и схемы токов в частях обмотки показаны на рисунках 25 и 26. Очевидно, что при включении конденсаторов на выводы «В» их ёмкость значительно уменьшается.

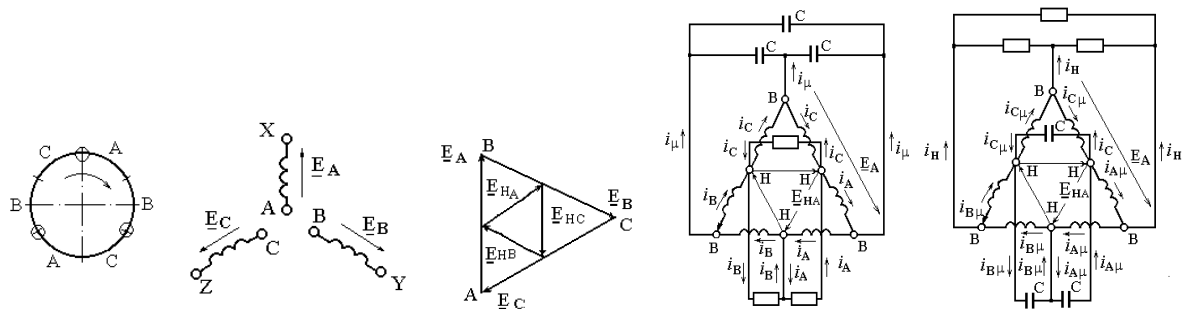


Рис. 25 – Схема соединением фаз в последовательности А, В, С, схемы включения конденсаторов и схемы токов в частях обмотки

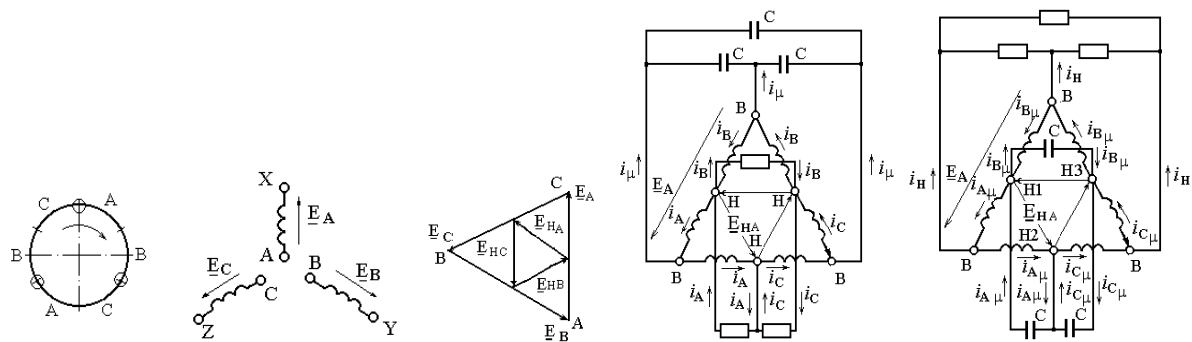


Рис. 26 – Схема соединением фаз в последовательности А, С, В, схемы включения конденсаторов и схемы токов в частях обмотки

Положительной особенностью обмотки с чередованием катушек 3 – 3 и шагом $y = 15$ (рис. 27 и 28) является то, что проводники разного сечения можно расположить в одних и тех же пазах.

