

УДК 621.313

UDC 621.313

СТАТОРНЫЕ ОБМОТКИ МНОГОСКОРОСТНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПРИВОДА ВЕНТИЛЯТОРОВ

STATOR WINDING OF MULTI-SPEED INDUCTION MOTORS FOR FAN DRIVES

Ванурин Владимир Николаевич
д.т.н., г.н.с
Северо-Кавказский институт механизации и электрификации сельского хозяйства, Зерноград, Россия

Vanurin Vladimir Nikolayevich
Dr.Sci.Tech., leading research associate
North-Caucasian Institute of mechanization and electrification of agriculture, Zernograd, Russia

Павлов Андрей Александрович
ассистент

Pavlov Andrey Aleksandrovich
assistant

Жидченко Татьяна Викторовна
к.т.н. доцент
Азово-черноморская государственная агроинженерная академия, Зерноград, Россия

Zhidtchenko Tatyana Viktorovna
Cand.Tech.Sci., associate professor
Azov-black sea State Agro-Engineering Academy, Zernograd, Russia

Приведены результаты гармонического анализа полюсопереключаемых обмоток двигателей для привода вентиляторов. Статорные обмотки на 10/6 позволяют полностью использовать габарит базовых шестиполюсных двигателей, а статорные обмотки на 8/4 полюса отличаются упрощенной коммутацией

In the article, we have presented the results of the harmonic analysis of pole-switching motor winding for a fan drive. The stator winding at 10/6 allow you to fully utilize the size of the basic six-pole engines, and the stator winding at 8/4 pole differ with simplified switching

Ключевые слова: АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ, ПОЛЮСОПЕРЕКЛЮЧАЕМАЯ СТАТОРНАЯ ОБМОТКА, СХЕМА ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ, ГАРМОНИКИ МДС

Keywords: INDUCTION MOTOR, POLE-SWITCHING STATOR WINDING, SWITCHING SCHEME, MMF HARMONICS

На асинхронные двигатели до 100 кВт приходится большая часть электроэнергии, потребляемой всеми асинхронными двигателями, при этом значительная их доля приходится на приводы вентиляторов и насосов. Наряду с двигателями основного исполнения широкое применение находят многоскоростные двигатели.

Для экономичной эксплуатации многоскоростных двигателей необходимо установить насколько они соответствуют приводимым производственным механизмам по степени загрузки на каждой частоте вращения и по степени использования базового габарита. Чем меньше степень загрузки, тем больше относительная величина реактивной мощности, и тем менее эффективно работает как двигатель, так и питающие его энергетические установки. При оценке эксплуатационного КПД двигателя потери в сети от реактивного тока приводят к потерям двигателя.

В многоскоростных двигателях наибольшее применение находят статорные обмотки с соотношением пар полюсов 2/1- «схемы Даландера». Их определённый недостаток заключается в низкой степени использования габарита базового двигателя. Новые приёмы формирования схем полюсо-переключаемых статорных обмоток [1-3] позволяют расширить поиск способов повышения эксплуатационных показателей многоскоростных двигателей.

Пример 1 усовершенствования статорной обмотки двигателя на 10/6 полюсов с цепным чередованием катушечных групп при большем числе полюсов [1,4] (рисунок 1, при построении МДС линейный ток отображён и в условных дополнительных рядах сторон катушек).

При переключении полюсов имеют место такие соотношения витков, потоков и индукций в воздушном зазоре (k_e – коэффициент ЭДС):

$$\frac{w_{10}}{w_6} = \frac{k_{e10} U_{н10} k_{об6} \Phi_6}{k_{e6} U_{н6} k_{об10} \Phi_{10}} = 0,92 \frac{380 \cdot 0,925 \cdot \Phi_6}{220 \cdot 0,67 \cdot \Phi_{10}} = 4;$$

$$\frac{\Phi_{10}}{\Phi_6} = 0,55;$$

$$\frac{B_{d10}}{B_{d6}} = \frac{10}{6} \cdot \frac{\Phi_{10}}{\Phi_6} = 1,667 \cdot 0,55 = 0,913.$$

По соотношению индукций двигатель в полной мере подходит для привода вентилятора, при этом габарит базового шестиполюсного двигателя используется полностью. Отрицательной стороной двухслойной обмотки является то, что при $2p = 10$ МДС содержит значительную амплитуду низшей гармоники. Амплитуды гармоник в долях малых ступенек МДС (рисунок 2)

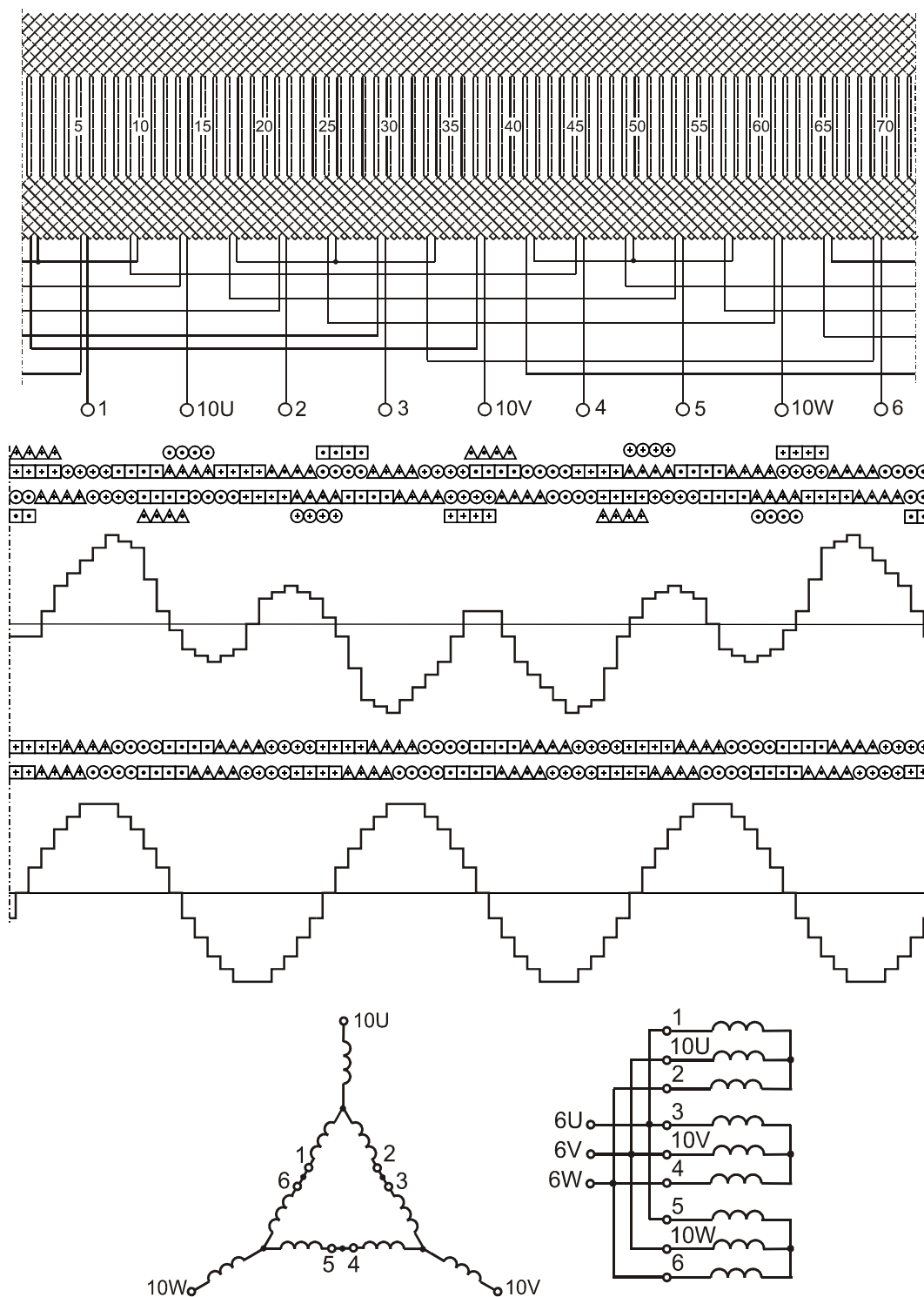


Рисунок 1 – Схема и МДС двухслойной обмотки на 10/6 полюсов ($k_{об10}/k_{об6} = 0,67/0,925$) и схема соединения фаз Δ -Y/YYY

