

УДК 621.31.03

UDC 621.31.03

СИНТЕЗ ОБМОТОК СТАТОРА ДЛЯ АСИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ И ДВИГАТЕЛЕЙ**SYNTHESIS OF STATOR WINDINGS FOR ASYNCHRONOUS GENERATORS AND MOTORS**

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 СКНИИМЭСХ, г. Зерноград, Россия

Vanurin Vladimir Nikolaevich
Dr.Sci.Tech., professor
SSU SKNIIMESH, Zernograd, Russia

Баракин Николай Сергеевич
ассистент

Barakin Nikolai Sergeevich
assistant

Семернин Дмитрий Юрьевич
инженер
Кубанский государственный аграрный университет, г. Краснодар, Россия

Semernin Dmitriy Yurievich
engineer
Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

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

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

Ключевые слова: АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ, АСИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР, СТАТОРНАЯ ОБМОТКА, ОБМОТОЧНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ, ПУСКОВОЙ ТОК ДВИГАТЕЛЯ

Keywords: INDUCTION MOTOR, INDUCTION GENERATOR, STATOR WINDING, WINDING FACTOR, STARTING CURRENT INDUCTION MOTORS

Основу большинства электроприводов во всех областях техники составляют простые в конструктивном отношении асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором. Одной из проблем короткозамкнутых двигателей является большая кратность пусковых токов. При пуске АД большой мощности снижается напряжение в сети, ухудшается работа ранее включенных в сеть двигателей, других приёмников электроэнергии.

Свойство обратимости электрических машин позволяет асинхронную машину применить и в качестве генератора автономной электростанции. По сравнению с маломощными синхронными генераторами с обмоткой возбуждения на роторе, недостатком которых является сложность обеспечения их конструктивного совершенства, асинхронные генераторы положительно характеризуются малыми габаритами и прочностью ротора.

Недостаток асинхронных генераторов связан со сложностью регулирования тока возбуждения для компенсации размагничивающего действия индуктивных составляющих токов нагрузки и ротора.

На характеристики асинхронных машин заметное влияние оказывают их параметры, обусловленные схемными признаками статорных обмоток. Современные приёмы формирования статорных обмоток позволяют методами усовершенствования их схем расширить поиск способов повышения энергетической эффективности асинхронных машин при их эксплуатации в известных режимах.

В автономной электростанции источником реактивной мощности асинхронному генератору служат конденсаторы. При наличии остаточного магнитного поля с числом периодов, равным числу пар полюсов статорной обмотки, процесс самовозбуждения генератора подобен физическому процессу в колебательном контуре (рис. 1 при скольжении $s \approx 0$). Установившиеся значения ЭДС и тока возбуждения определяет пересечение вольт-амперной характеристики конденсатора 2 с характеристикой намагничивания генератора 1.

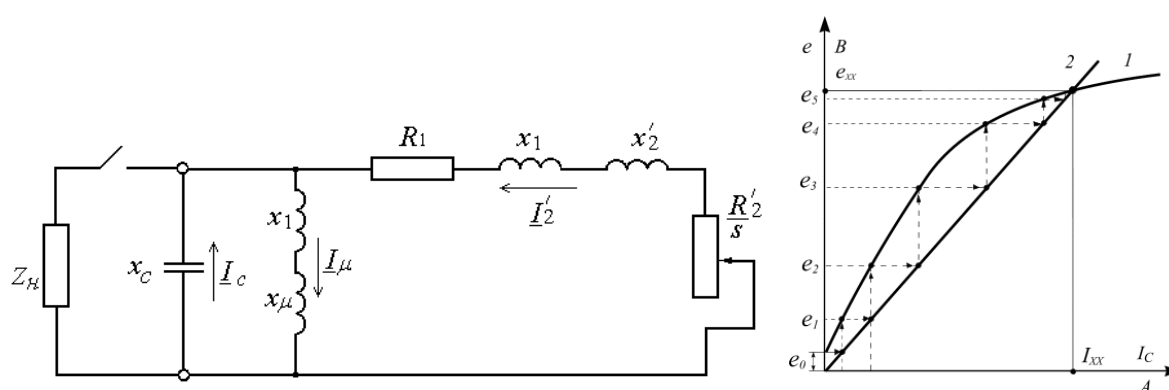


Рис. 1 – Схема замещения асинхронного генератора и процесс его самовозбуждения

Для уменьшения соотношения МДС от токов нагрузки и от возбуждения, следовательно, степени размагничивания тока нагрузки в генераторах известных производителей чаще применяют автотрансформаторный вариант статорной обмотки (рис. 2). Конденсаторы $C_{ст}$ являются старто-

выми и подключаются к основным конденсаторам на время пуска трёхфазных асинхронных двигателей или при значительном снижении напряжения. Мощность генератора с автотрансформаторной обмоткой снижается практически пропорционально коэффициенту трансформации.

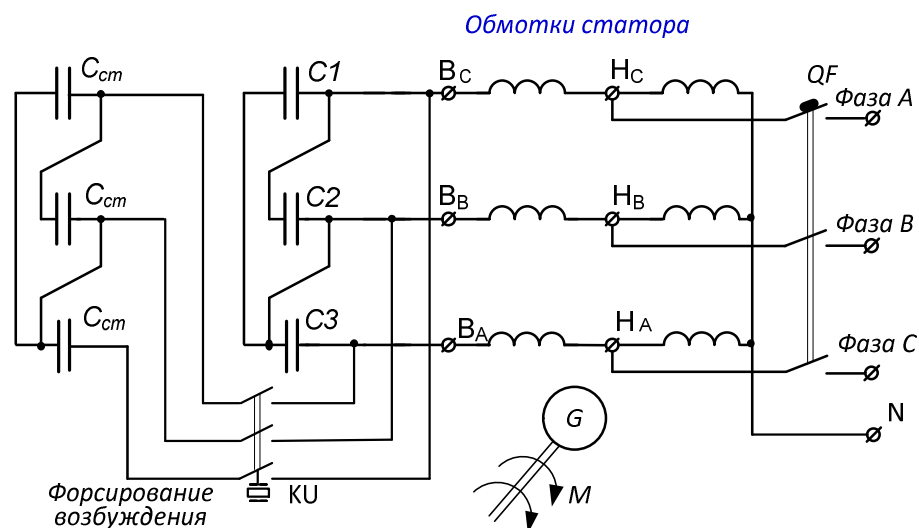


Рис. 2 – Схема функциональная асинхронного генератора с автотрансформаторной обмоткой и стартовыми конденсаторами. На схеме: $C_1 - C_3$ - конденсаторы возбуждения; $C_{ст}$ - конденсаторы стартовые; KU – реле для форсирования возбуждения; B_A, B_B, B_C – выводы для подключения конденсаторов возбуждения; H_A, H_B, H_C – выводы для подключения нагрузки; QF – автоматический выключатель.

Для повышения энергетической эффективности и удельной мощности асинхронных генераторов нами разработаны несколько вариантов схем статорных обмоток [2, 4]. В варианте схемы двухполюсной обмотки с шагом $y = 15$ (рис. 3) катушки последовательной и общей части укладываются в одни и те же пазы, что позволяет соотношением витков в катушках влиять на соотношение ЭДС на выводах. Конденсаторы включаются на выводы «В» - возбуждение, нагрузка – к выводам «Н».

В основу новых приёмов формирования статорных обмоток асинхронных генераторов положено представление чередования фазных зон статора и трёхфазной сети ($a = e^{j2p/3}$) в виде матриц:

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

Транспонированием фазных зон

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

любое исходное число пар полюсов преобразуется в $p = 1$.