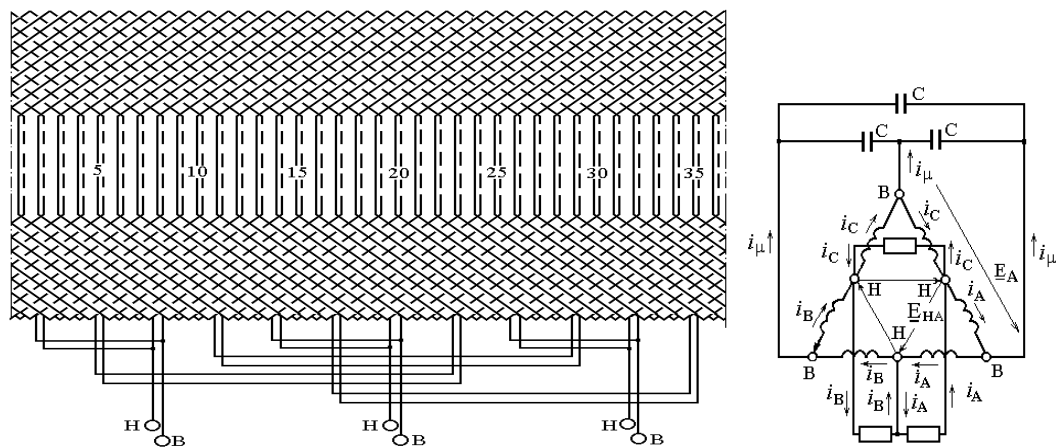


Рис. 27 – Схема модулированной двухполюсной обмотки

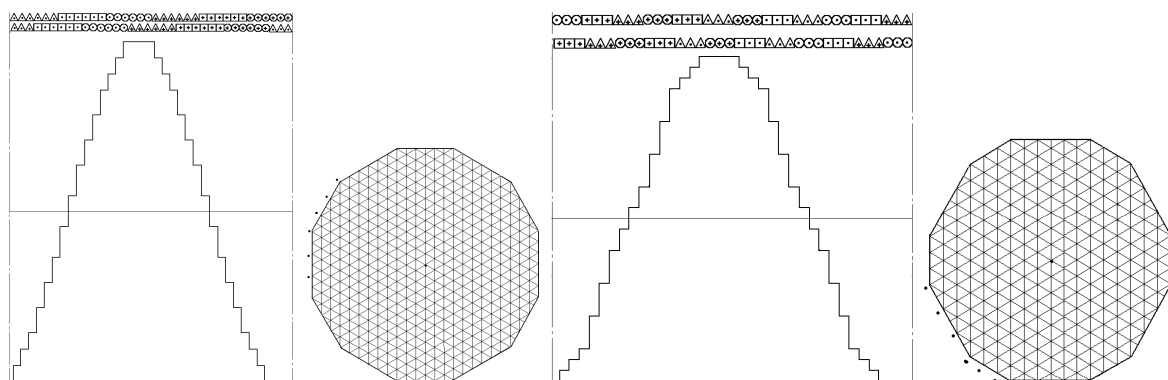


Рис. 28 – МДС и диаграммы Гёргеса от токов возбуждения и нагрузки

Радиус основной гармоники МДС ($k_{об} = 0,9235$), полярный момент инерции пазовых точек диаграммы Гёргеса и значение коэффициента дифференциального рассеяния от тока возбуждения:

$$R_p = \frac{Zk_{об}}{2pp} = \frac{72 \cdot 0,9235}{2 \cdot 3,1416 \cdot 1} = 10,5825;$$

$$R_d^2 = [2(7^2 + 5^2 - 2 \cdot 7 \cdot 5 \cdot \cos 120^\circ) + 2(9^2 + 3^2 - 2 \cdot 9 \cdot 3 \cdot \cos 120^\circ) + 2(10^2 + 1^2 - 2 \cdot 10 \cdot 1 \cdot \cos 120^\circ)] / 6 = 112,3333;$$

$$t_{\partial 0} = \frac{R_d^2}{R_p^2} - 1 = \frac{112,3333}{10,5825^2} - 1 = 0,00307.$$

От тока нагрузки на выводах «Н» ($k_{об} = 0,676$):

$$R_p = \frac{Zk_{об}}{2pp} = \frac{72 \cdot 0,676}{2 \cdot 3,1416 \cdot 1} = 7,7464;$$

$$R_d^2 = [2(5^2 + 4^2 - 2 \cdot 5 \cdot 4 \cdot \cos 120^\circ) + 2(7^2 + 1^2 - 2 \cdot 7 \cdot 1 \cdot \cos 120^\circ) + 2(6^2 + 3^2 - 2 \cdot 6 \cdot 3 \cdot \cos 120^\circ)] / 6 = (122 + 114 + 126) / 6 = 60,3333;$$

$$t_{\partial} = \frac{R_d^2}{R_p^2} - 1 = \frac{60,3333}{7,7464^2} - 1 = 0,00544.$$