$$F_{nm} = \frac{2}{p} \int_0^p F_x \cos nx dx = \frac{2}{pn} (2 \sin n 7,5^\circ + 2 \sin n 12,5^\circ + \sin n 17,5^\circ + \sin n 22,5^\circ +$$

$$+ \sin n 27,5^\circ + \sin n 32,5^\circ - 0,5 \sin n 37,5^\circ - 0,5 \sin n 42,5^\circ - 2,5 \sin n 47,5^\circ -$$

$$- 2,5 \sin n 52,5^\circ - 1,5 \sin n 57,5^\circ - 1,5 \sin n 62,5^\circ - 0,5 \sin n 67,5^\circ - 0,5 \sin n 72,5^\circ +$$

$$+ 0,5 \sin n 77,5^\circ + 0,5 \sin n 82,5^\circ + 2 \sin n 87,5^\circ + 2 \sin n 92,5^\circ + 0,5 \sin n 97,5^\circ +$$

$$+ 0,5 \sin n 102,5^\circ - 0,5 \sin n 107,5^\circ - 0,5 \sin n 112,5^\circ - 1,5 \sin n 117,5^\circ -$$

$$- 1,5 \sin n 122,5^\circ - 2,5 \sin n 127,5^\circ - 2,5 \sin n 132,5^\circ - 0,5 \sin n 137,5^\circ -$$

$$- 0,5 \sin n 142,5^\circ + \sin n 147,5^\circ + \sin n 152,5^\circ + \sin n 157,5^\circ + \sin n 162,5^\circ +$$

$$+ 2 \sin n 167,5^\circ + 2 \sin n 172,5^\circ).$$

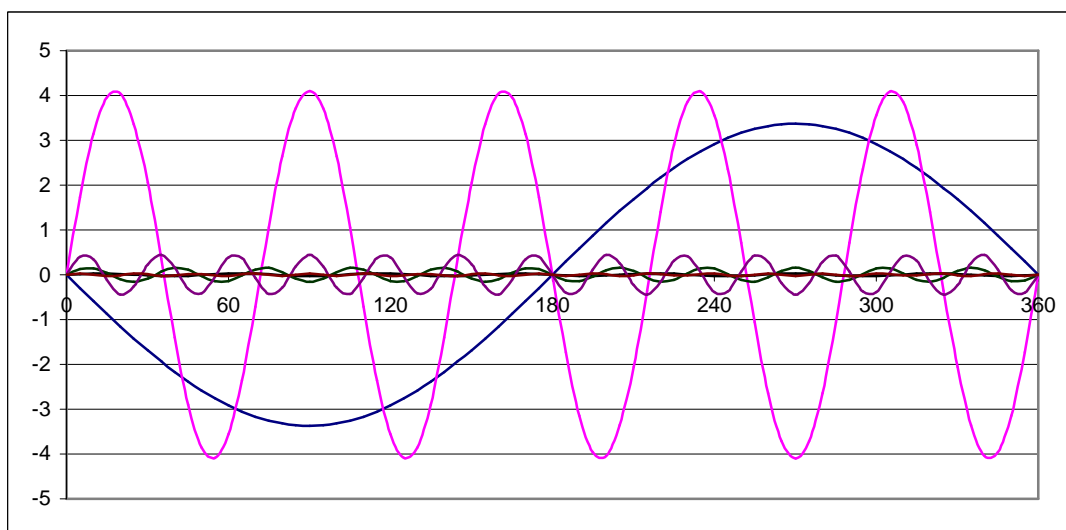


Рисунок 2 – Основная гармоника, низшая гармоника и первые высшие гармоники МДС двухслойной обмотки при большом числе полюсов

Цепное чередование катушечных групп позволяет перейти к цепной обмотке применительно к катушечным группам (рисунок 3).

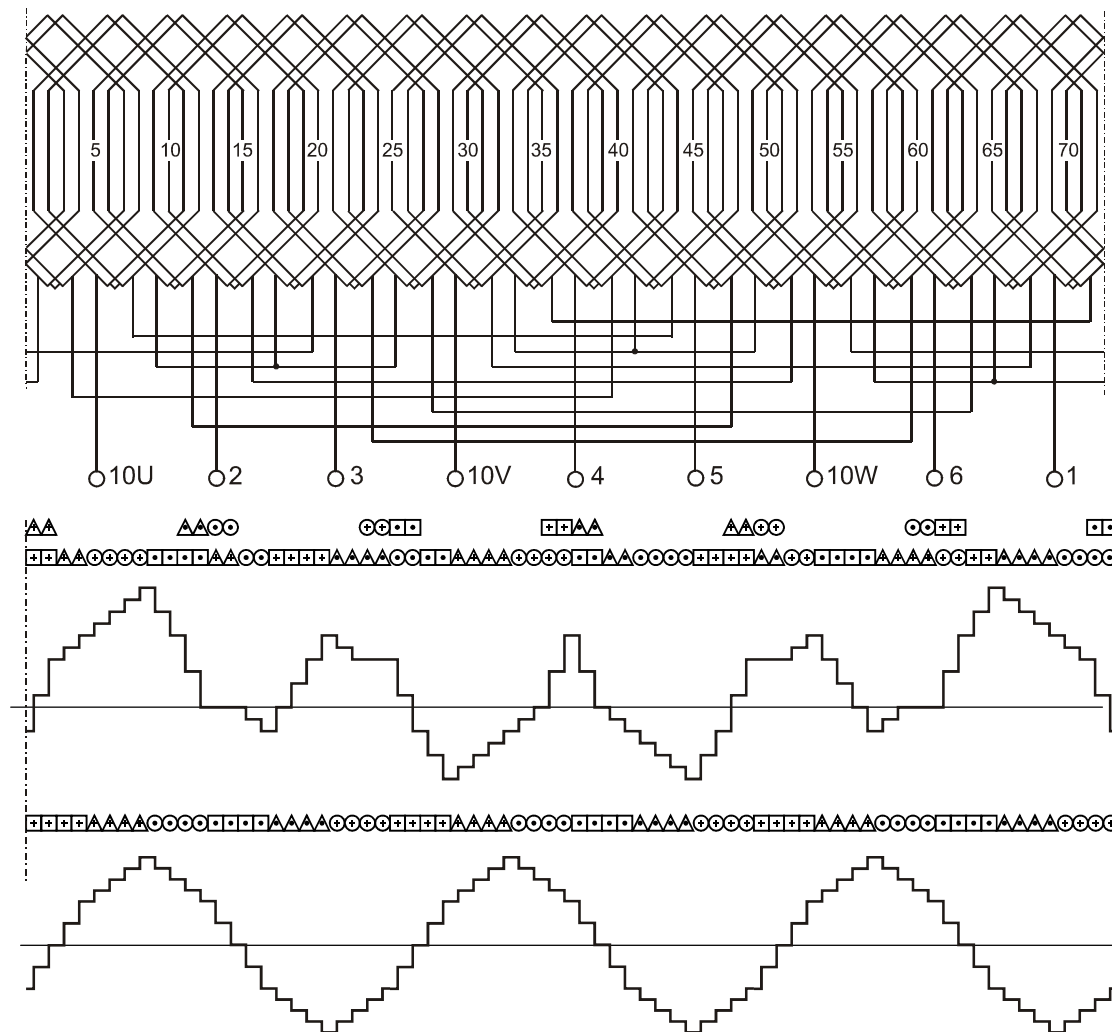


Рисунок 3 – Схема и МДС цепной обмотки, Δ -Y/YYY ($k_{об10}/k_{об6} = 0,74/0,96$)

Амплитуды гармоник при $2p = 10$ также в долях малых ступенек МДС (рисунок 4)

$$\begin{aligned}
 F_{nm} = \frac{2}{p} \int_0^p F_x \cos nx dx = \frac{2}{pn} & (3 \sin n 2,5^\circ + 3 \sin n 7,5^\circ + \sin n 12,5^\circ + \\
 & + \sin n 17,5^\circ + \sin n 22,5^\circ + \sin n 27,5^\circ + \sin n 32,5^\circ + \sin n 37,5^\circ - \\
 & - 2 \sin n 42,5^\circ - 2 \sin n 47,5^\circ - 3 \sin n 52,5^\circ - 3 \sin n 57,5^\circ - \sin n 72,5^\circ - \\
 & - \sin n 77,5^\circ + 2 \sin n 82,5^\circ + 2 \sin n 87,5^\circ + 2 \sin n 92,5^\circ + 2 \sin n 97,5^\circ - \\
 & - \sin n 102,5^\circ - \sin n 107,5^\circ - 3 \sin n 122,5^\circ - 3 \sin n 127,5^\circ - 2 \sin n 132,5^\circ - \\
 & - 2 \sin n 137,5^\circ + \sin n 142,5^\circ + \sin n 147,5^\circ + \sin n 152,5^\circ + \sin n 157,5^\circ + \\
 & + \sin n 162,5^\circ + \sin n 167,5^\circ + 3 \sin n 172,5^\circ + 3 \sin n 177,5^\circ).
 \end{aligned}$$