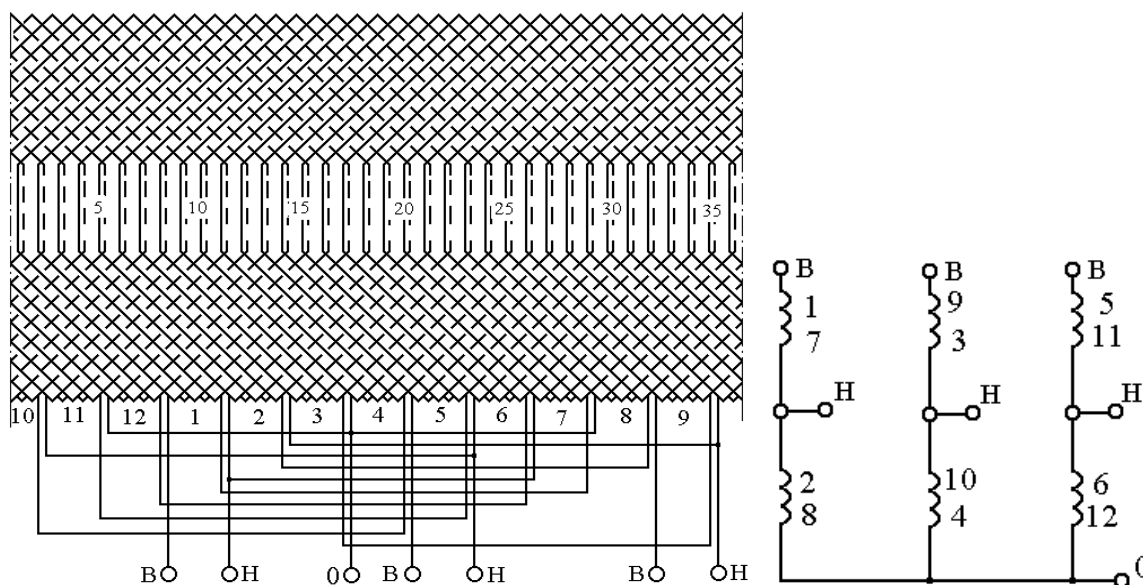


Рис. 3 – Схема автотрансформаторной обмотки генератора, Y-Y0

Преобразование базовой транспонированной матрицы определяет цепной вариант чередования зон ($A \times a = B$; $A \times a^2 = C$ и т. д), рис. 4 (стороны катушек фазы А обозначены квадратами, фазы В треугольниками, фазы С кругами).

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



Рис. 4 – Цепной вариант чередования катушечных групп

Чередование катушечных групп в цепном варианте совпадает с их чередованием при преобразовании МДС фазных обмоток по методу симметричной полюсно - амплитудной модуляции, согласно которому число катушек, приходящееся на фазную зону, пропорционально синусу угла расположения зон (рис. 5) [3].

Развитием метода послужило представление модулирующей волны её составляющими (рис. 6).

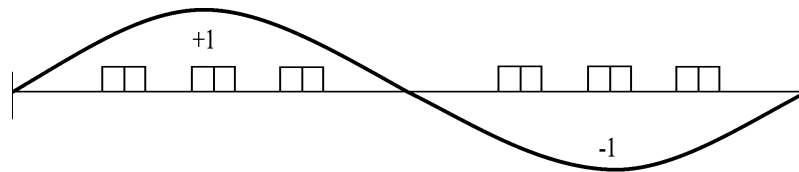


Рис. 5 – Представление модулирующей волны (для фазы А)

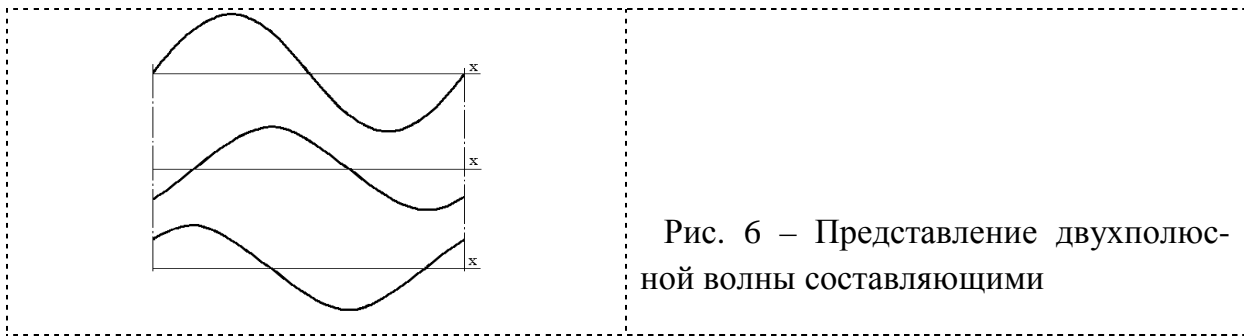


Рис. 6 – Представление двухполюсной волны составляющими

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

$$F = F_m [\cos p x \times \sin x \times \sin(\omega t - 2p/3) + \cos p(x - a) \times \sin(x - a) \times \sin \omega t + \cos p(x - b) \times \sin(x - b) \times \sin(\omega t - 4p/3) + \cos p(x - b - a) \times \sin(x - b - a) \times \sin(\omega t - 2p/3) + \cos p(x - 2b) \times \sin(x - 2b) \times \sin \omega t + \cos p(x - 2b - a) \times \sin(x - 2b - a) \times \sin(\omega t - 4p/3)].$$

Что касается двухполюсных обмоток, то в виду диаметрального расположения сторон катушек в слое речь может идти о фазной модуляции МДС половин фазных обмоток со смещением на угол *a* в виде

$$F = F_m [\cos x \times \sin(\omega t - 2p/3) + \cos(x - a) \times \sin \omega t + \cos(x - b) \times \sin(\omega t - 4p/3) + \cos(x - b - a) \times \sin(\omega t - 2p/3) + \cos(x - 2b) \times \sin \omega t + \cos(x - 2b - a) \times \sin(\omega t - 4p/3)] = F_m/2 [\sin(\omega t - 2p/3 - x) + \sin(\omega t - 2p/3 + x) + \sin(\omega t - x + a) + \sin(\omega t + x - a) + \sin(\omega t - 4p/3 - x + b) + \sin(\omega t - 4p/3 + x - b) + \sin(\omega t - 2p/3 - x + b + a) + \sin(\omega t - 2p/3 + x - b - a) + \sin(\omega t - x + 2b) + \sin(\omega t + x - 2b) + \sin(\omega t - 4p/3 - x + 2b + a) + \sin(\omega t - 4p/3 + x - 2b - a)].$$

Результат модуляции при рациональном значении $b = 2\pi/3$

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

Для $\alpha = 330^\circ$ (рис. 7)

$$F = 3F_m \sin(\omega t - x + 105^\circ) \cdot \cos 225^\circ.$$

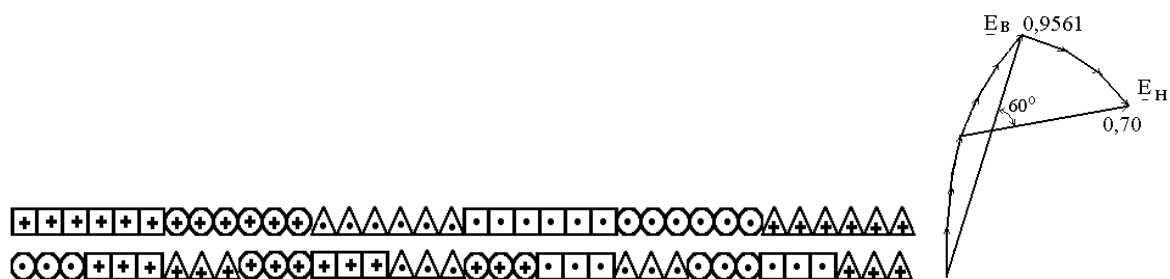


Рис. 7 – Схема токов в слое катушек до и после модуляции и векторная диаграмма ЭДС при $b = 2\pi/3$

Модулированная обмотка (рис. 8) отличаются характерным для них видом изменения токов в частях обмотки с ростом нагрузки. При шаге $y =$

15 проводники разного сечения частей обмотки с разной величиной тока расположены в одних и тех же пазах.