От тока возбуждения и от равного ему активного тока нагрузки при условных 144 пазах статора ($k_{об} = 0,5723$), рисунок 29:

$$R_p = \frac{Zk_{об}}{2pp} = \frac{144 \cdot 0,5723}{2 \cdot 3,1416 \cdot 1} = 13,116;$$

$$R_d^2 = [(12^2 + 3^2 - 2 \cdot 12 \cdot 3 \cdot \cos 120^\circ) + 13^2 + (11^2 + 3^2 - 2 \cdot 11 \cdot 3 \cdot \cos 120^\circ) + (10^2 + 5^2 - 2 \cdot 10 \cdot 5 \cdot \cos 120^\circ) + (8^2 + 7^2 - 2 \cdot 8 \cdot 7 \cdot \cos 120^\circ) + (9^2 + 6^2 - 2 \cdot 9 \cdot 6 \cdot \cos 120^\circ)] / 6 = 172,6666;$$

$$t_{\partial} = \frac{R_d^2}{R_p^2} - 1 = \frac{172,6666}{13,116^2} - 1 = 0,0037.$$

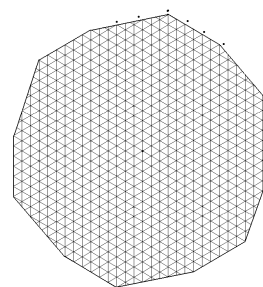
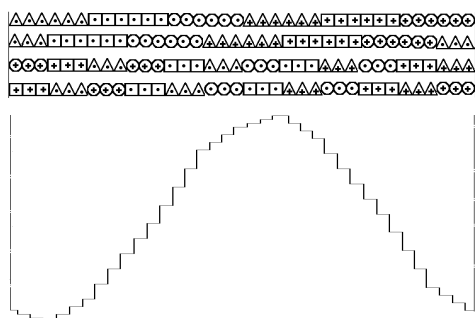


Рис. 29 - МДС и диаграмма Гёргеса при нагрузке

Характерный вид токов в частях обмотки на рисунке 30.

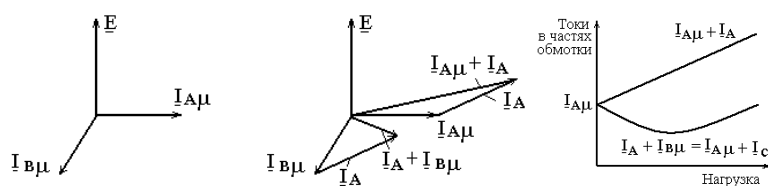


Рис. 30 - Характер изменения токов с ростом активной нагрузки

Пример расчёта модулированной обмотки ($E_g/E_n = 318/233$ В) генератора на базе АИР112М2.

Число витков на фазу

$$w = E / (222k_{об}\Phi) = 318 / (222 \cdot 0,9235 \cdot 10,8 \cdot 10^{-3}) = 144.$$

В катушке 12 витков. Катушки с током $I_{A\mu} + I_A$ (рис. 31) выполняем из двух проводов, а с током $I_A + I_{B\mu}$ из одного провода.

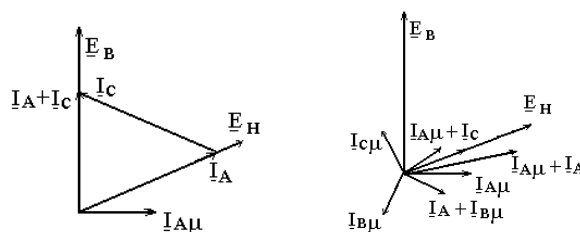


Рис. 31 – Реакция активного тока при симметричной нагрузке и векторная диаграмма токов при активной нагрузке

В пазу $N = 36$ проводников диаметром

$$d_{уз} = \sqrt{Q / N} = \sqrt{64 / 36} = 1,333 \text{ мм.}$$

Выбираем $d/d_{уз} = 1,25/1,33$ мм. Сечение провода $S = 1,23 \text{ мм}^2$.