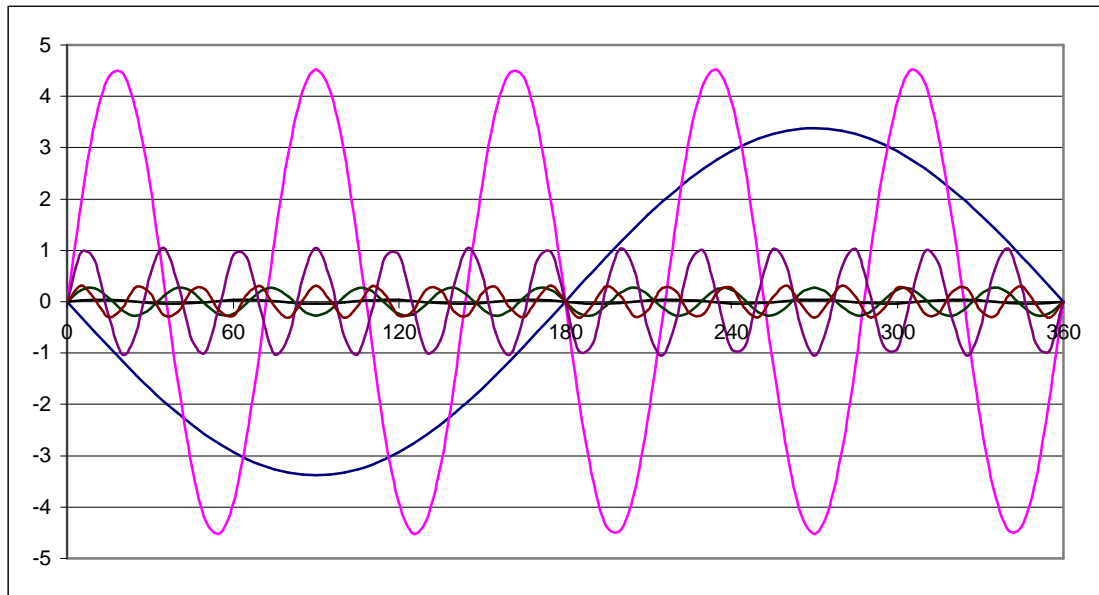


Рисунок 4 – Основная гармоника, низшая гармоника и первые высшие гармоники МДС цепной обмотки при большом числе полюсов

Соотношение амплитуд основной гармоники $p = 5$ и низшей гармоники $v = 1$ двухслойной и цепной обмотки отличается незначительно.

От цепной обмотки можно вновь перейти к двухслойной обмотке, но уже двойного шага, у которой первым шагом является шаг верхнего слоя – шаг цепной обмотки, а вторым шаг второго слоя (рисунок 5). Двойной шаг позволяет значительно уменьшить амплитуду низшей гармоники.

Амплитуды гармоник при большом числе полюсов в долях малых ступенек МДС

$$F_{nm} = \frac{2}{p} \int_0^p F_x \cos nx dx = \frac{2}{pn} (\sin n 7,5^{\circ} + \sin n 12,5^{\circ} + 2 \sin n 17,5^{\circ} +$$

$$+ 2 \sin n 22,5^{\circ} + 0,5 \sin n 27,5^{\circ} + 0,5 \sin n 32,5^{\circ} - \sin n 37,5^{\circ} - \sin n 42,5^{\circ} -$$

$$- 0,5 \sin n 47,5^{\circ} - 0,5 \sin n 52,5^{\circ} - 3 \sin n 57,5^{\circ} - 3 \sin n 62,5^{\circ} + 0,5 \sin n 67,5^{\circ} +$$

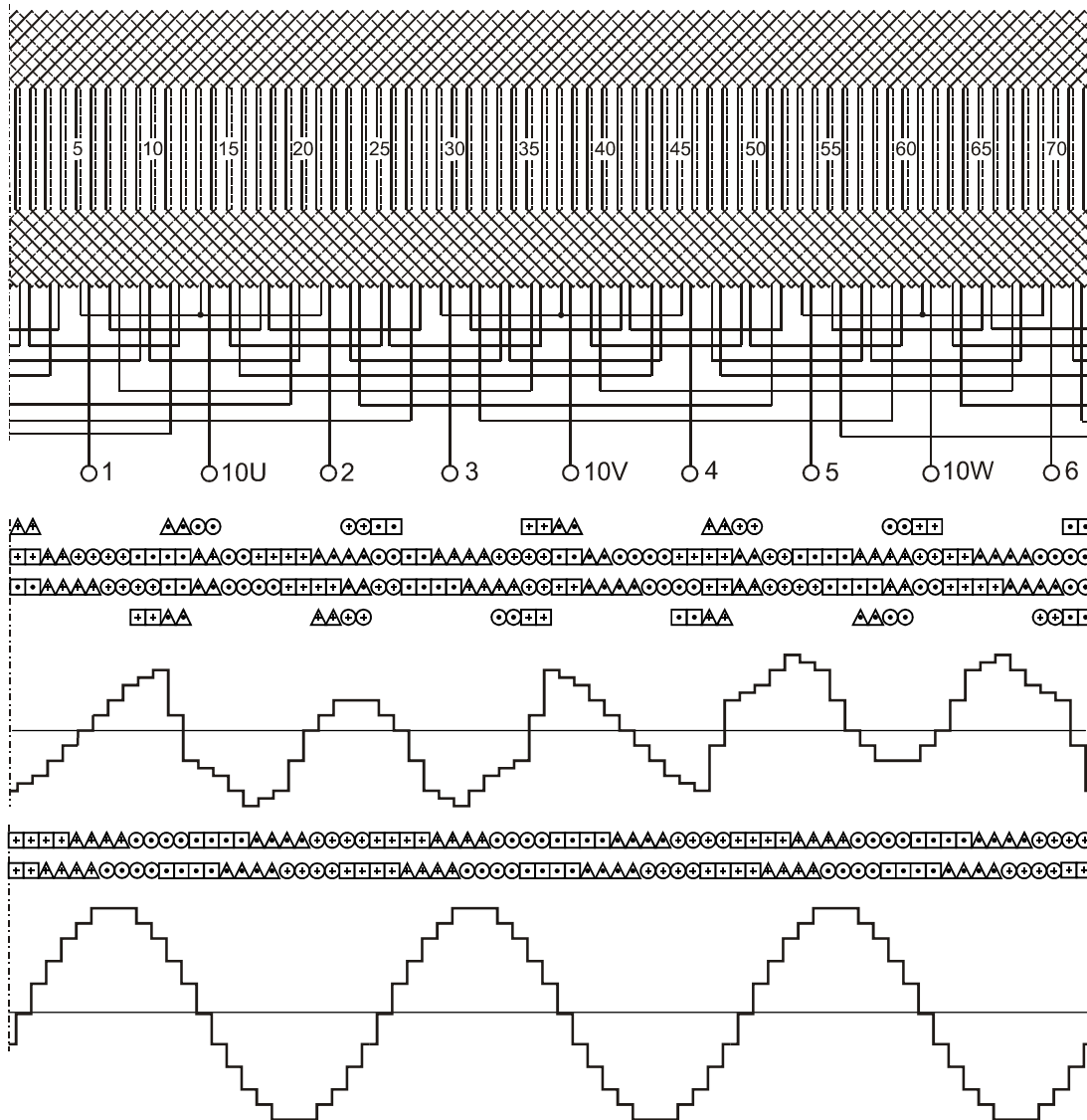
$$+ 0,5 \sin n 72,5^{\circ} + \sin n 77,5^{\circ} + \sin n 82,5^{\circ} + \sin n 87,5^{\circ} + \sin n 92,5^{\circ} +$$

