

УДК 621.313

UDC 621.313

О ДЕЙСТВИИ НИЗШЕЙ ГАРМОНИКИ НА ПУСК АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

ABOUT THE ACTION OF LOWER HARMONICS ON THE START OF AN INDUCTION MOTOR

Павлов Андрей Александрович
 ассистент
 Азово-черноморская государственная
 агроинженерная академия, Зерноград, Россия

Pavlov Andrey Aleksandrovich
 assistant
 Azov-black sea State Agro-Engineering Academy,
 Zernograd, Russia

Приведены результаты анализа МДС двухслойной полюсопереключаемой обмотки, содержащей значительную амплитуду низшей гармоники. Исследовано действие низшей гармоники на пуск асинхронного двигателя

In the article, the results of the analysis of the two-layer pole-switching winding, containing considerable amplitude of lower harmonics are shown. We have also investigated the effect of lower harmonics on the start of an induction motor

Ключевые слова: АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ, ПОЛЮСОПЕРЕКЛЮЧАЕМАЯ СТАТОРНАЯ ОБМОТКА, ГАРМОНИКИ МДС, МОМЕНТ ПРИ ПУСКЕ ДВИГАТЕЛЯ ОТ НИЗШЕЙ ГАРМОНИКИ

Keywords: INDUCTION MOTOR, POLE-SWITCHING STATOR WINDING, MMF HARMONICS, LOWEST HARMONICS ENGINE START MOMENT

МДС статорных обмоток асинхронных двигателей наряду с основной гармоникой, определяющей число пар полюсов p , содержат и множество других гармоник ν , отрицательно влияющих на пуск двигателей.

Действие гармоник n на пуск асинхронного двигателя оценивают на основе схем замещения с параметрами статорной обмотки, приведёнными к роторной обмотке [1].

Относительный момент от гармоники n

$$\frac{M_n}{M} = \frac{k_{об2n}^2}{k_{об2}^2} \cdot \frac{p}{n} \cdot \frac{F_{nm}^2}{F_m^2} \cdot \frac{s_n}{s} \cdot \frac{R_{2n}}{R_2} \cdot \frac{R_2^2 + s^2(x'_m + x_2)^2}{R_{2n}^2 + s_n^2(x'_{mn} + x_{2n})^2}$$

где для основной гармоники p и для гармоники n :

$k_{об2}$ и $k_{об2\nu}$ – обмоточные коэффициенты роторной обмотки;

F_m и $F_{m\nu}$ – амплитуды гармоник;

s и s_ν – скольжение ротора;

R_2 и $R_{2\nu}$ – активные сопротивления роторной обмотки;

x_2 и $x_{2\nu}$ – индуктивные сопротивления роторной обмотки;

$$x'_m = 2pf \frac{Z_2 D l k_{об2}^2}{k_d d k_m p^2} \cdot 10^{-7};$$

$$x'_{m} = 2pf \frac{Z_2 D l k_{\delta 2n}^2}{k_d d k_{\mu n}^2} \cdot 10^{-7}$$

- приведённое к ротору сопротивление взаимоиндукции (f – частота тока; Z_2 – число пазов ротора; D и l – диаметр и длина статора; δ и k_{δ} – воздушный зазор и коэффициент воздушного зазора; k_{μ} – коэффициент насыщения магнитной цепи).

Соответственно относительный пусковой момент от гармоники n

$$\frac{M_{nn}}{M_n} = \frac{k_{\delta 2n}^2}{k_{\delta 2}^2} \cdot \frac{p}{n} \cdot \frac{F_{nm}^2}{F_m^2} \cdot \frac{R_{2n}}{R_2} \cdot \frac{R_2^2 + (x'_m + x_2)^2}{R_{2n}^2 + (x'_{mn} + x_{2n})^2}$$

МДС статорной обмотки на 10/6 полюсов (рисунок 1) при большем числе полюсов содержит значительную амплитуду низшей гармоники.