При выполнении двухполюсной обмотки с шириной фазной зоны 120° соотношение ЭДС между выводами «В» и «Н» становится равным 1/1. Результат модуляции МДС половин фазных обмоток при $\alpha = -60^\circ$ и $b = 2\pi/3$ (рисунки 9 и 10)

$$3F_m[\sin(\omega t - x - p/3 + a/2) \cdot \cos(p/3 + a/2)] = 3F_m \sin(\omega t - x + 90^\circ) \cos 30^\circ.$$

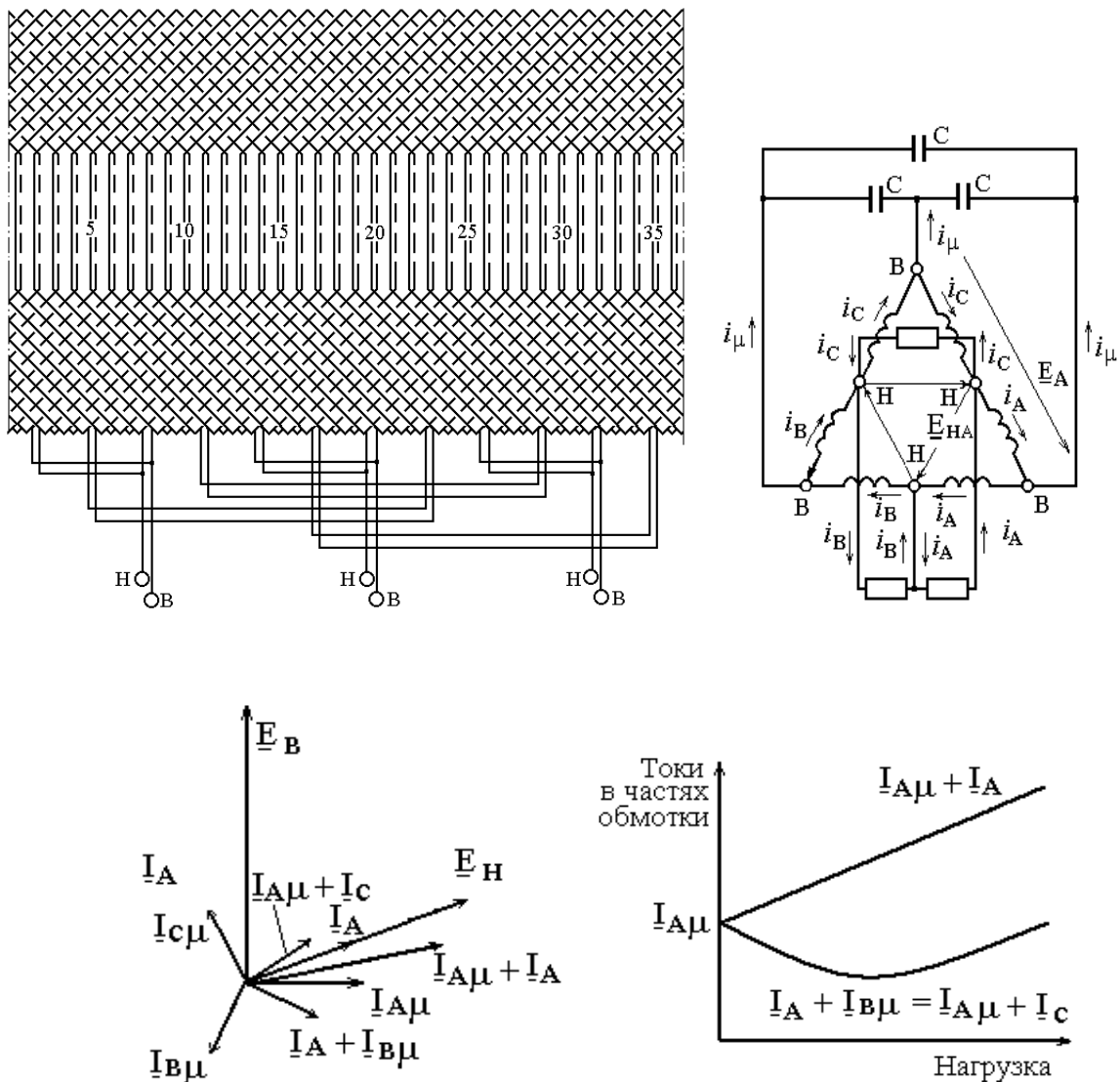


Рис. 8 – Схема обмотки, схема подключения нагрузки и направление токов в обмотках и нагрузке, векторная диаграмма токов в частях обмотки при активной нагрузке, характер изменения токов в частях обмотки фазы от нагрузки

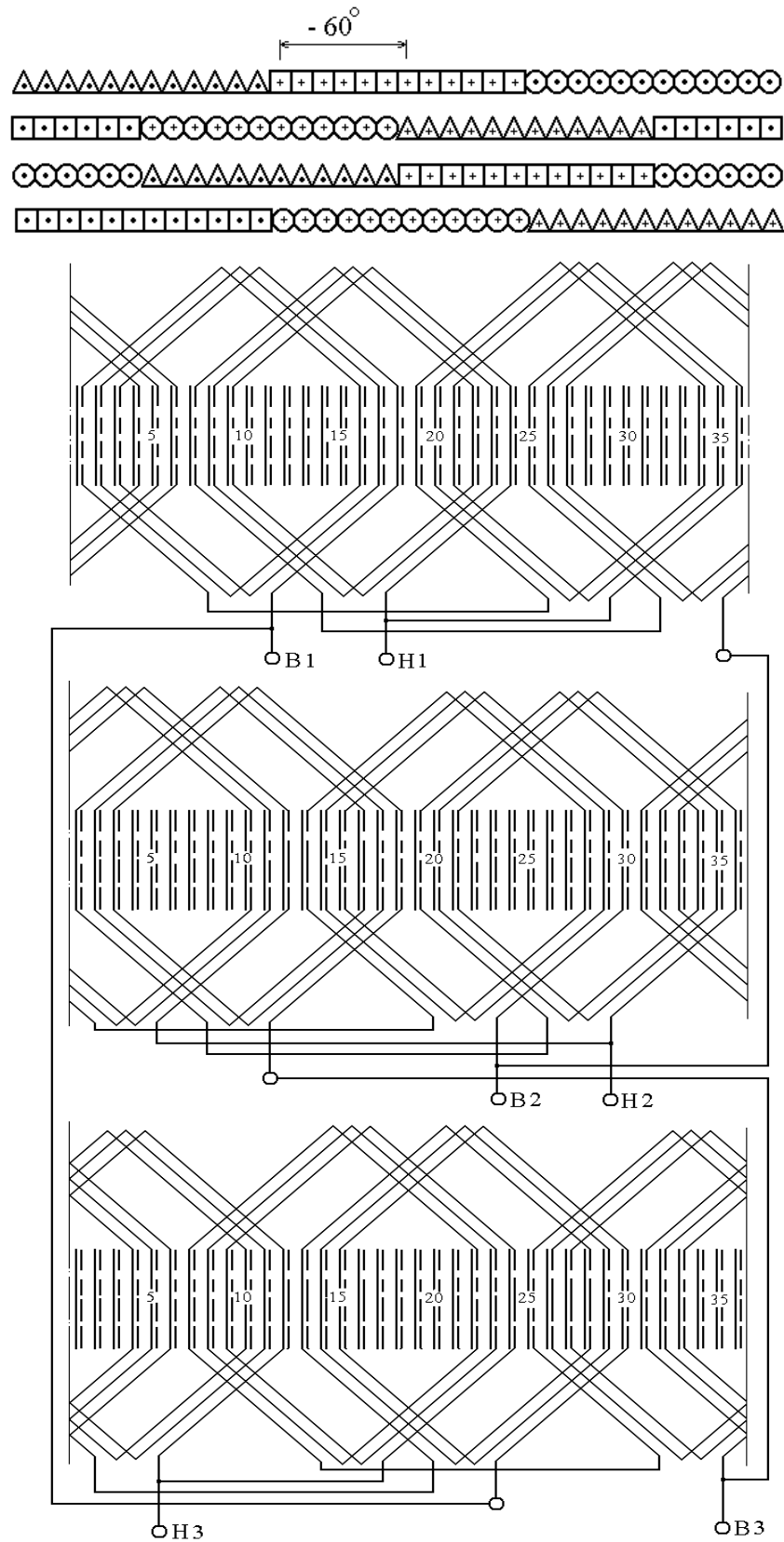


Рис. 9 – Схема токов в обмотках фаз до и после модуляции и последовательность соединения фаз двухслойной двухполюсной обмотки вразвалку при $b = 2p/3$