$$+ \sin n 97,5^{\circ} + \sin n 102,5^{\circ} + 0,5 \sin n 107,5^{\circ} + 0,5 \sin n 112,5^{\circ} - 3 \sin n 117,5^{\circ} -$$

$$- 3 \sin n 122,5^{\circ} - 0,5 \sin n 127,5^{\circ} - 0,5 \sin n 132,5^{\circ} - \sin n 137,5^{\circ} - \sin n 142,5^{\circ} +$$

$$+ 0,5 \sin n 147,5^{\circ} + 0,5 \sin n 152,5^{\circ} + 2 \sin n 157,5^{\circ} + 2 \sin n 162,5^{\circ} +$$

$$+ \sin n 167,5^{\circ} + \sin n 172,5^{\circ}).$$



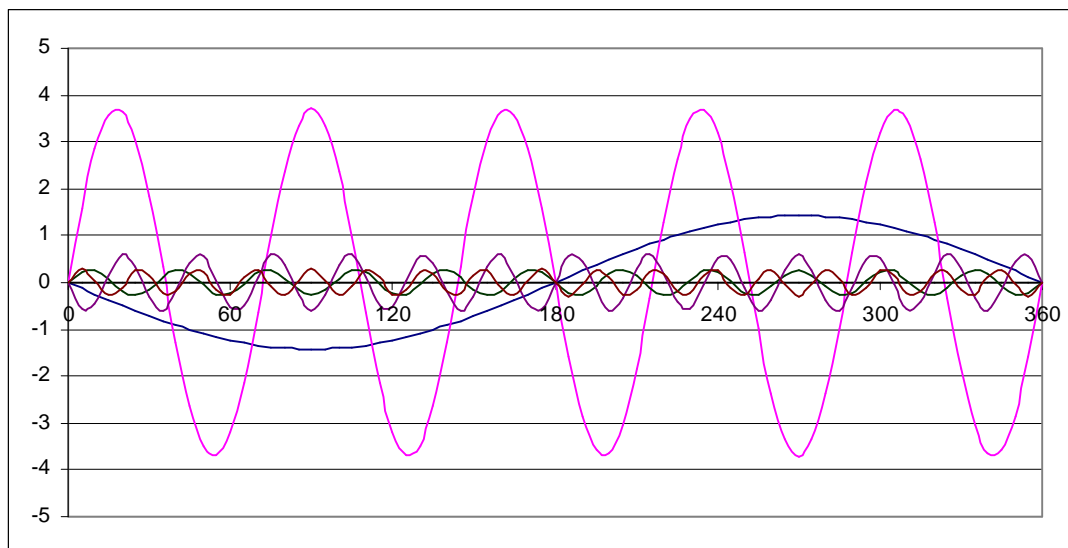


Рисунок 5 – Схема и МДС обмотки двойного шага ($k_{o\sigma 10}/k_{o\sigma 8} = 0,614/0,925$), основная гармоника, низшая гармоника и первые высшие гармоники МДС при большем числе полюсов

В большей степени снижению амплитуды низшей гармоники способствует укорочение шага второго слоя. Так, при шаге $y = 9$ (рисунок 6)

$$F_{nm} = \frac{2}{p} \int_0^p F_x \cos nx dx = \frac{2}{pn} (-0,5 \sin n 5^\circ + \sin n 10^\circ + 2,5 \sin n 15^\circ + 2 \sin n 20^\circ +$$

$$+ 2 \sin n 25^\circ + 0,5 \sin n 30^\circ - \sin n 35^\circ - \sin n 40^\circ - 0,5 \sin n 45^\circ - 0,5 \sin n 50^\circ -$$

$$- 2 \sin n 55^\circ - 3 \sin n 60^\circ - 2,5 \sin n 65^\circ + 0,5 \sin n 70^\circ + 2 \sin n 75^\circ + \sin n 80^\circ +$$

$$+ \sin n 85^\circ + \sin n 90^\circ + \sin n 95^\circ + \sin n 100^\circ + 2 \sin n 105^\circ + 0,5 \sin n 110^\circ -$$

$$- 2,5 \sin n 115^\circ - 3 \sin n 120^\circ - 2 \sin n 125^\circ - 0,5 \sin n 130^\circ - 0,5 \sin n 135^\circ -$$

$$- \sin n 140^\circ - \sin n 145^\circ + 0,5 \sin n 150^\circ + 2 \sin n 155^\circ + 2 \sin n 160^\circ +$$

$$+ 2,5 \sin n 165^\circ + \sin n 170^\circ - 0,5 \sin n 175^\circ).$$

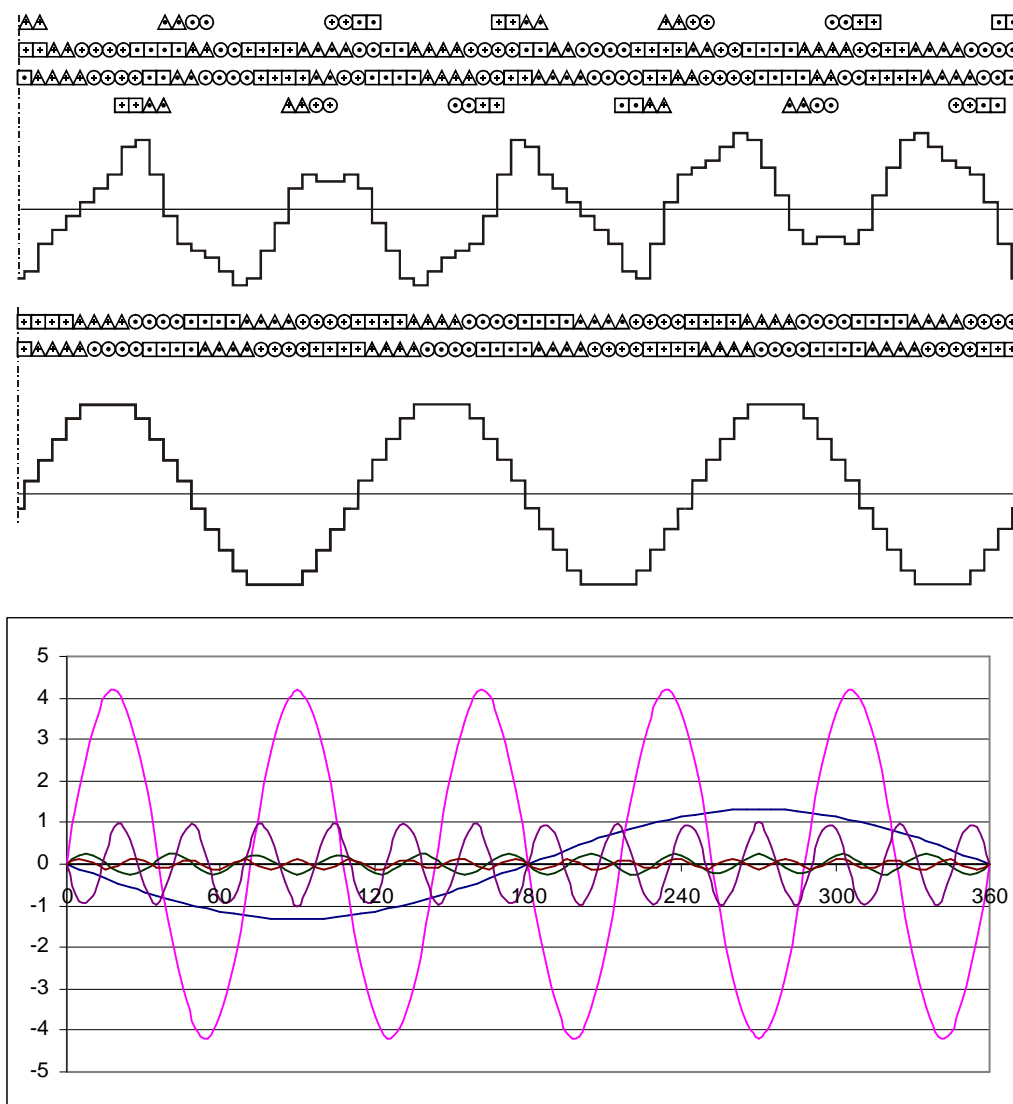


Рисунок 6 – МДС обмотки, основная гармоника, низшая гармоника и первые высшие гармоники МДС при большем числе полюсов