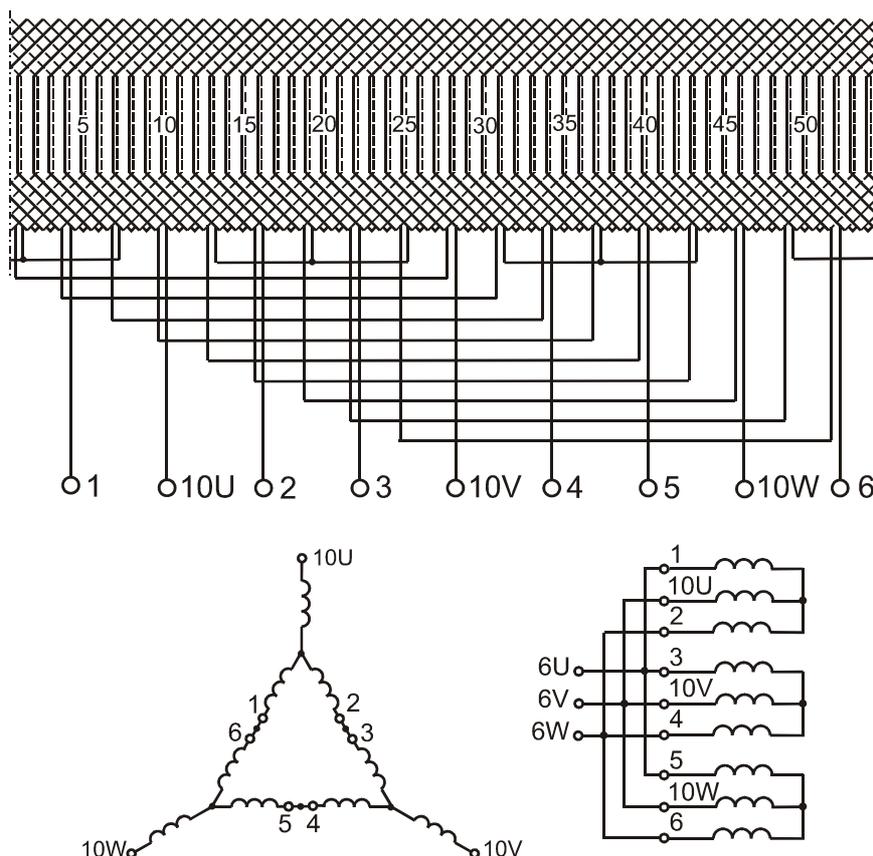


Рисунок 1 – Схема обмотки на 10/6 полюсов ($k_{\delta 10}/k_{\delta 6} = 0,73/0,90$)

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

$$F_{nm} = \frac{2}{p} \int_0^p F_x \cos nx dx = \frac{2}{pn} (2 \sin n 6,67^\circ + 2 \sin n 13,33^\circ + \sin n 20^\circ +$$

$$+ \sin n 26,67^\circ + \sin n 33,33^\circ - 0,5 \sin n 40^\circ - 2,5 \sin n 46,67^\circ -$$

$$- 2,5 \sin n 53,33^\circ - 1,5 \sin n 60^\circ - 0,5 \sin n 66,67^\circ - 0,5 \sin n 73,33^\circ +$$

$$+ 0,5 \sin n 80^\circ + 2 \sin n 86,67^\circ + 2 \sin n 93,33^\circ + 0,5 \sin n 100^\circ -$$

$$- 0,5 \sin n 106,67^\circ - 0,5 \sin n 113,33^\circ - 1,5 \sin n 120^\circ - 2,5 \sin n 126,67^\circ -$$

$$- 2,5 \sin n 133,33^\circ - 0,5 \sin n 140^\circ + \sin n 146,67^\circ + \sin n 153,33^\circ +$$