Активное сопротивление частей обмотки:

$$R_{11} = 0,0223 \cdot 0,66 \cdot 72 / 1,23 = 0,86 \text{ Ом;}$$

$$R_{12} = 0,0223 \cdot 0,66 \cdot 72 / (2 \cdot 1,23) = 0,43 \text{ Ом.}$$

Намагничивающий ток

$$I_m = \frac{B_d p d k_d k_m}{\sqrt{2} m w k_{об} m_0} = \frac{0,80 \cdot 3,1416 \cdot 0,6 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2 \cdot 2,3}{1,414 \cdot 3 \cdot 144 \cdot 0,9235 \cdot 4 \cdot 3,1416 \cdot 10^{-7}} = 5,9 \text{ А.}$$

Реактивный ток ротора и его приведённое значение:

$$I_{2p} = \frac{(E / k_e) \cdot x_2 \cdot s_n^2}{R_2^2 + x_2^2 s_n^2} \approx \frac{(318 / 266,23) \cdot 1,04 \cdot 10^{-4} \cdot 0,023^2}{(1,02 \cdot 10^{-4})^2} = 6,3 \text{ А.}$$

$$I'_{2p} = \frac{I_{2p}}{k_i} = \frac{6,3}{28,52} = 0,22 \text{ А,}$$

где $k_e = \frac{wk_{об}/w_2k_{об2}}{m} = \frac{144 \cdot 0,9235}{0,5 \cdot 0,999} = 266,23$ и $k_i = \frac{mwk_{об}/m_2w_2k_{об2}}{m} = \frac{3 \cdot 144 \cdot 0,9235}{28 \cdot 0,5 \cdot 0,999} = 28,52$.

Сопротивление взаимоиндукции и индуктивное сопротивление статорной обмотки при холостом ходе генератора:

$$x_{m0} = \frac{E}{(I_m + I'_{2p})} = \frac{318}{6,12} = 52 \text{ Ом;}$$

$$\begin{aligned} x_{10} &= 4pf m_0 w^2 \left(\frac{l}{q} \cdot \frac{3b+1}{4} + 0,57 \frac{3b-1}{2} \cdot \frac{pD}{2} \right) + t_{о0} x_{m0} = \\ &= 0,79 \cdot 10^{-3} \cdot 144^2 \left(\frac{0,125}{6} \cdot \frac{3 \cdot 0,833 + 1}{4} + 0,57 \frac{3 \cdot 0,833 - 1}{2} \cdot \frac{3,14 \cdot 0,108}{2} \right) + \\ &+ 0,003 \cdot 52 = 1,49 + 0,16 = 1,65 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Потерям в статорной обмотке базового двигателя (402 Вт) отвечает активный ток нагрузки $I_A = 10,2 \text{ А}$ и токи в частях обмотки $\underline{I}_{Am} + \underline{I}_A = 15,6 \text{ А}$ и $\underline{I}_A + \underline{I}_{Bm} = 5,85 \text{ А}$ генератора.

Действительно, при этих токах потери в обмотке

$$\begin{aligned} P_{эл1} &= 3(\underline{I}_{Am} + \underline{I}_A)^2 R_{11} + 3(\underline{I}_A + \underline{I}_{Bm})^2 R_{12} = \\ &= 3 \cdot 15,6^2 \cdot 0,43 + 3 \cdot 5,85^2 \cdot 0,86 = 314 + 88 = 402 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

Из выражения

$$I_{m0} = I_m + I'_{2p} = \frac{E}{x_c - x_{10}} = \frac{318}{x_c - 1,65} = 6,12 \text{ А}$$

определяем сопротивление конденсаторов и их ёмкость:

$$x_c = 53,6 \text{ Ом; } C = 10^6 / \omega x_c = 10^6 / (314 \times 53,6) = 60 \text{ мкФ.}$$

Соотношение амплитуд основных гармоник МДС от номинального активного тока нагрузки и от тока возбуждения

$$I_{1a} k_{обн} / (I_{\mu 0} k_{обв}) = 10,2 \cdot 0,676 / (6,12 \cdot 0,9235) = 1,22.$$

Характер изменения потерь в статорной обмотке показан на рисунке 32 (штриховой линией отмечены потери с учетом приведённого реактивного тока ротора).