Для обмотки с шагом $y = 10$ ($k_{об10}/k_{об6} = 0,614/0,925$) при переключении полюсов

$$\frac{w_{10}}{w_6} = \frac{k_{e10} U_{н10} k_{об6} \Phi_6}{k_{e6} U_{н6} k_{об10} \Phi_{10}} = 0,92 \frac{380 \cdot 0,925 \cdot \Phi_6}{220 \cdot 0,614 \cdot \Phi_{10}} = 4;$$

$$\frac{\Phi_{10}}{\Phi_6} = 0,60;$$

$$\frac{B_{d10}}{B_{d6}} = \frac{10}{6} \cdot \frac{\Phi_{10}}{\Phi_6} = 1,667 \cdot 0,60 = 1.$$

Соответственно, для обмотки с шагом $y = 9$ ($k_{об10}/k_{об6} = 0,685/0,885$):

$$\frac{w_{10}}{w_6} = \frac{k_{e10} U_{н10} k_{об6} \Phi_6}{k_{e6} U_{н6} k_{об10} \Phi_{10}} = 0,92 \frac{380 \cdot 0,885 \cdot \Phi_6}{220 \cdot 0,685 \cdot \Phi_{10}} = 4;$$

$$\frac{\Phi_{10}}{\Phi_6} = 0,513;$$

$$\frac{B_{d10}}{B_{d6}} = \frac{10}{6} \cdot \frac{\Phi_{10}}{\Phi_6} = 1,667 \cdot 0,513 = 0,86.$$

За обмоточные данные двигателей на 10/6 полюсов с 72 пазми статора принимаются обмоточные данные базовых шестиполюсных двигателей. Эти же рекомендации относятся и к схемам при других числах пазов статора (рисунки 7 и 8).

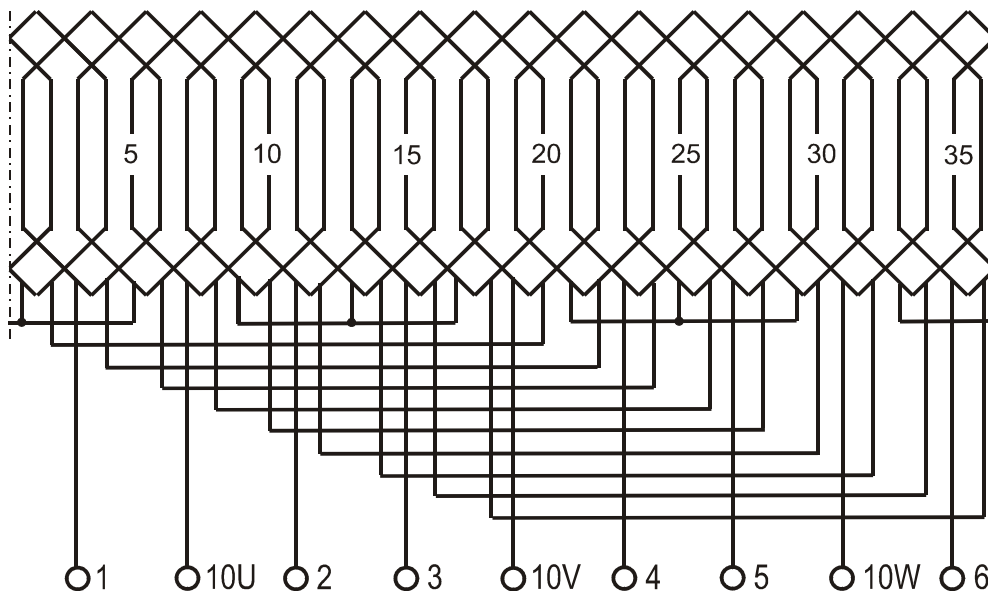


Рисунок 7 – Схема обмотки на 10/6 полюсов ($k_{об10}/k_{об6} = 0,76/0,96$)

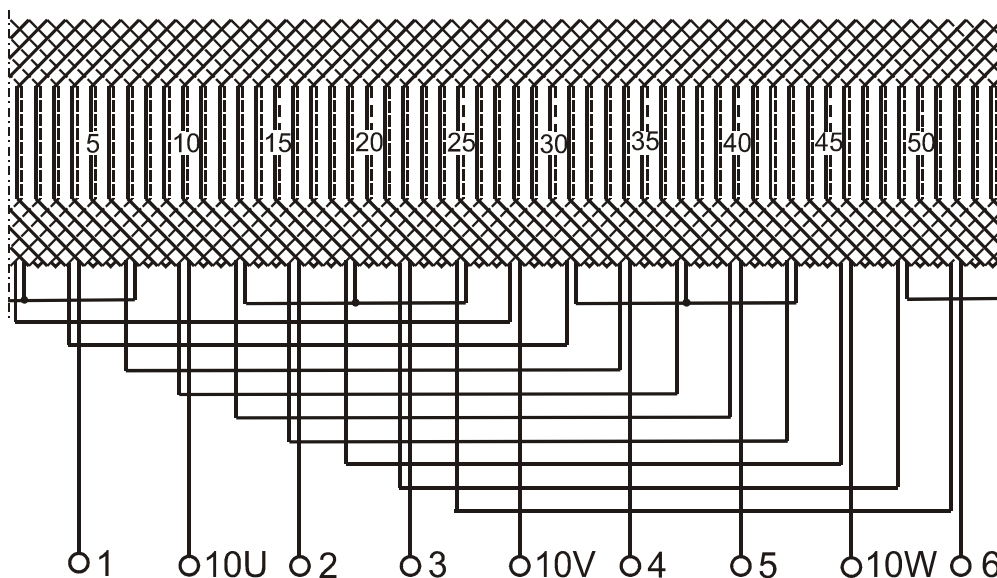


Рисунок 8 – Схема обмотки на 10/6 полюсов ($k_{об10}/k_{об6} = 0,735/0,90$)

Особенностью двигателей на 10/6 полюсов является также то, что при переключении на $2p = 10$ затухающее шестиполюсное поле наводит в треугольнике три совпадающие по фазе ЭДС. Для исключения сварки контактов переключателя током, ограниченным только внутренним сопротивлением треугольника, переключения необходимо выполнять с выдержкой времени.

Схемы переключений в коробке выводов двигателя, например, для зимнего и для летнего периода привода вентилятора показаны на рисунке 9.

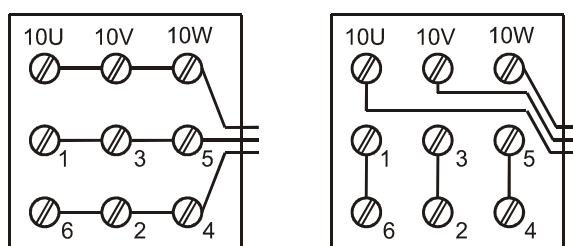
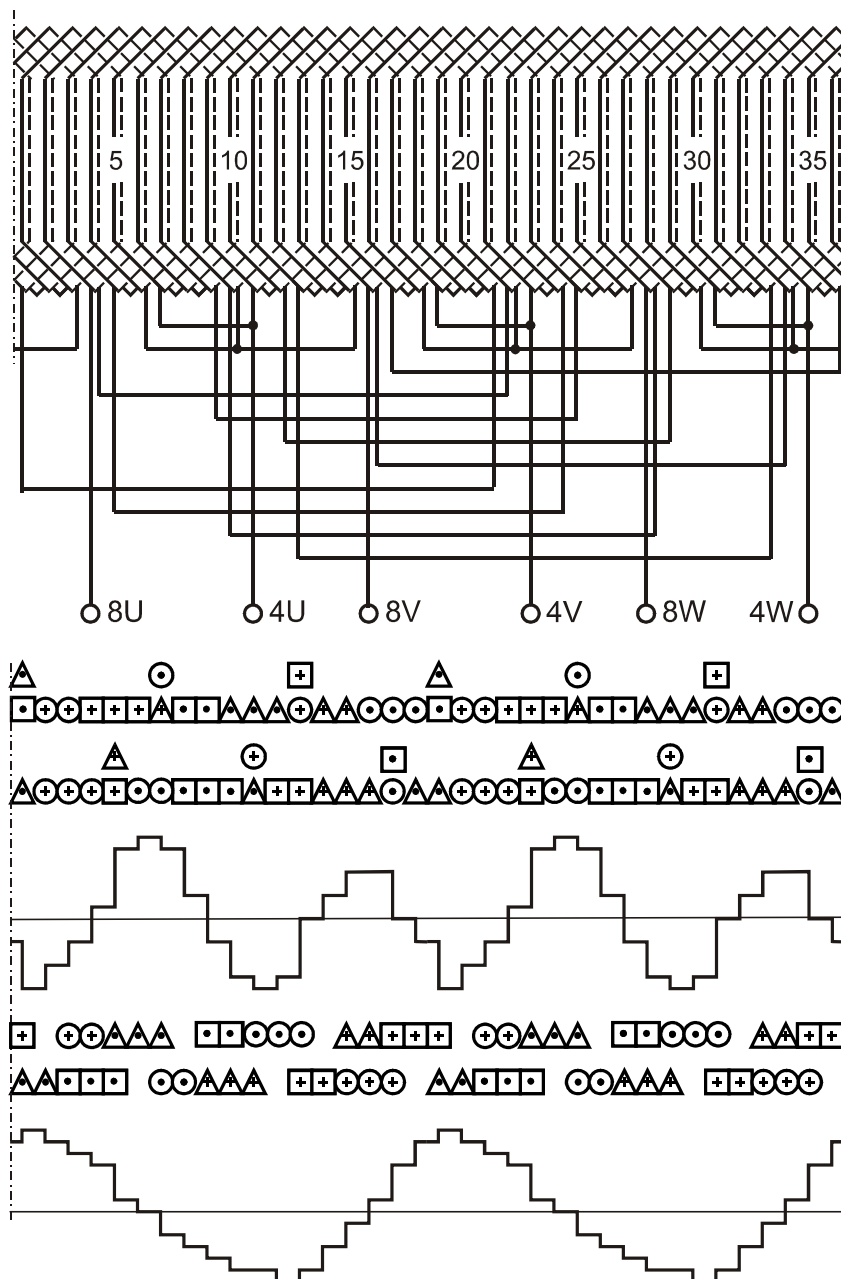