$$+ \sin n 160^\circ + 2 \sin n 167,67^\circ + 2 \sin n 173,33^\circ).$$

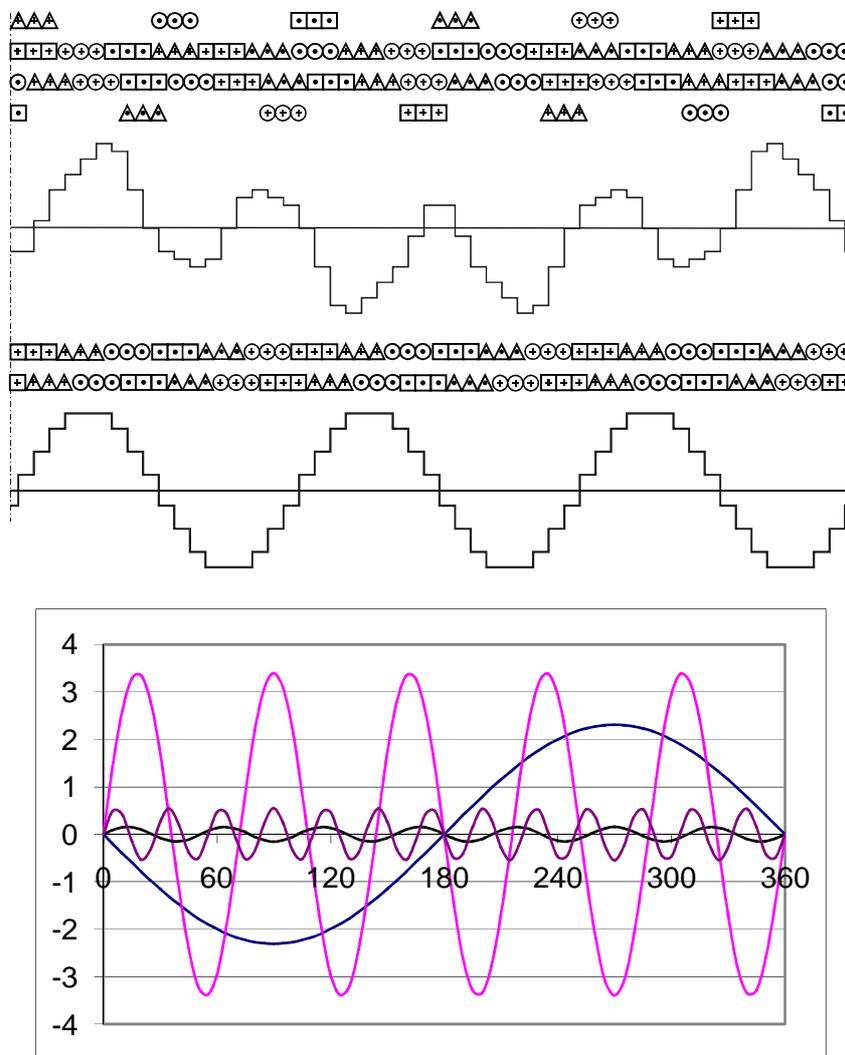


Рисунок 2 – Основная гармоника, низшая гармоника и первые высшие гармоники МДС при $2p = 10$

Оценим действие низшей гармоники на пуск двигателя АИР132S10/6 при большем числе полюсов.

Данные базового двигателя АИР132S6: $D = 0,154$ м; $l = 0,115$ м; $w = 68$ - число витков на фазу; $k_d = 1,33$; $\delta = 0,6$ мм; $Z_2 = 56$ – число пазов ротора; $D_2 = 0,1533$ м - диаметр ротора; $B_\delta = 0,85$ Тл – индукция в воздушном зазоре; $k_m = 1,44$; $b_{ск} = 9,0$ мм – скос пазов ротора; $D_\kappa = 0,131$ м – диаметр замыкающих колец роторной обмотки; $h_{кл} = 0,02$ м и $l_{кл} = 0,01$ м - высота и длина элемента замыкающих колец; $Q_c = 72$ мм² - сечение стержня роторной обмотки; $Q_\kappa = 220$ мм² – сечение элементов замыкающих колец.

При переключении полюсов соотношение витков, потоков и индукций в воздушном зазоре:

$$\frac{w_{10}}{w_6} = \frac{k_{e10} U_{н10} k_{об6} \Phi_6}{k_{e6} U_{н6} k_{об10} \Phi_{10}} = 0,92 \frac{380 \cdot 0,90 \cdot \Phi_6}{220 \cdot 0,73 \cdot \Phi_{10}} = 4;$$

$$\frac{\Phi_{10}}{\Phi_6} = 0,48;$$

$$\frac{B_{d10}}{B_{d6}} = \frac{10}{6} \cdot \frac{\Phi_{10}}{\Phi_6} = 1,667 \cdot 0,48 = 0,80.$$

С учётом малой индукции принимаем $k_m = 1,25$.