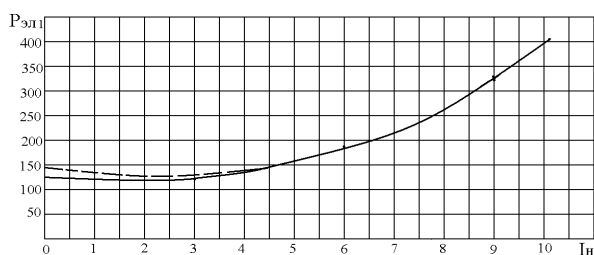


Рис. 32 – Вид потерь в статорной обмотке генератора с ростом нагрузки

Испытание экспериментального образца АГ реализованного по схеме рис. 27. Цель испытания: исследовать закономерность изменения тока в ветвях обмотки при изменении нагрузки при различных насыщениях магнитной системы статора и получить внешние характеристики.

Методика испытания. Обмотка статора (рис. 27 и 33) соединена треугольником и имеет выводы «В» - возбуждение и «Н» - нагрузка. В разрыв одной фазы включены два трансформатора тока ТА1 и ТА2 которые имеют общую точку для подключения нагрузки. Амперметры А1 и А2 фиксируют ток в плечах обмотки и на графиках обозначены как I_1 и I_2 . Общий ток нагрузки и другие электрические параметры регистрирует измерительный комплект K_2 . Нагрузка создается жидкостным реостатом R_n , а коэффициент мощности регулируется фазорегулятором LD .

Асинхронный генератор возбуждается от конденсаторов возбуждения С1 - С3 или от сети. Изменяя величину емкости конденсаторов С1 - С3 устанавливаем напряжение возбуждения: (1 - 320 В, 2 - 313 В, 3 - 308 В, 4 - 301 В, 5- 292 В). Для каждого значения напряжения создается нагрузка, и записываются показания приборов.

По результатам исследования построена внешняя характеристика асинхронного генератора (рис. 34) и характер изменения тока нагрузки и в частях обмотки при разных напряжениях возбуждения (рис. 34-39).