Рисунок 9 – Схема соединений в коробке выводов

Пример 2 усовершенствования схемы обмотки на 8/4 полюса. Определённый недостаток переключений обмоток с соотношением пар полюсов 2/1 по схемам Даландера заключается в необходимости применения до-

полнительного магнитного пускателя для объединения выводов в нулевую точку.

Упрощению схемы коммутации обмотки на 8/4 полюса [5,6] способствует также цепное чередование катушечных групп при большем числе полюсов (рисунок 10, при построении МДС линейный ток отображён и в условных дополнительных рядах сторон катушек).



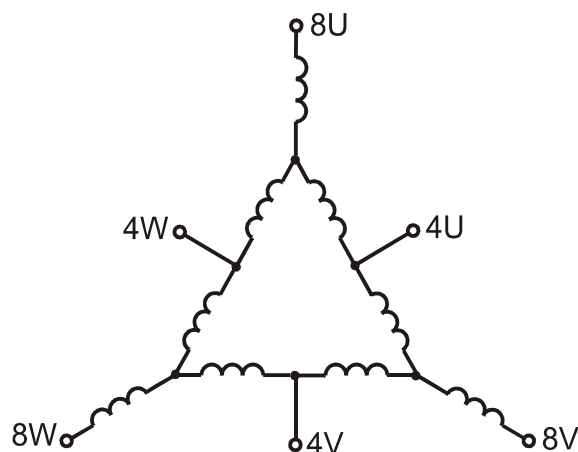


Рисунок 10 - Схема и МДС обмотки на 8/4 полюса с шагом $y = 4$ ($k_{o68}/k_{o64} = 0,826/0,62$), $Y\Delta/\Delta$

Определённым недостатком схемы является то, что при $2p = 4$ МДС обмоток содержит заметные амплитуды обратновращающихся высших гармоник $\nu = 4$ и $\nu = 10$.

Для двигателя с 36 пазами статора рациональным является шаг $y = 4$, при котором высшие гармоники проявляются незначительно. Амплитуды гармоник в долях малых ступенек МДС (рисунок 11) при меньшем числе полюсов

$$F_{nm} = \sqrt{a_n^2 + b_n^2},$$

где:

$$a_n = \frac{1}{p} \int_0^{2p} F_x \cos nx dx = -\frac{1}{3,14n} (-\sin n10^\circ - 4 \sin n30^\circ - 2 \sin n50^\circ - \sin n70^\circ + \sin n90^\circ + \sin n110^\circ + \sin n130^\circ + 3 \sin n150^\circ + \sin n170^\circ + 2 \sin n190^\circ + \sin n210^\circ + \sin n230^\circ + \sin n250^\circ + \sin n290^\circ - \sin n310^\circ - 2 \sin n330^\circ - 2 \sin n350^\circ - \sin n370^\circ);$$

$$b_n = \frac{1}{p} \int_0^{2p} F_x \sin nx dx = \frac{1}{3,14n} (-\cos n10^\circ - 4 \cos n30^\circ - 2 \cos n50^\circ - \cos n70^\circ + \cos n90^\circ + \cos n110^\circ + \cos n130^\circ + 3 \cos n150^\circ + \cos n170^\circ + 2 \cos n190^\circ + \cos n210^\circ + \cos n230^\circ + \cos n250^\circ + \cos n290^\circ - \cos n310^\circ - 2 \cos n330^\circ - 2 \cos n350^\circ - \cos n350^\circ).$$

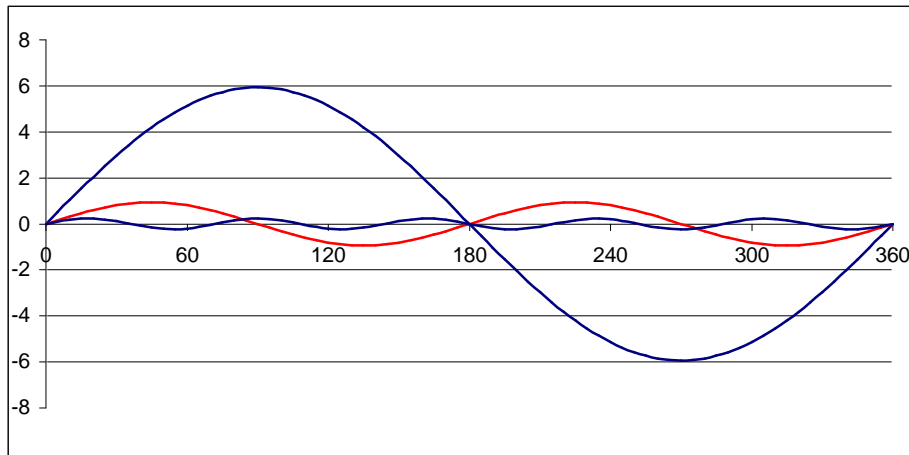
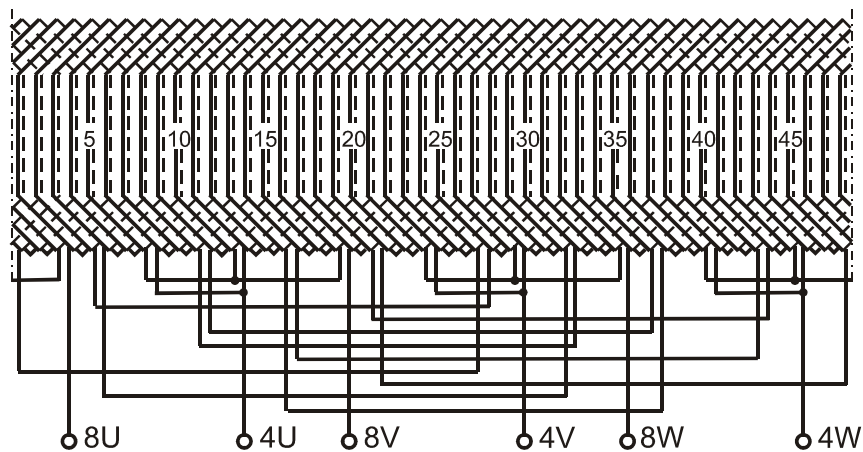


Рисунок 11 – Основная гармоника и первые высшие гармоники периода МДС при $2p = 4$

При 48 пазах статора амплитуды гармоник в долях ступенек МДС при меньшем числе полюсов (рисунок 12)

$$F_{nm} = \frac{2}{p} \int_0^p F_x \sin nx dx = -\frac{2}{pn} (-\cos n 7,5^\circ - 1,5 \cos n 22,5^\circ - \cos n 37,5^\circ - \cos n 52,5^\circ + 0,5 \cos n 67,5^\circ + 0,5 \cos n 82,5^\circ + 0,5 \cos n 112,5^\circ + 0,5 \cos n 127,5^\circ + 1,5 \cos n 142,5^\circ + 0,5 \cos n 157,5^\circ + 0,5 \cos n 172,5^\circ).$$