Скосу пазов ротора на угол $b_{ск} = 360^0 b_{ск} / pD_2 = 360^0 \cdot 9,0 / (3,1416 \cdot 153,3) = 6,73^0$ соответствует обмоточный коэффициент роторной обмотки

$$k_{об2} = \frac{\sin \frac{pb_{ск}}{2}}{\frac{pb_{ск}}{2}} = \frac{\sin \frac{5 \cdot 6,73}{2}}{\frac{5 \cdot 0,1174}{2}} = 0,986.$$

Приведённое к ротору сопротивление взаимоиндукции

$$x'_m = 2pf \frac{Z_2 D l k_{об2}^2}{dk_d k_m p^2} = 314 \frac{51 \cdot 0,154 \cdot 0,115 \cdot 0,986^2}{0,35 \cdot 10^{-3} \cdot 1,32 \cdot 1,25 \cdot 5^2} 10^{-7} = 19,1 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$$

Согласно рисунку 3 ($h_1 = 18,3$ мм, $h_2 = 0,75$ мм, $r_1 = 2,25$ мм, $r_2 = 1,2$ мм, $b = 1,5$ мм) коэффициент проводимости рассеяния паза ротора [2]

$$I_{n2} = \frac{h_1 + 0,8r_2}{6r_1} \left(1 - \frac{pr_1^2}{2Q_c}\right)^2 + 0,66 - \frac{b}{4r_1} + \frac{h_2}{b} = \frac{18,3 + 0,8 \cdot 1,2}{6 \cdot 2,25} \left(1 - \frac{3,14 \cdot 2,25^2}{2 \cdot 72}\right)^2 + 0,66 - \frac{1,5}{4 \cdot 2,25} + \frac{0,75}{1,5} = 1,24 + 0,66 - 0,17 + 0,5 = 2,23.$$

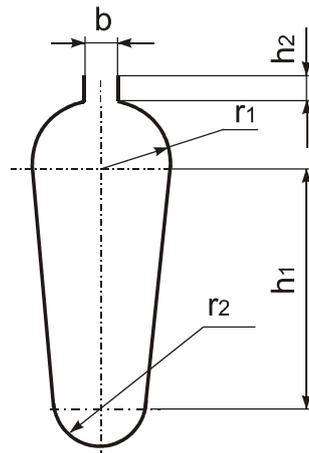


Рисунок 3 – Форма и размеры паза ротора

Коэффициент проводимости рассеяния замыкающих колец

$$I_{кл} = \frac{2,3D_к}{Z_2 l (2 \sin \frac{pp}{Z_2})^2} \lg \frac{4,7D_к}{2h_{кл} + 2l_{кл}} = \frac{2,3 \cdot 0,131}{51 \cdot 0,115 \cdot (2 \sin \frac{180 \cdot 5}{51})^2} \lg \frac{4,7 \cdot 0,131}{2 \cdot 0,022 + 2 \cdot 0,01} = 0,14.$$

Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния

$$I_{\partial 2} = \frac{0,9t_2(Z_2/6p)^2 t_{\partial 2}}{dk_d} = \frac{0,9 \cdot \frac{3,1416 \cdot 153,3}{51} \cdot (\frac{51}{6 \cdot 5})^2}{0,35 \cdot 1,32} \cdot 0,0324 = 1,72,$$

где

$$t_{2\partial} = \frac{(pp)^2}{(Z_2 \sin \frac{pp}{Z_2})^2} - 1 = \frac{(3,1416 \cdot 5)^2}{(51 \sin \frac{180 \cdot 5}{51})^2} - 1 = 0,0324$$

- коэффициент дифференциального рассеяния роторной обмотки.