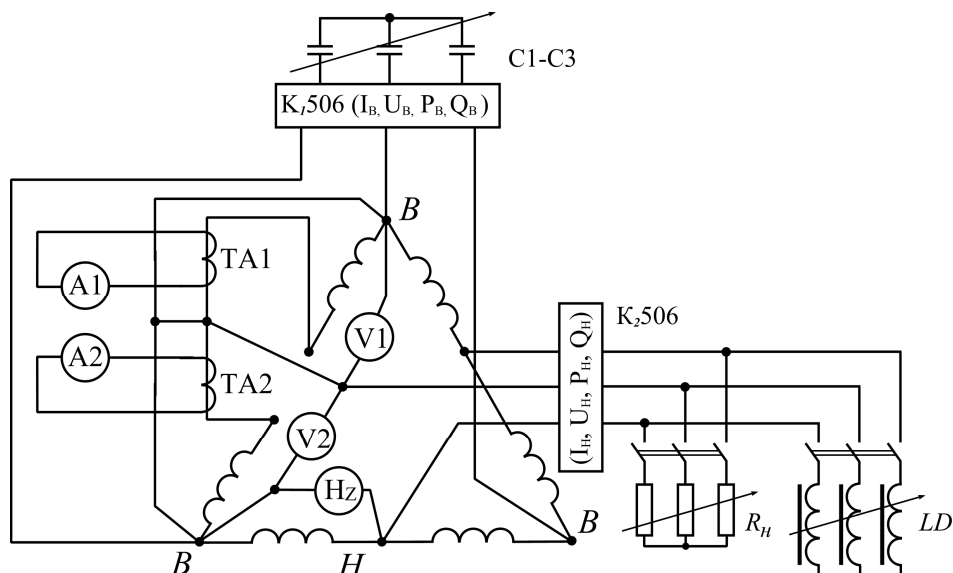


Рис. 33 – Схема лабораторных испытаний АГ (на схеме не показан ротор АГ и приводной двигатель постоянного тока со схемой управления). На схеме R_H - активная нагрузка (жидкостный реостат); LD - индуктивная нагрузка (фазорегулятор на базе асинхронного двигателя с фазным ротором); K_1 и K_2 - измерительные комплекты в цепи возбуждения АГ и в цепи нагрузки; $TA1$ и $TA2$ трансформаторы тока в плечах обмотки статора; $A1$ и $A2$ амперметры для измерения составляющих тока в плечах обмотки статора; H_z - частотомер.

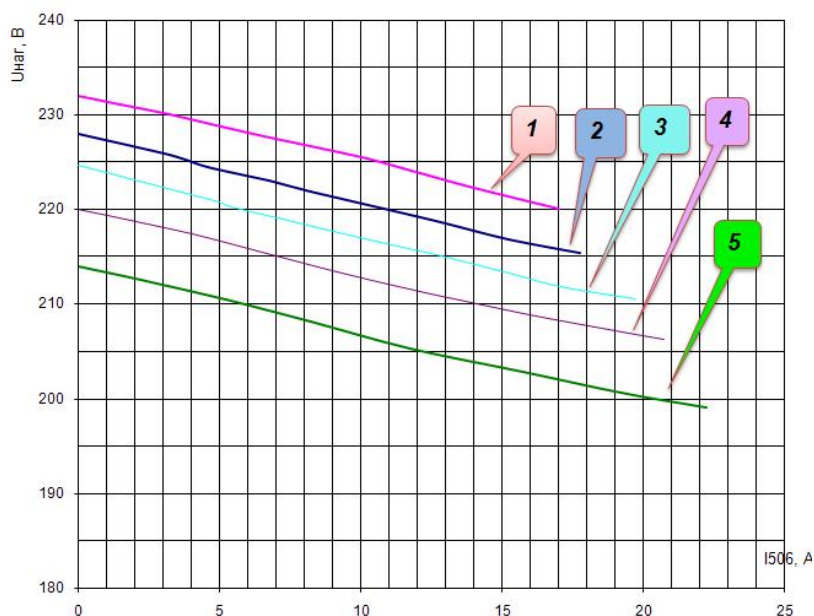


Рис. 34 - Внешние характеристики АГ при различных значениях напряжения возбуждения (1 - 320 В, 2 - 313 В, 3 - 308 В, 4 - 301 В, 5- 292 В)

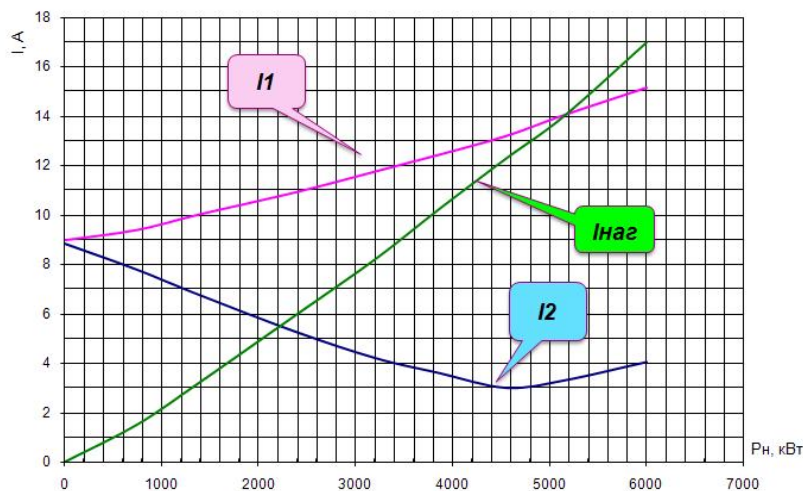


Рис. 35 - Характер изменения тока нагрузки и в частях обмотки при напряжении возбуждения равном 320 В