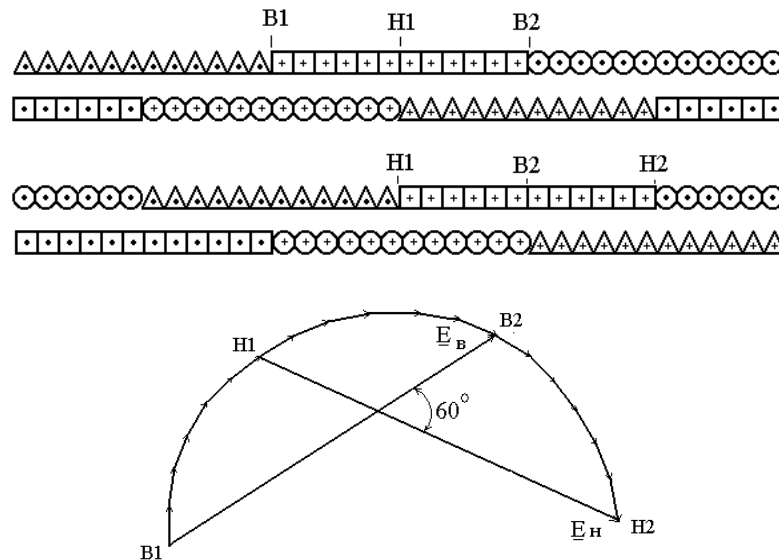


Рис. 10 – Схема токов до и после модуляции и векторная диаграмма ЭДС

Диаметральный шаг позволяет расположить катушки разного сечения частей обмотки в одних и тех же пазах (рис. 11).

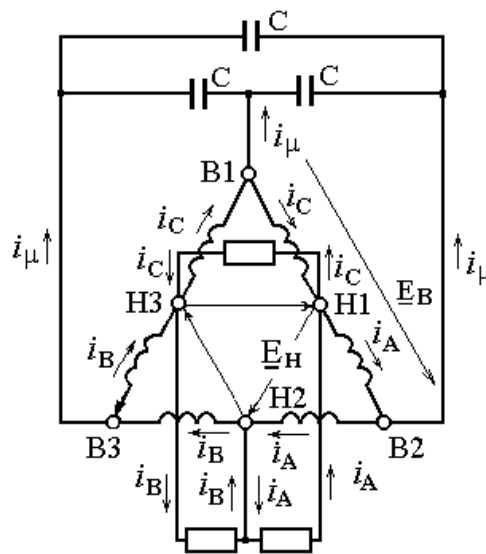


Рис. 11 – Схема токов при активной нагрузке

Значения $\alpha = -60^0$ и $b = 2\pi/3$ позволяют представить двухполюсную обмотку и в качестве обмотки шестифазного генератора (рис. 12). Геометрическая сумма токов возбуждения представлена в виде результирующих векторов. Пространственное смещение катушечных групп на 60^0 и фазовое смещение токов в катушечных группах на 60^0 способствует образованию шестифазной обмотки.

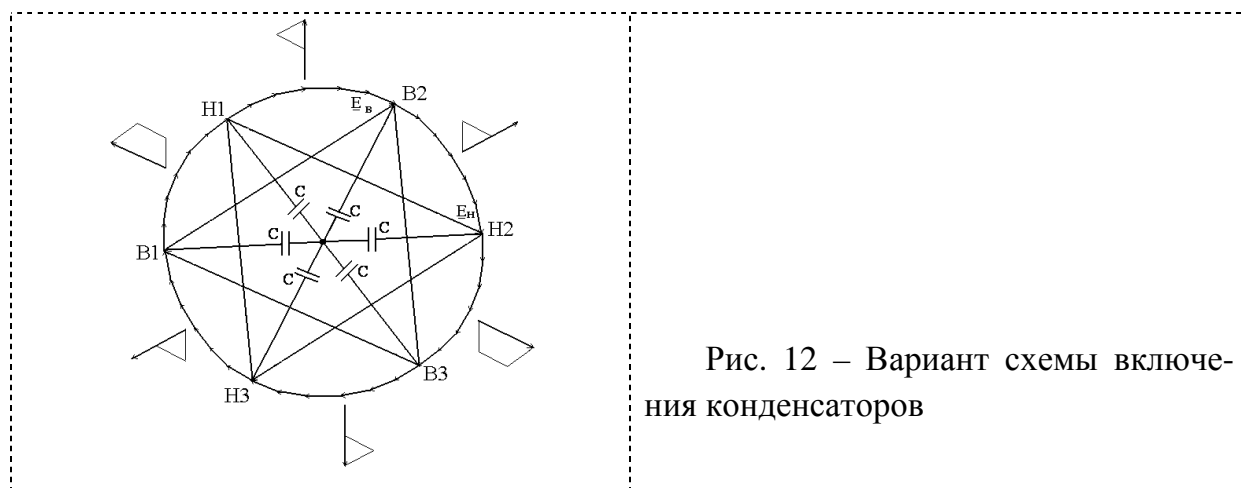


Рис. 12 – Вариант схемы включения конденсаторов

Схема четырёхполюсной обмотки генератора и схема восьмиполюсной обмотки генератора на частоту тока 200 Гц с соотношением ЭДС на выводах 1/1 показаны на рисунках 13 и 14.

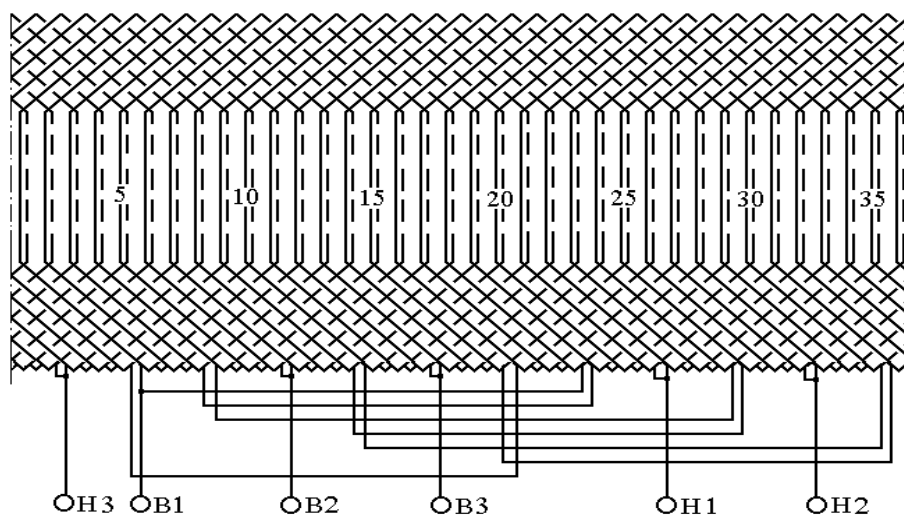


Рис. 13 – Схема четырёхполюсной обмотки (Δ , $b = 2p/3$)

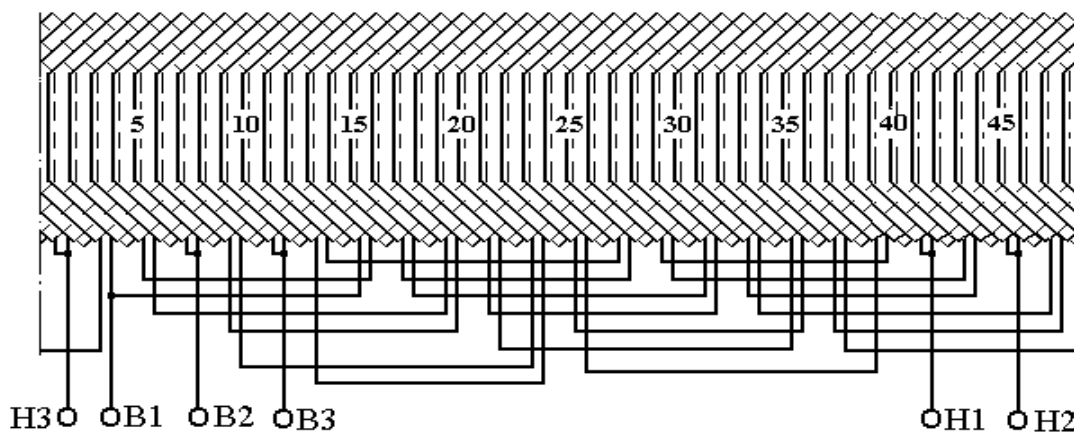


Рис. 14 – Схема восьмиполюсной обмотки

Результат модуляции МДС половин фазных обмоток при $\alpha = -60^\circ$ и $b = 4\pi/3$ (рис. 15)

$$3F_m [\sin(\omega t - x - p/3 - a/2) \cdot \cos(p/3 - a/2)] = 3F_m \sin(\omega t - x - 210^\circ) \cos 90^\circ = 0.$$