Коэффициент проводимости рассеяния скоса пазов

$$I_{ск} = \frac{t_2 \left(\frac{b_{ск}}{t_2} \right)^2}{9,5 d k_d k_m} = \frac{9,44 \left(\frac{9,0}{9,44} \right)^2}{9,5 \cdot 0,35 \cdot 1,32 \cdot 1,25} = 1,56,$$

где зубцовое деление ротора

$$t_2 = \frac{p D_2}{Z_2} = \frac{3,1416 \cdot 0,1533}{51} = 0,00944 \text{ м.}$$

Индуктивное сопротивление роторной обмотки:

$$\begin{aligned} x_2 &= 7,9 f l \lambda_2 = 7,9 f l (\lambda_{n2} + \lambda_{\partial 2} + \lambda_{кл} + \lambda_{ск}) \cdot 10^{-6} = \\ &= 7,9 \cdot 50 \cdot 0,115 (2,23 + 1,72 + 0,14 + 1,56) \cdot 10^{-6} = 2,57 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Активное сопротивление стержня, активное сопротивление замыкающих колец, приведённое к току стержня, и активное сопротивление роторной обмотки ($\gamma_a = 24 \text{ См/мкм}$ (Сименс/микрометр) - удельная проводимость алюминия при 75^0 С с учётом особенностей технологии заливки пазов ротора алюминием):

$$R_c = \frac{l}{g_a Q_c 10^3} = \frac{115}{24 \cdot 72 \cdot 10^3} = 0,67 \cdot 10^{-4} \text{ Ом;}$$

$$\begin{aligned} R_{кл} &= \frac{2 p D_{\kappa}}{Z_2 g_a Q_{кл} (2 \sin \frac{p p}{Z_2})^2 10^3} = \frac{2 \cdot 3,1416 \cdot 131}{51 \cdot 24 \cdot 220 (2 \sin \frac{180^0 \cdot 5}{51})^2 \cdot 10^3} = \\ &= 0,083 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.} \end{aligned}$$

$$R_2 = R_c + R_{кл} = 0,753 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$$

Для гармоники $\nu = 1$:

$$k_{об2\nu} \approx 1; \lambda_{n2\nu} = \lambda_{n2}; I_{ск\nu} = I_{ск};$$

$$x'_{mm} = 2 p f \frac{Z_2 D l k_{об2\nu}^2}{d k_d k_m n^2} = 314 \frac{51 \cdot 0,154 \cdot 0,115 \cdot 1^2}{0,35 \cdot 10^{-3} \cdot 1,32 \cdot 1,25 \cdot 1^2} 10^{-7} = 480 \cdot 10^{-4} \text{ Ом;}$$

$$I_{\kappa m} = \frac{2,3D_{\kappa}}{Z_2 l (2 \sin \frac{pn}{Z_2})^2} \lg \frac{4,7D_{\kappa}}{2h_{\kappa l} + 2l_{\kappa l}} =$$

$$= \frac{2,3 \cdot 0,131}{51 \cdot 0,115 \cdot (2 \sin \frac{180 \cdot 1}{51})^2} \lg \frac{4,7 \cdot 0,131}{2 \cdot 0,022 + 2 \cdot 0,01} = 3,35;$$

$$I_{\delta 2n} = \frac{0,9 t_2 (Z_2 / 6n)^2 t_{\delta 2}}{dk_d} = \frac{0,9 \cdot \frac{3,1416 \cdot 153,3}{51} \cdot (\frac{51}{6 \cdot 1})^2}{0,35 \cdot 1,32} \cdot 0,000637 = 0,85,$$

где

$$t_{2n} = \frac{(pn)^2}{(Z_2 \sin \frac{pn}{Z_2})^2} - 1 = \frac{(3,1416 \cdot 1)^2}{(51 \sin \frac{180 \cdot 1}{51})^2} - 1 = 0,000637.$$