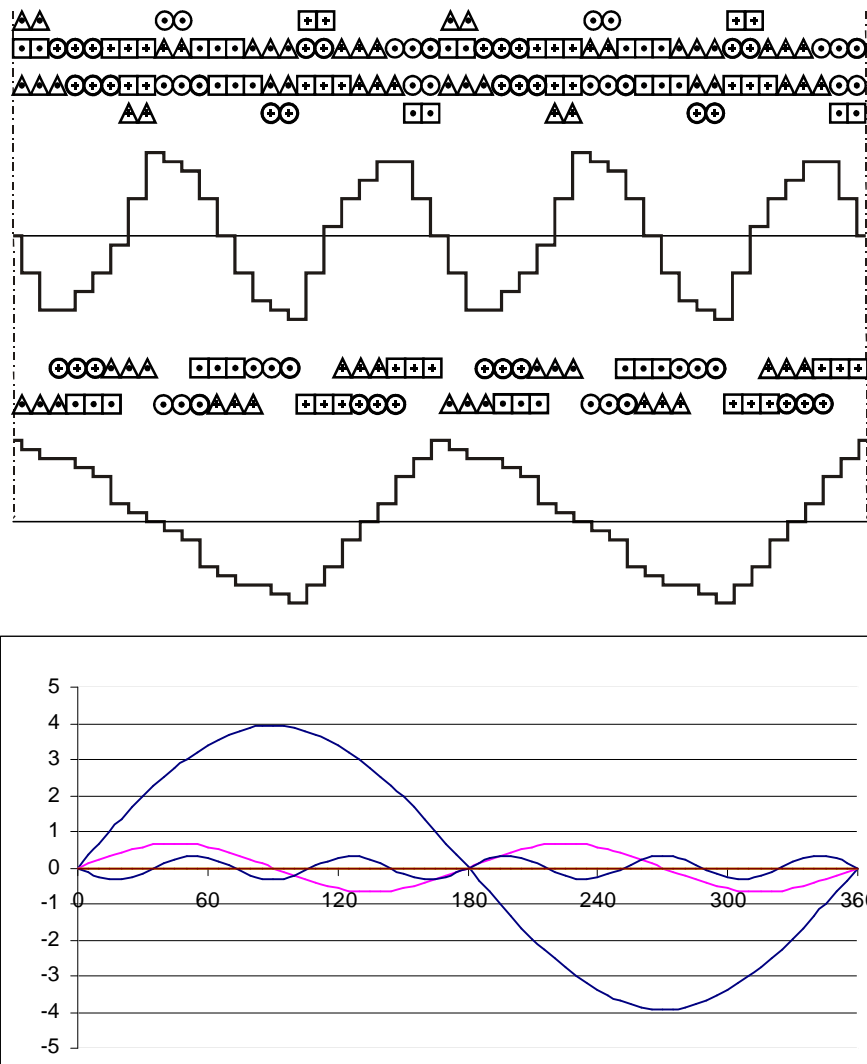


Рисунок 12 – Схема и МДС обмотки на 8/4 полюса ($k_{o\delta 8}/k_{o\delta 4} = 0,86/0,685$), основная гармоника и первые высшие гармоники периода МДС

Соответственно при 72 пазах статора (рисунок 13)

$$F_{nm} = \frac{2}{p} \int_0^p F_x \sin nx dx = -\frac{2}{pn} (-\cos n5^\circ - \cos n15^\circ - 1,5 \cos n25^\circ -$$

$$-\cos n35^\circ - \cos n45^\circ - 0,5 \cos n55^\circ - 0,5 \cos n65^\circ + 0,5 \cos n75^\circ +$$

$$+ 0,5 \cos n85^\circ + 0,5 \cos n105^\circ + 0,5 \cos n115^\circ + 0,5 \cos n125^\circ + 0,5 \cos n135^\circ +$$

$$+ 1,5 \cos n145^\circ + 0,5 \cos n155^\circ + 0,5 \cos n165^\circ + \cos n175^\circ).$$

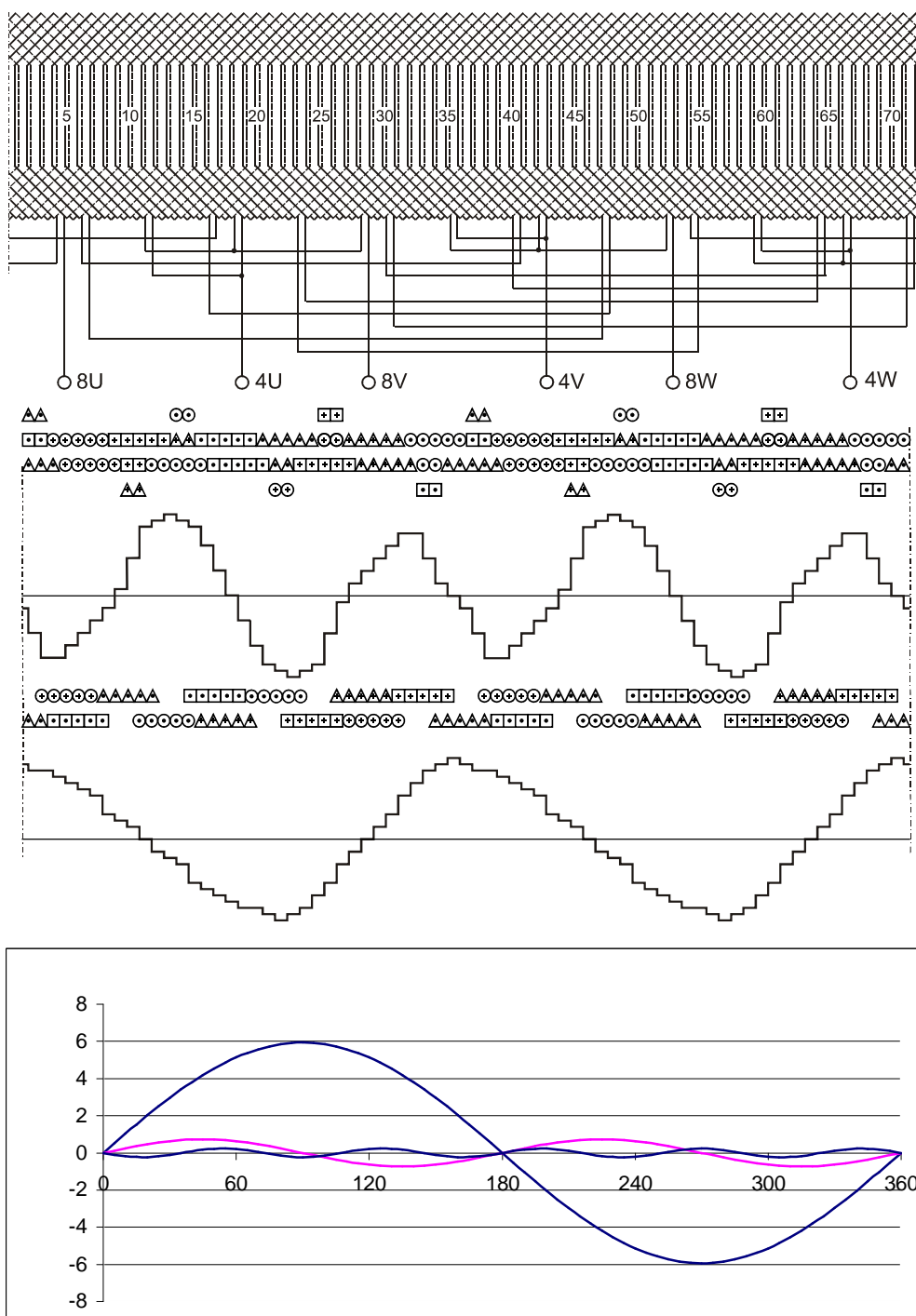


Рисунок 13 – Схема и МДС обмотки на 8/4 полюса ($k_{o\delta 8}/k_{o\delta 4} = 0,82/0,63$), основная и высшие гармоники периода МДС при $2p = 4$

Статорные обмотки с переключением по схеме $Y-\Delta/\Delta$ позволяют соотношением витков в катушках последовательной части и в части треугольника изменять соотношение индукций, следовательно, и подбирать двигатель под определённую нагрузку на валу при переключении полюсов.