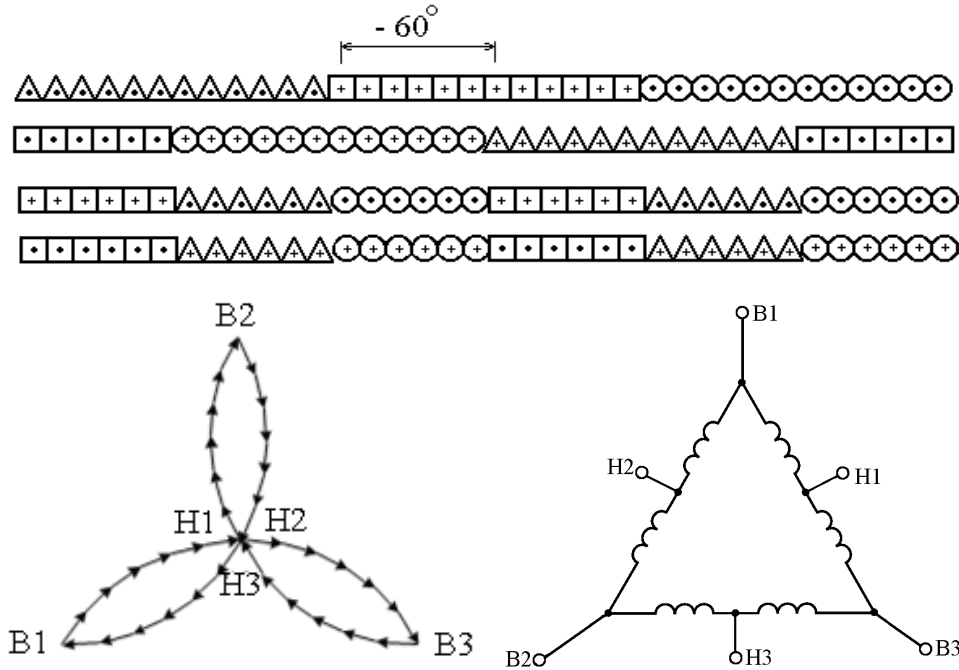


Рис. 15 – Схема токов до и после модуляции и векторная диаграмма ЭДС катушек при $b = 4p/3$ и схема соединений обмотки до модуляции (Δ , $b = 4p/3$)

Если после модуляции при $b = 4\pi/3$ реверсировать ток в половине фаз, то обмотка становится эквивалентной обмотке с шириной зоны 60° (рис. 16).

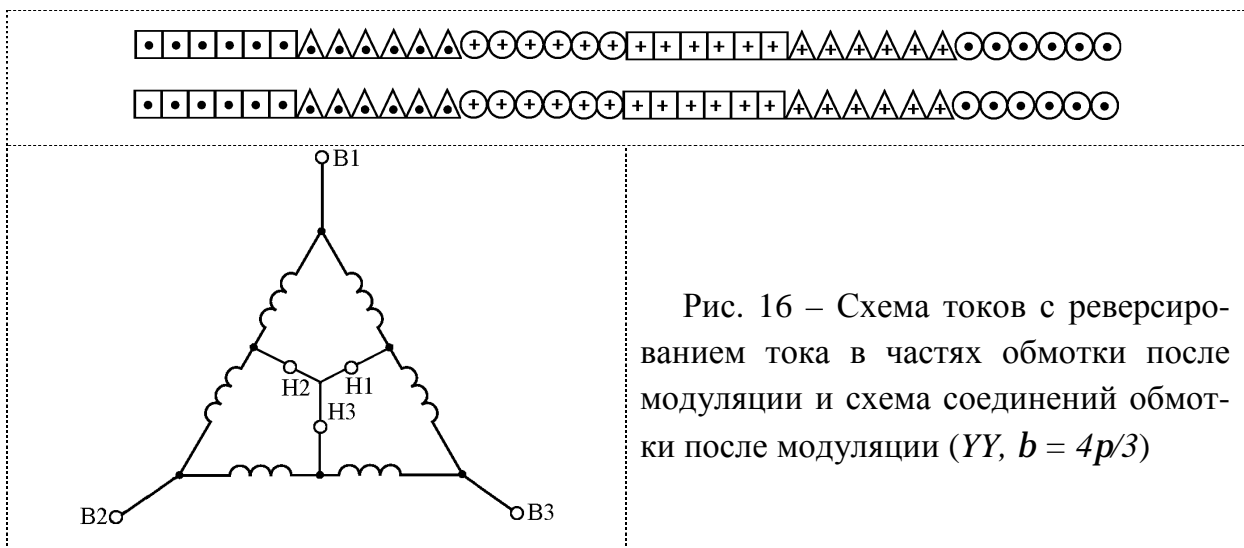


Рис. 16 – Схема токов с реверсированием тока в частях обмотки после модуляции и схема соединений обмотки после модуляции (Y , $b = 4p/3$)

Схемы вариантов соединения фазных обмоток показаны на рис. 17.