Индуктивное сопротивление роторной обмотки:

$$x_{2v} = 7,9fl\lambda_{2v} = 7,9fl(\lambda_{n2} + \lambda_{\delta 2v} + \lambda_{\kappa lv} + \lambda_{ck}) \cdot 10^{-6} =$$

$$= 7,9 \cdot 50 \cdot 0,115 (2,23 + 0,85 + 3,35 + 1,56) \cdot 10^{-6} = 3,63 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление замыкающих колец, приведённое к току стержня, и активное сопротивление роторной обмотки для гармоники $v = 1$:

$$R_{\kappa m} = \frac{2pD_{\kappa}}{Z_{2g} Q_{\kappa l} (2 \sin \frac{pn}{Z_2})^2 10^3} = \frac{2 \cdot 3,1416 \cdot 131}{51 \cdot 24 \cdot 220 (2 \sin \frac{180 \cdot 1}{51})^2 \cdot 10^3} = 0,2 \cdot 10^{-4} \text{ Ом;}$$

$$R_{2v} = R_c + R_{\kappa lv} = 0,87 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$$

Скольжение ротора относительно гармоники $n = 1$ и относительный момент от этой гармоники (рисунок 4):

$$s_n = 1 + (1 - s) \frac{n}{p} = 1 + (1 - s) \frac{1}{5} = 1,2 - 0,2s;$$

$$\frac{M_n}{M} = \frac{k_{об2n}^2 \cdot p}{k_{об2}^2 \cdot n} \cdot \frac{F_{mn}^2}{F_m^2} \cdot \frac{R_{2n}}{R_2} \cdot \frac{s_n}{s} \cdot \frac{R_2^2 + s^2(x'_m + x_2)^2}{R_{2n}^2 + (x'_{mn} + x_{2n})^2} = \frac{1^2}{0,986^2} \cdot \frac{5}{1} \cdot 0,68^2 \cdot \frac{0,87}{0,753} \cdot \frac{1,2 - 0,2s}{s} \cdot \frac{0,753^2 \cdot 10^{-8} + (19,1 \cdot 10^{-4} + 2,56 \cdot 10^{-4})^2}{0,87^2 \cdot 10^{-8} + s_n^2(480 \cdot 10^{-4} + 3,63 \cdot 10^{-4})^2} = 2,74 \cdot \frac{(1,2 - 0,2s) \cdot (0,567 + s^2 \cdot 469)}{s \cdot (0,757 + (1,2 - 0,2s)^2 \cdot 233898)}$$

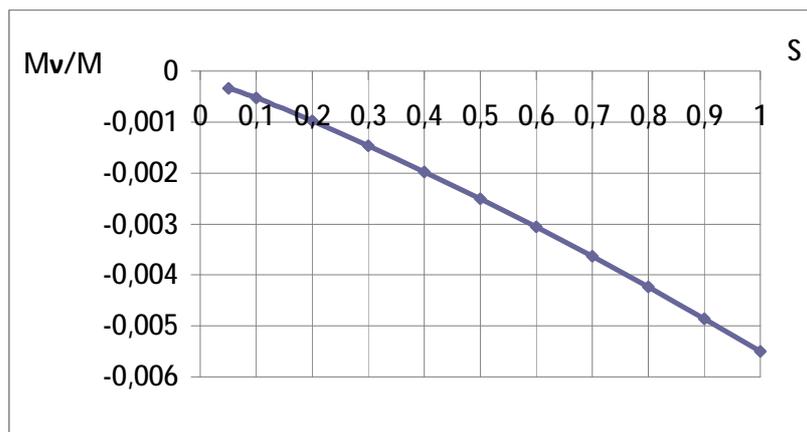


Рисунок 4 – Вид относительного момента от низшей гармоники

Выводы

1. Двигатели на 10/6 полюсов с соединением фаз по схеме YΔ/YYY позволяют полностью использовать габарит базового двигателя, а по соотношению индукций в полной мере подходят для привода вентилятора.
2. Низшая гармоника МДС при большем числе полюсов не оказывает отрицательного действия на пуск двигателя.

Литература

1. Богатырев Н.И. Электрические машины переменного тока / Н.И. Богатырев, В.Н. Ванурин, О.В. Вронский – Краснодар. КубГАУ, 2007. - 301 с.
2. Гурин Я.С. Проектирование серий электрических машин / Я.С. Гурин, Б.И. Кузнецов – М.: Энергия, 1978. – 480 с.