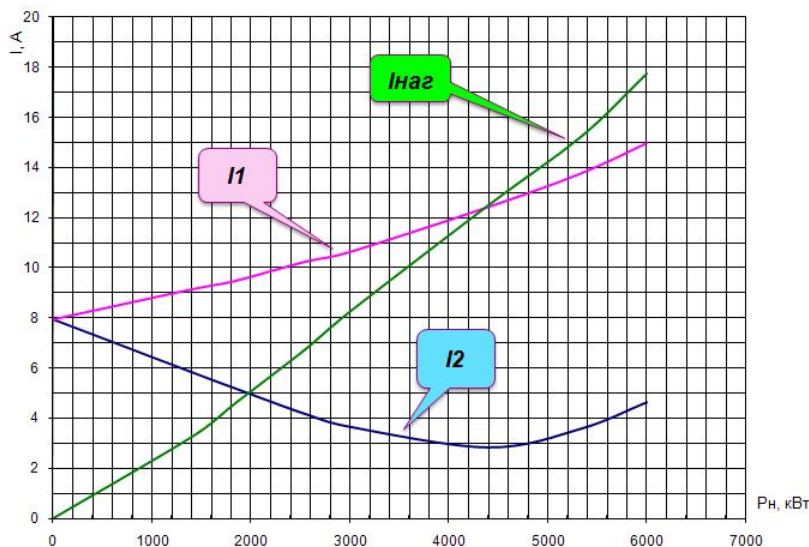


Рис. 36 - Характер изменения тока нагрузки и в частях обмотки при напряжении возбуждения равном 313 В

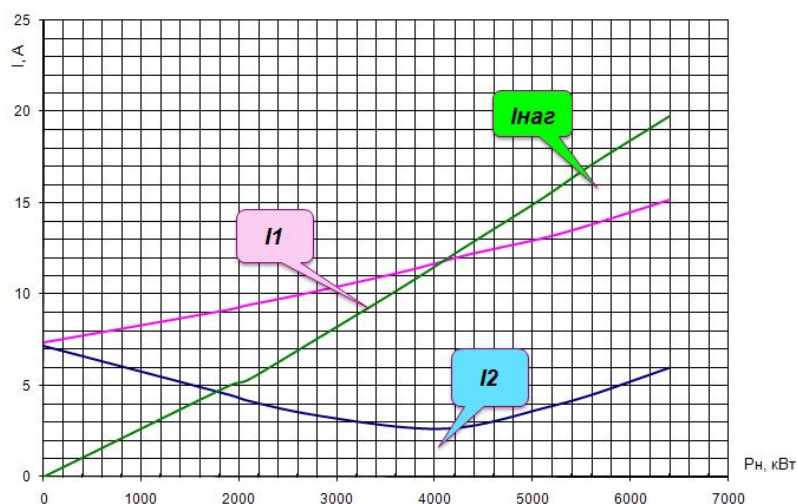


Рис. 37 - Характер изменения тока нагрузки и в частях обмотки при напряжении возбуждения равном 308 В