Так для двигателя на при 72 пазах статора при одинаковом числе витков в катушках ($k_{e8}/k_{e4} \approx 0,96$):

$$\frac{w_8}{w_4} = \frac{k_{e8} U_{н8} k_{о\delta 4} \Phi_4}{k_{e4} U_{н4} k_{о\delta 8} \Phi_8} = 0,96 \frac{380 \cdot 0,63 \cdot \Phi_4}{380 \cdot 0,82 \cdot \Phi_8} = 1,4;$$

$$\Phi_8 / \Phi_4 = 0,525;$$

$$B_{d8} / B_{d4} = 2\Phi_8 / \Phi_4 = 2 \cdot 0,525 = 1,05.$$

Если число витков в катушках последовательной части обмотки увеличить вдвое, то

$$\frac{w_8}{w_4} = \frac{k_{e8} U_{н8} k_{о\delta 4} \Phi_4}{k_{e4} U_{н4} k_{о\delta 8} \Phi_8} = 0,96 \frac{380 \cdot 0,63 \cdot \Phi_4}{380 \cdot 0,84 \cdot \Phi_8} = 1,8;$$

$$\Phi_8 / \Phi_4 = 0,4;$$

$$B_{d8} / B_{d4} = 2\Phi_8 / \Phi_4 = 2 \cdot 0,4 = 0,8.$$

Пример расчёта обмотки на 8/4 полюса на базе двигателя АИР160S4: $Z = 48$ – число пазов статора; $B_\delta = 0,83$ Тл - индукция в воздушном зазоре; $I_{1н} = 28,5$ А; $\cos j_n = 0,89$; $I_{1р} = 13$ А – реактивная составляющая тока; $I_\mu = 9,6$ А – намагничивающий ток; $w = 104$ - число витков на фазу; $k_{о\delta} = 0,925$ – обмоточный коэффициент; $Q = 110$ мм² - площадь площади изолированного паза для проводников условного квадратного сечения; $\delta = 0,5$ – воздушный зазор; $k_\delta = 1,31$ – коэффициент воздушного зазора; $k_\mu = 1,44$ – коэффициент насыщения магнитной цепи.

Для двигателя с полюсопереключаемой обмоткой ($k_{о\delta 8}/k_{о\delta 4} = 0,86/0,685$ и $k_{e8}/k_{e4} \approx 0,96$):

$$\frac{w_8}{w_4} = \frac{k_{e8} U_{н8} k_{о\delta 4} \Phi_4}{k_{e4} U_{н4} k_{о\delta 8} \Phi_8} = 0,96 \frac{380 \cdot 0,685 \cdot \Phi_4}{380 \cdot 0,86 \cdot \Phi_8} = 1,666;$$

$$\Phi_8 / \Phi_4 = 0,46;$$

$$B_{d8} / B_{d4} = 2\Phi_8 / \Phi_4 = 2 \cdot 0,46 = 0,92.$$

Ориентируясь на обмоточные данные базового двигателя, число витков на фазу при $2p = 4$

$$w_4 = 1,73wk_{об}/k_{об4} = 1,73 \cdot 104 \cdot 0,925/0,685 \approx 240.$$

В катушке $240/12 = 20$ витков.

В пазу $N = 40$ проводников диаметром

$$d_{уз} = \sqrt{Q/N} = \sqrt{110/40} = 1,66 \text{ мм.}$$

Выбираем $d/d_{уз} = 1,50/1,61$ мм. При длине витка 0,50 м активное сопротивление статорной обмотки $R_1 = 1,62$ Ом.

Потерям в статорной обмотке базового двигателя $P_{эл1} = 655$ Вт соответствует номинальный ток 11,6 А рассчитываемого двигателя при меньшем числе полюсов. Намагничивающий ток

$$I_{m4} = \frac{B_d p p d k_d k_m}{\sqrt{2 m w k_{об} m_0}} = \frac{0,83 \cdot 3,1416 \cdot 2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,31 \cdot 1,44}{1,414 \cdot 3 \cdot 240 \cdot 0,685 \cdot 4 \cdot 3,1416 \cdot 10^{-7}} = 5,6 \text{ А.}$$

Намагничивающий ток базового двигателя при соединении фаз в треугольник составляет $9,6/1,73 = 5,55$ А. Приведённая реактивная составляющая тока ротора базового двигателя

$$I_{2p} = I_{1p} - I_{\mu} = 13 - 9,6 = 3,4 \text{ А.}$$

При практически том же коэффициенте приведения тока ротора, что и у базового двигателя, реактивный ток рассчитываемой обмотки $I_{1p4} = I_{\mu4} + I_{2p4} = 5,6 + 3,4/1,73 = 7,57$ А.

Коэффициент мощности и потребляемая двигателем мощность:

$$\cos j_{n4} = \frac{\sqrt{I_{1\Delta}^2 - I_{1p\Delta}^2}}{I_{1\Delta}} = \frac{\sqrt{11,6^2 - 7,57^2}}{11,6} = 0,76;$$

$$P_1 = m U_n I_{1n} \cos j_n = 3 \cdot 380 \cdot 11,6 \cdot 0,76 = 10050 \text{ Вт.}$$

При практически тех же потерях, что и у базового двигателя 1600 Вт, номинальная мощность и номинальный КПД двигателя:

$$P_{2n} = P_1 - 1600 = 8450 \text{ Вт;}$$

$$\eta_n = 84 \text{ \% .}$$

При большем числе полюсов активное сопротивление последовательной части обмотки $R_{11} = 0,54$ Ом и в части треугольника $R_{12} = 1,62$ Ом.

Потерям в статорной обмотке восьмиполюсного двигателя того же габарита $P_{эл} = 565$ Вт соответствуют токи в частях обмотки 7,5 А и 13 А.

При восьми полюсах номинальной мощности КПД h_n и $\cos j_n$ принимаем, ориентируясь на их значения серийных двигателей того же габарита и числа пар полюсов,

$$P_{2n} = mU_n I_{1n} h_n \cos j_n = 3 \cdot 380 \cdot 7,5 \cdot 0,87 \cdot 0,75 \approx 5600 \text{ Вт.}$$

Выводы

Решению задач повышения энергоэффективности определённого типа приводов с многоскоростными асинхронными двигателями могут способствовать новые схемные решения полюсопереключаемых статорных обмоток.

Двигатели на 10/6 полюсов с соединением фаз по схеме $Y\Delta/YYY$ позволяют полностью использовать габарит базового стандартного шестиполюсного двигателя. По сравнению с ближайшим аналогом - серийным двигателем на 12/6 полюсов того же габарита удельная масса двигателя снижена в 1,5 раза.

Двигатели на 8/4 полюсов с соединением фаз по схеме $Y-\Delta/\Delta$ позволяют упростить схему коммутации, что повышает надёжность коммутации при переключении полюсов.

Литература

1. Богатырев Н.И. Электрические машины переменного тока / Н.И. Богатырев, В.Н. Ванурин, О.В. Вронский – Краснодар. КубГАУ, 2007. - 301 с.
2. Богатырев Н.И. Электрические машины переменного тока / Н.И. Богатырев, В.Н. Ванурин, Джанибеков К.А.-А. - Краснодар, КубГАУ, 2011. - 224 с.
3. Богатырев Н.И., Ванурин В.Н., Екименко П.П. Статорные обмотки асинхронных генераторов и многофункциональных машин / научно-методическое издание. Краснодар, КубГАУ, 2006. - 67 с.
4. Чуркин А.Е., Павлов А.А. Рациональные схемы полюсопереключаемых обмоток стационарных электроприводов установок в АПК. – Зерноград: ФГБОУ ВПО АЧГАА, 2012. – 169 с.

5. Патент №2345463 РФ, МПК H02 K17/14. Статорная обмотка на 8/4 полюса / В.Н. Ванурин (ГНУ СКНИИМЭСХ Россельхозакадемии). – №2011118251/07, заявлено 27.02.2008, опубликовано 27.01.2009// БИПМ. – 2009. – №3.

6. Патент № 2225531 МКП F 03 D 7/04. Ветроэнергетическая установка / Богатырев Н.И., Ванурин В.Н., Курзин Н.Н., Креймер А.С., Зайцев Е.А., Ерашов Д.А.. Заявлено 01.07.02; Опубликовано 10.03.04; БИПМ. -2004. - № 7.