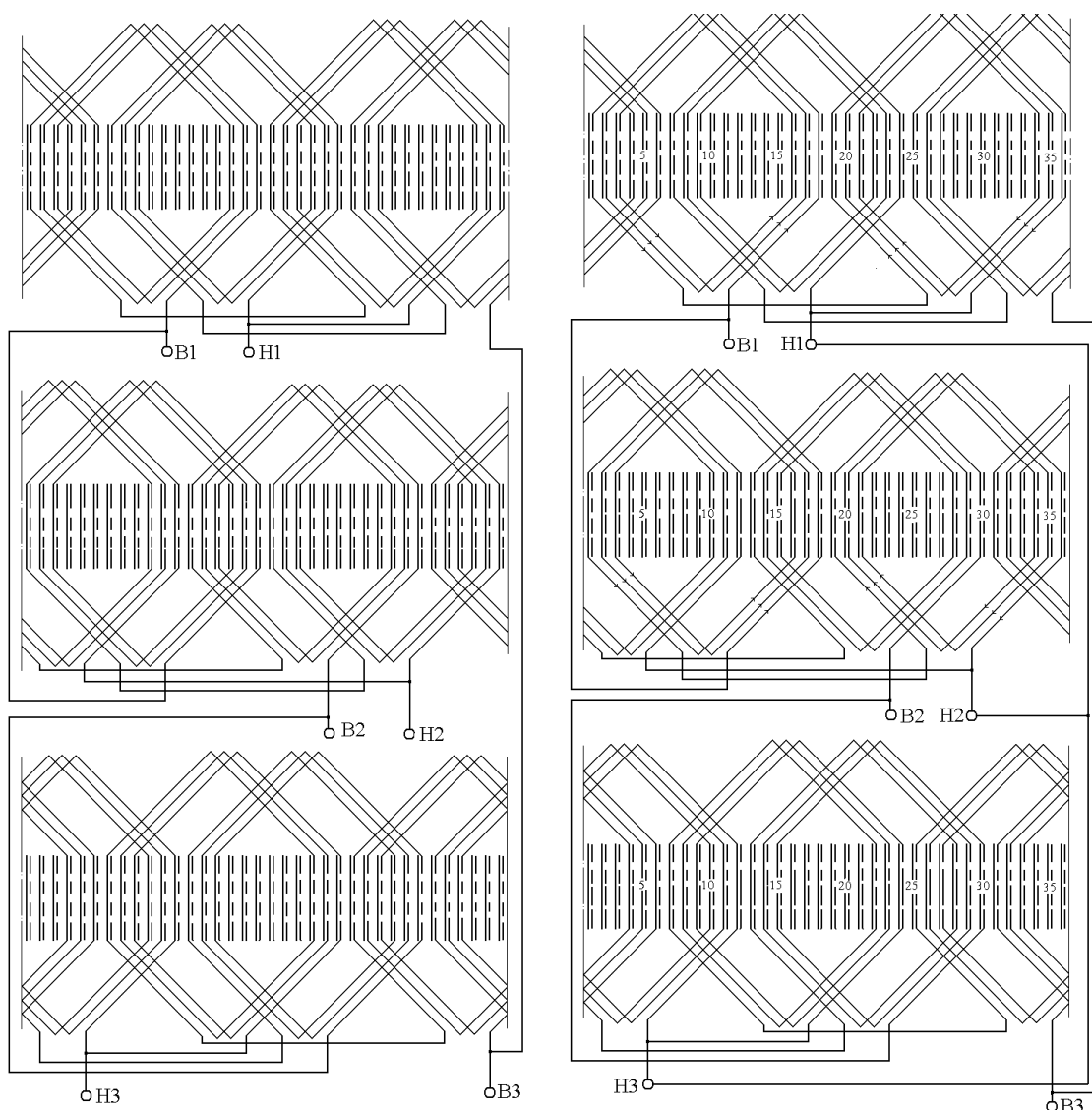


Рис. 17 – Последовательность соединения фаз двухслойной двухполюсной обмотки вразвалку в Δ и в Y ($b = 4p/3$)

При соединении фаз в треугольник трёхфазная нагрузка включается на выводы $B1, B2, B3$ (рис. 18). Однофазная нагрузка может включаться на выводы $B1 - H1, H1 - B3, B3 - H3, H3 - B2, B2 - H2$ и $H2 - B1$. При понижении напряжения выводы $H1, H2$ и $H3$ замыкают в каждой фазе на середины двух последовательно соединённых конденсаторов.

При соединении фаз в две звезды (при объединении выводов $H1, H2, H3$ в нулевую точку) трёхфазная нагрузка включается также на выводы $B1, B2, B3$, а однофазная на выводы $B1, B2, B3$ и на вывод из нулевой точки.

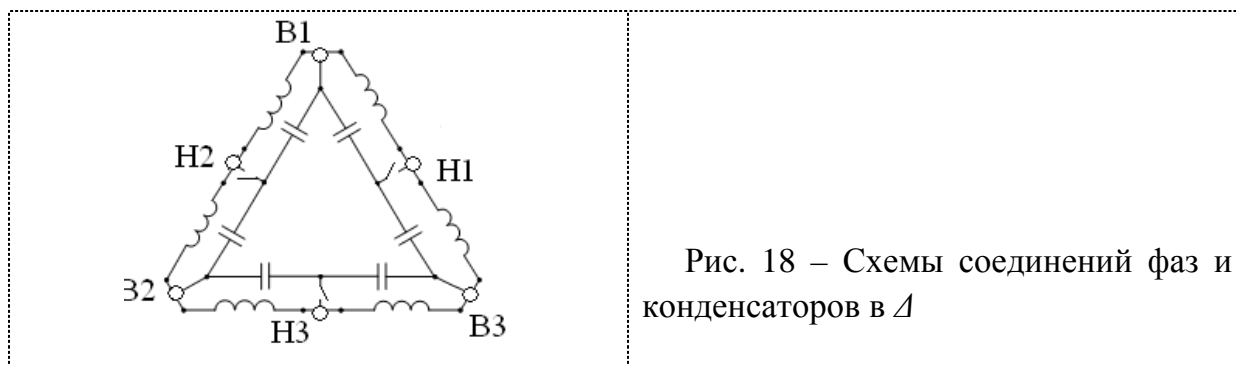


Рис. 18 – Схемы соединений фаз и конденсаторов в Δ

Возможное исполнение двухполюсной обмотки с укороченным шагом (рис. 19) приводит к ухудшению формы МДС при включении обмотки в треугольник. Обмотка с укороченным шагом и с переключения по схеме Δ/Y может решить проблему заметного снижения пускового тока двигателей средней и большой мощности. Аналогичные схемы обмоток четырёхполюсных и шестиполюсных двигателей показаны на рисунках 20 и 21.