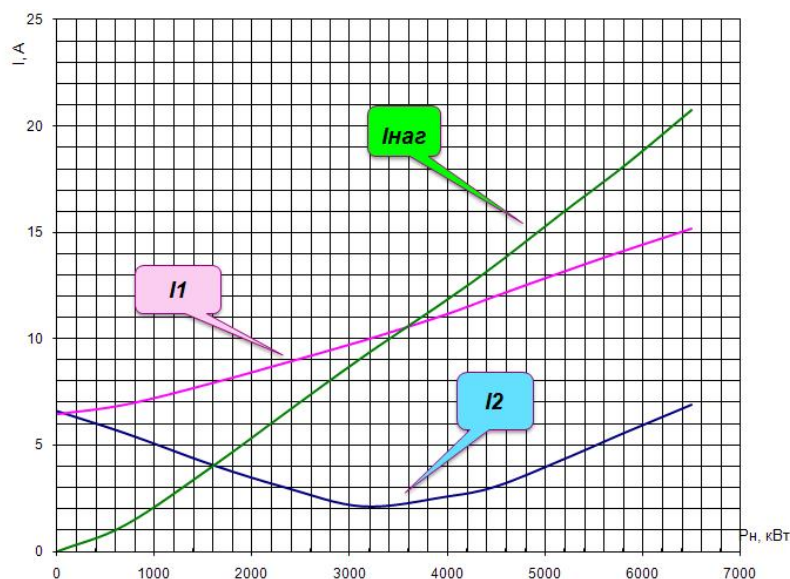


Рис. 38 - Характер изменения тока нагрузки и в частях обмотки при напряжении возбуждения равном 301 В

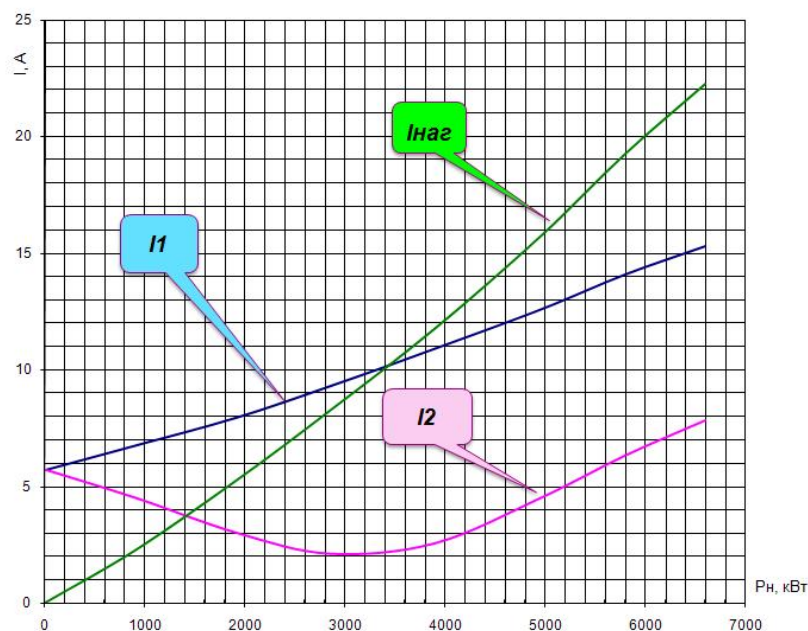


Рис. 39 - Характер изменения тока нагрузки и в частях обмотки при напряжении возбуждения равном 292 В

Анализ характеристик.

1. При расчетной номинальной мощности АГ, нагрузке около 4,5 кВт и напряжении возбуждения - 320 В, напряжение на нагрузке снижается от 232 до 223 (3,8%). При других значениях напряжениях возбуждения снижение напряжения на нагрузке имеет следующие величины: 313 В - 4,4 %; 308 В - 4,9 %; 301 В - 5,0%; 292 В - 5,1%.

2. При изменении нагрузки (рис. 35 - 39) ток *I1* и ток нагрузки возрастает пропорционально мощности нагрузке, что подтверждает теорети-

ческие предпосылки (рис. 30). Ток нагрузки I_2 в другом плече снижается до загрузки генератора номинальной мощностью и возрастает при перегрузке генератора.

Выводы.

1. Экспериментальные исследования подтверждают результаты расчета модулированной обмотки ($E_g/E_n = 318/233$ В) асинхронного генератора на базе АИР112М2.
2. Модулированные обмотки статора позволяют в определенных пределах стабилизировать выходное напряжение асинхронного генератора без дополнительных устройств и применять такие АГ в системах автономного электроснабжения мобильных токоприемников.

Литература

1. Богатырев Н.И. Асинхронные генераторы для систем автономного электроснабжения. **Часть 2.** Базовая теория формирования статорных обмоток асинхронных генераторов и методы расчета обмоток / Н.И. Богатырёв, В.Н. Ванурин, А.С. Креймер, П.П. Екименко
2. 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.