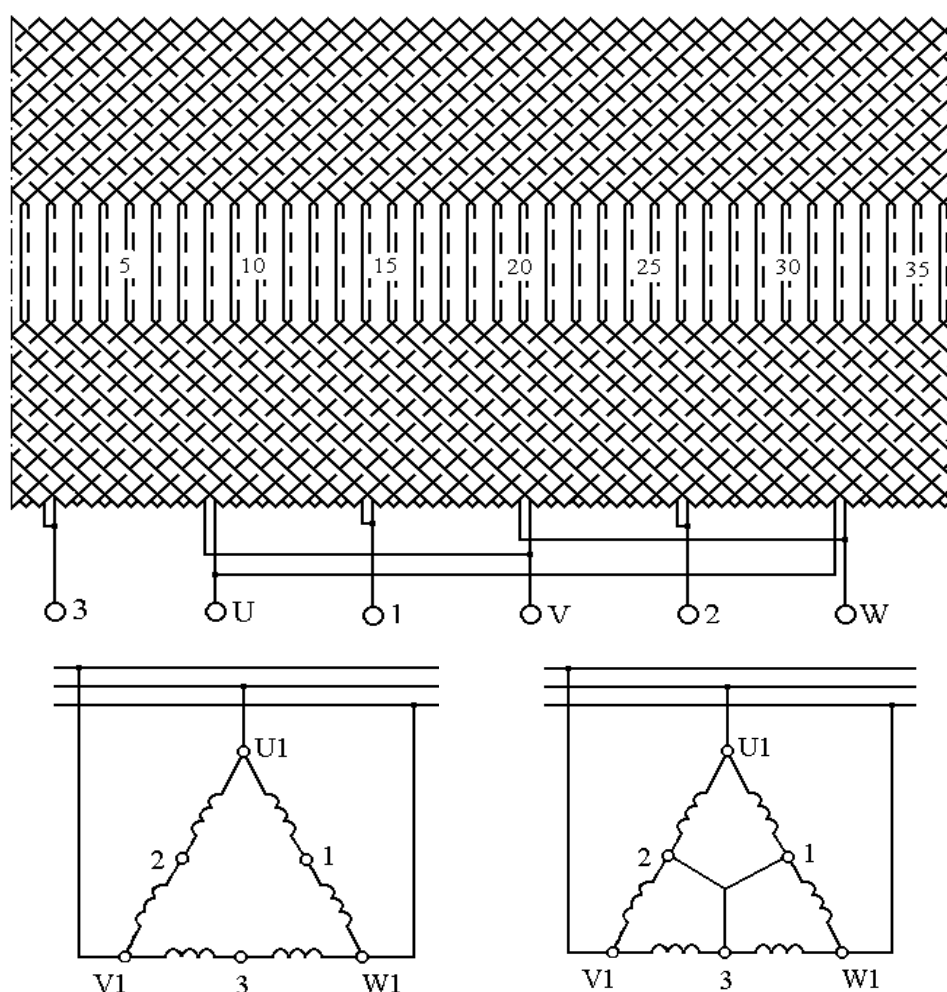


Рис. 19 – Схема двухполюсной обмотки ($\gamma = 15$) и схемы включения в сеть

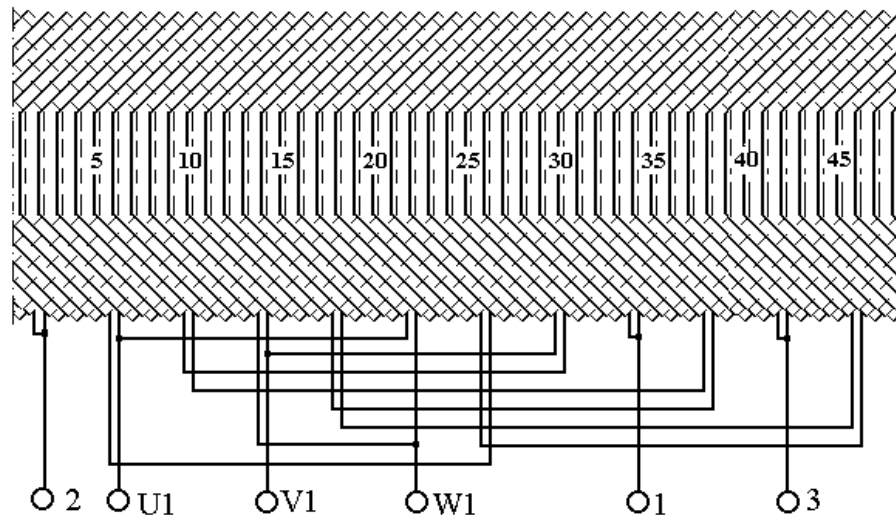


Рис. 20 – Схема четырёхполюсной обмотки, $y = 10$

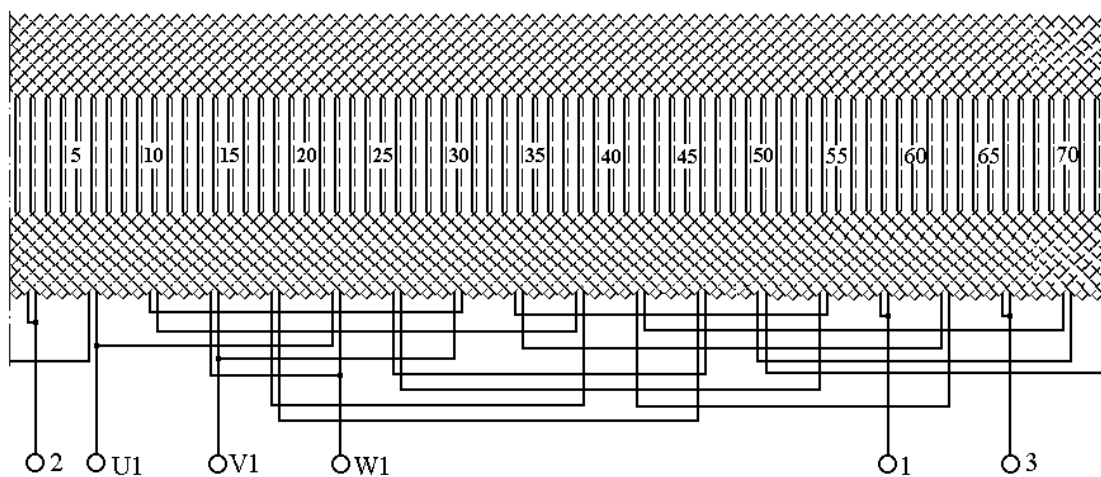


Рис. 21 – Схема шестиполюсной обмотки, $y = 10$

Пример расчёта соотношений пусковых токов асинхронного двигателя с обмоткой по схеме на рисунке 20 на базе АИР160S4 ($D = 0,163$ м; $l = 0,15$ м; $I_{1н} = 28,5$ А; $\cos j_n = 0,89$; $w = 104$; $k_{об} = 0,925$; $R_l = 0,27$ Ом; $P_{эл1} = 655$ Вт потери в статорной обмотке; $P_{эл2} = 380$ Вт – потери в роторной обмотке; $P_c = 420$ Вт – потери в стали; $P_m = 100$ Вт – потери механические; $k_m = 1,44$ – коэффициент насыщения магнитной цепи; $\delta = 0,5$ мм – воздушный зазор; $k_d = 1,31$ – коэффициент воздушного зазора; $Z_2 = 40$ – число пазов ротора; $k_{об2} = 0,999$ – обмоточный коэффициент роторной обмотки; $b_{ск} = 10,6$ мм – скос пазов ротора; $\tau_{\delta 2} = 0,0103$ – коэффициент дифференциального рассеяния роторной обмотки; $D_k = 0,135$ м, $h_k = 0,027$ м, $b_k = 0,025$ м $l_{r2} =$

0,006 м - соответственно диаметр, высота и ширина и длина лобовой части замыкающих колец роторной обмотки).

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

$$P_0 = mI_0^2 R_l + P_c + P_m \approx 3(I_{ln} \sin j_n)^2 R_l + P_c + P_m = \\ = 3(28,5 \cdot 0,456)^2 \cdot 0,27 + 420 + 100 = 657 \text{ Вт};$$

$$I_{0a} = P_0/mU_n = 657/(3 \cdot 220) \approx 1 \text{ А.}$$

Приведённое активное сопротивление и активное сопротивление роторной обмотки: $R_2' = \frac{P_{эл2}}{m(I_{1a} - I_{0a})^2} = \frac{380}{3(25,4 - 1)^2} = 0,21 \text{ Ом};$

$$R_2 = R_2' / k = 0,21 / 2782 = 0,755 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$$

где $k = mw^2 k_{об}^2 / m_2 w_2^2 k_{об2}^2 = 3 \cdot 104^2 \cdot 0,9252 / (40 \cdot 0,52 \cdot 0,9992) = 2782$.

Индуктивные сопротивления:

$$x_m' = 2pf \frac{Z_2 D l k_{об2}^2}{d k_d k_m p^2} = 314 \frac{40 \cdot 0,163 \cdot 0,15 \cdot 0,999^2}{0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,31 \cdot 1,44 \cdot 2^2} 10^{-7} = 81 \cdot 10^{-4} \text{ Ом};$$

$$x_2 = 2p f m_0 (l + 2l_{л2} \frac{2,3D_k}{Z_2 l (2 \sin \frac{p p}{Z_2})^2} \lg \frac{4,7D_k}{2h_k + b_k} + t_{2o} \frac{D l Z_2 k_{об2}^2}{4p d k_d k_m p^2}) = 3,94 \cdot 10^{-4} (0,15 +$$

$$+ 2 \cdot 0,006 \frac{2,3 \cdot 0,135}{40 \cdot 0,15 (2 \sin \frac{180 \cdot 1}{40})^2} \cdot \lg \frac{4,7 \cdot 0,135}{0,054 + 0,025} + 0,0103 \cdot$$

$$\cdot \frac{0,163 \cdot 0,15 \cdot 40 \cdot 0,999^2}{4 \cdot 3,1416 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,31 \cdot 1,44 \cdot 2^2}) = (0,59 + 0,135 + 0,83) \cdot 10^{-4} = 1,555 \cdot 10^{-4} \text{ Ом};$$

$$x_2' = x_2 \cdot k = 1,555 \cdot 10^{-4} \cdot 2782 = 0,433 \text{ Ом.}$$

При соединении фаз YU и тех же обмоточных данных, что и у базового двигателя, амплитуда основной гармоники МДС при условных 96 пазах статора ($k_{об} = 0,925$), полярный момент инерции пазовых точек диаграммы Гёргеса и значение коэффициента дифференциального рассеяния (рис. 22):

$$R_p = \frac{Zk_{об}}{2pp} = \frac{96 \cdot 0,925}{2 \cdot 3,1416 \cdot 2} = 7,06657;$$

$$R_d^2 = [7^2 + 2(6^2 + 2^2 - 2 \cdot 6 \cdot 2 \cdot \cos 120^\circ) + (4^2 + 4^2 - 2 \cdot 4 \cdot 4 \cdot \cos 120^\circ)] / 4 = 50,25;$$

$$t_\delta = \frac{R_d^2}{R_p^2} - 1 = \frac{50,25}{7,06657^2} - 1 = 0,0063.$$

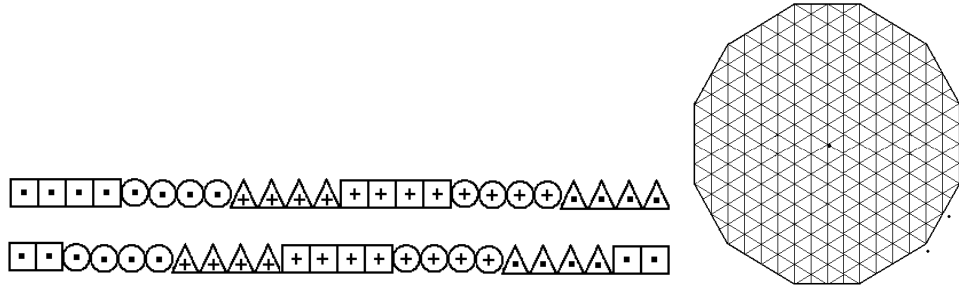


Рис. 22 – Диаграмма Гёргеса для периода МДС при соединении фаз YY

Намагничивающий ток, сопротивление взаимоиндукции и индуктивное сопротивление статорной обмотки:

$$I_m = \frac{B_d p p k_d d k_m}{m \sqrt{2} k_{об} w m_0} = \frac{0,83 \cdot 3,1416 \cdot 2 \cdot 50 \cdot 10^{-5} \cdot 1,31 \cdot 1,44}{3 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,93 \cdot 104 \cdot 4 \cdot 3,1416 \cdot 10^{-7}} = 9,5 \text{ А};$$

$$x_m = \frac{E}{I_m} = \frac{217}{9,5} = 22,84 \text{ Ом};$$

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

$$= 0,79 \cdot 10^{-3} \frac{104^2}{2} \left(\frac{0,15}{4} \cdot \frac{3 \cdot 0,833 + 1}{4} + 0,57 \frac{3 \cdot 0,833 - 1}{2} \cdot \frac{3,1416 \cdot 0,163}{4} \right) +$$

$$+ 0,0063 \cdot 22,84 = 0,374 + 0,144 = 0,518 \text{ Ом}.$$

Пусковой ток двигателя

$$I_{mYY} = \frac{U}{\sqrt{(R_{1YY} + R_2')^2 + (x_1 + x_2')^2}} = \frac{220}{\sqrt{0,48^2 + 0,951^2}} = 207 \text{ А}.$$

При этой схеме соединения фаз (рис. 23):

$$R_p = \frac{Zk_{об}}{2pp} = \frac{96 \cdot 0,8012}{2 \cdot 3,1416 \cdot 2} = 6,1208;$$

$$R_d^2 = [7^2 + 5^2 + 2(6^2 + 2^2 - 2 \cdot 6 \cdot 2 \cdot \cos 120^\circ) + 2(4^2 + 2^2 - 2 \cdot 4 \cdot 2 \cdot \cos 120^\circ) + 2(3^2 + 4^2 - 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot \cos 120^\circ)] / 8 = (49 + 25 + 104 + 56 + 74) / 8 = 38,5;$$

$$t_\delta = \frac{R_\delta^2}{R_p^2} - 1 = \frac{38,5}{6,1208^2} - 1 = 0,0275.$$

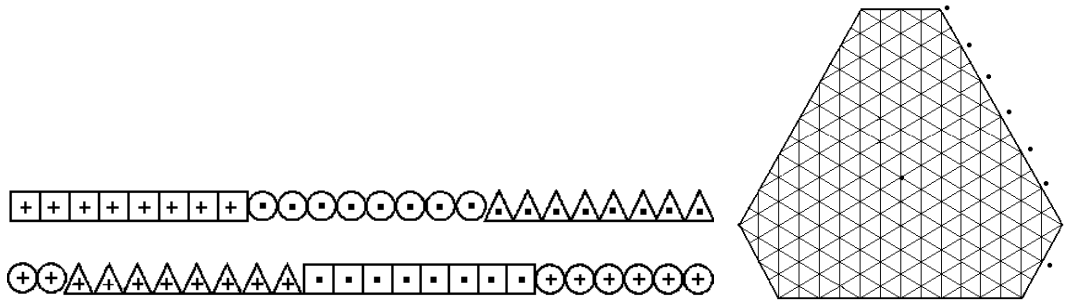


Рис. 23 – Диаграмма Гёргеса для периода МДС при соединении фаз Δ

При соединении фаз обмотки в Δ $I_{\mu\Delta} = I_{\mu Y} / 1,73 = 9,5 / 1,73 = 5,5$ А и $R_{I\Delta} = 1,08$ Ом.

Сопротивление взаимоиндукции и индуктивное сопротивление статорной обмотки:

$$x_m = \frac{E}{I_m} = \frac{375}{5,5} = 68 \text{ Ом};$$

$$\begin{aligned} x_1 &= 4p f m_0 \frac{w^2}{p} \left(\frac{l}{q} \cdot \frac{3b+1}{4} + 0,57 \frac{3b-1}{2} \frac{pD}{2p} \right) + t_{\delta\Delta} x_{m\Delta} = \\ &= 0,79 \cdot 10^{-3} \frac{208^2}{2} \left(\frac{0,15}{8} \cdot \frac{3 \cdot 0,833 + 1}{4} + 0,57 \frac{3 \cdot 0,833 - 1}{2} \cdot \frac{3,1416 \cdot 0,163}{4} \right) + \\ &+ 0,0275 \cdot 68 = 1,215 + 1,87 = 3,085 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Приведённые активное и индуктивное сопротивления роторной обмотки:

$$R'_{2\Delta} = R_2 \cdot k = 0,755 \cdot 10^{-4} \cdot 8311 = 0,627 \text{ Ом};$$

$$x'_{2\Delta} = x_2 \cdot k = 1,555 \cdot 10^{-4} \cdot 8311 = 1,29 \text{ Ом},$$

где $k = m(wk_{o\delta})^2 / m_2(w_2k_{o\delta 2})^2 = 3 \cdot (208 \cdot 0,801)^2 / 40(0,5 \cdot 0,999)^2 = 8311$.

Линейный пусковой ток

$$I_{1n\Delta} = \sqrt{3} \frac{U}{\sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + (x_1 + x'_2)^2}} = \sqrt{3} \frac{380}{\sqrt{1,707^2 + 4,375^2}} = 139,7 \text{ А}.$$

Соотношение пусковых токов $\frac{I_{1n\Delta}}{I_{1nY}} = \frac{139,7}{207} = 0,675$.

Отметим, что наиболее выраженные чётные гармоники $\nu = 4$ и $\nu = 8$ МДС при соединении фаз в треугольник не оказывают существенного влияния на пуск двигателя.

Относительные амплитуды гармоник МДС (таблица 1)

$$\frac{F_{nm}}{F_m} = \frac{1}{n} \cdot \frac{\frac{\sin n 60^\circ}{8 \sin n 7,5^\circ} \cdot \sin n 75^\circ}{\frac{\sin 60^\circ}{8 \sin 7,5^\circ} \cdot \sin 75^\circ} = \frac{\sin n 60^\circ \cdot \sin n 75^\circ}{n \cdot 0,80}$$

Таблица 1 - Относительные амплитуды гармоник периода МДС

n	1	2	4	5	7	8
F_{mv}/F_m	1	0,131	0,0585	0,0115	0,006	0,019

Выводы

1. Статорные обмотки с шириной фазной зоны 120° позволяют организовать рациональные схемы включения нагрузки при работе машины в режиме генератора.

2. Приём ограничения пускового тока асинхронных двигателей переключением статорной обмотки по схеме Δ/Y является простейшим в реализации. Степень снижения пускового тока близкая к $2/3$.

3. Паспортная мощность асинхронных двигателей в рабочем режиме (при соединении фаз YY) совпадает с паспортной мощностью серийных двигателей средней и большой мощности.

Литература

1. Богатырев, Н.И. Асинхронные генераторы для систем автономного электро-снабжения. Часть 1. Обоснование параметров асинхронного генератора / Н.И. Богатырев, В.Н. Ванурин, А.С. Креймер // Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]. - Краснодар: КубГАУ, 2010. - №05(59). - Шифр Информрегистра: 04201000012/0095. - Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2010/05/26/p26.asp>.
2. Богатырев, Н.И. Асинхронные генераторы для систем автономного электро-снабжения. Часть 2. Базовая теория формирования статорных обмоток асинхронных генераторов и методы расчета обмоток / Н.И. Богатырев, В.Н. Ванурин, А.С. Креймер // Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]. - Краснодар: КубГАУ, 2010. - №06(60). - Шифр Информрегистра: 04201000012/0116. - Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2010/06/31/p31.asp>.
3. Богатырев, Н.И. Параметры и характеристики электрических машин переменного тока: моногр. / Н.И. Богатырев, В.Н. Ванурин, П.П. Екименко: - Краснодар, 2011 256 с.: ил.
4. Богатырев, Н.И. Схемы статорных обмоток, параметры и характеристики электрических машин переменного тока: моногр. / Н.И. Богатырев, В.Н. Ванурин, О.В. Вронский; под. ред. В.Н. Ванурина: - Краснодар, 2007. - 301 с.: ил.